



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

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

PROBLEMATIKA ŠABLONOVÉHO TISKU PÁJECÍ PASTY PRO SOUČÁSTKY S MALOU ROZTEČÍ VÝVODŮ

ISSUE OF SOLDER PASTE PRINTING FOR FINE-PITCH COMPONENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Ondřej Šimeček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO, 2011

Bibliografická citace díla:

ŠIMEČEK, O. *Problematika šablonového tisku pájecí pasty pro součástky s malou roztečí vývodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 62s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Problematika šablonového tisku pájecí pasty pro součástky s malou roztečí vývodů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom 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.

V Brně dne 26. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 26. května 2011

.....
podpis autora

Abstrakt

Přes nesporné výhody zavádění fine-pitch součástek je ovšem potřeba počítat s několika úskalími při výrobě. Především jsou to zvýšené nároky na přesnost osazení a také tisk pasty. V této práci se zabývám problematikou tisku pájecí pasty pro tyto součástky a jejímu vyhodnocování pomocí SPC. K vyhodnocování jsem použil 3D inspekci pasty založenou na laserovém snímání povrchu.

Výstupem práce je popsání principů tisku pasty. Zpracování GR&R, SPC analýzy a histogramy tisku pro některé výstupy.

V pokračování diplomové práce jsem se zaměřil na změnu designu motivu u problematických komponent a ekonomické zhodnocení provedených úprav.

Abstract

Despite the indisputable advantages of fine-pitch components, it is need to calculate with a few trouble during production, especially increased requirements for accuracy of mounting and solder printing. In this work I'm concerned with problems of solder printing for these components and evaluation using SPC. For the evaluation I used 3D paste inspection based on laser scanning of the surface.

The output of this work is to describe the principles of solder printing and elaborating of GR&R, SPC analysis and histograms of solder printing for some outputs.

I focused in my master thesis on motive design change of problematic components and economic evaluation of the adjustments.

Keywords - Klíčová slova

Aperture – apertura, otvor

AR (Area ratio) – poměr ploch

CT (Cycle time) – doba (výrobního) cyklu

DPMJ (Defects per milion joints) – počet chyb na milion pájených spojů

DPMO (Defects per milion oportunities) – počet chyb na milion příležitostí

DOE (Design of Experiments) – Plánování experimentů

Fine pitch – jemná (malá) rozteč

OEE (Overall Equipment Effectiveness) – celková efektivita zařízení

Performance rate – Výkonnost (efektivnost)

RA (Resistor array) – odporové pole, součástka tvořena více odpory

R&R (Repeatability and Reproducibility) – opakovatelnost a reprodukovatelnost

SMT (Surface mount technology) – technologie povrchové montáže

Solder paste – pájecí pasta

SP (Screen Printer) – sítotiskový stroj

SPC (Statistical process control) – statistické řízení procesu (metody řízení)

SPI (Solder paste inspection) – inspekce natištěné pasty

Stencil, metal mask – šablona, maska

TE (Transfer efficiency) – efektivita přenos

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Součástky s malými vývody	11
2.1. Fine pitch IC	11
2.2. Pole pasivních součástek s malými vývody	11
2.3. Čipy velikosti 0402 a menší	12
3. Tisk pasty	13
3.1. Pájecí pasta	13
3.1.1. Struktura a parametry pájecích past	13
3.1.2. Příprava pasty a příklady defektů při tisku.....	13
3.2. Masky (Šablony).....	15
3.2.1. Vhodné materiály pro výrobu masek	15
3.2.2. Metody zhotovení motivu	16
3.2.3. Stepstencil	16
3.2.4. Parametry Area ratio (poměr ploch) a Transfer efficiency (efektivita přenosu) 17	
3.3. Design apertur.....	18
3.4. Screen printer.....	19
3.4.1. Stručný popis principu tisku.....	19
3.4.2. Hlavní nastavitelné parametry Screen printeru	19
3.4.3. Vliv materiálu a kondice stěrek na tisk	20
3.4.4. Průhyb stěrky uvnitř masky působením přtlaku.....	20
3.4.5. Vliv směru stěru pasty.....	21
3.5. JET Printing	22
4. Inspekce natištěné pasty.....	23
4.1. Metody inspekce.....	23
4.1.1. 2D Inspekce.....	23
4.1.2. 3D Inspekce.....	23
4.2. 3D SPI PARMÍ.....	24
4.2.1. Princip snímání.....	24
4.2.2. Hlavní parametry SPI PARMÍ	25
4.2.3. Vyhodnocení GR&R – „Gauge Repeatability and Reproducibility“	26
4.3. Detekce nečistot pomocí 3D SPI	27
5. SPC	29
5.1. Definice statistických parametrů	29
5.2. Metody vyhodnocování tisku pomocí SPC	30
5.4. Normální (Gaussovo) rozdělení x Histogram.....	32
6. Plánování (návrh) experimentů - Design of experiments (DOE)	35
6.1. Základní pojmy DOE.....	35
6.2. Návrh a vyhodnocování experimentů.....	35
7. Výsledky Měření.....	37

7.1.	GR&R SPI PARMÍ	37
7.2.	SPC analýza metodou DOE	41
7.3.	Vliv materiálu stěrek na množství natištěné pasty	46
7.4.	Modifikace apertur pro odporová pole	50
8.	Závěr	61
9.	Použitá literatura a odkazy	62

Seznam obrázků

Obr. 1: Příklad pouzder s malou roztečí vývodů.....	11
Obr. 2: Hlavní rozměry čipů	12
Obr. 3: Vývoj procentuálního zastoupení velikostí čipů ve výrobě.....	12
Obr. 4: Příklad histogramu četnosti a distribuční funkce rozměrů zrna.....	13
Obr. 5: Porovnání hladkosti apertury zhotovené v Nikl a nerezové oceli.....	15
Obr. 6: Tisk pasty s použitím step stencil	16
Obr. 7: Závislost efektivity a směrodatné odchylky přenosu pasty na AR	17
Obr. 8: Efektivita přenosu pasty.....	17
Obr. 9: Popis sil působících při tisku	19
Obr. 10: Defekty kovových stěrek- ohnutá, zvlňená a popraskaná.....	20
Obr. 11: Ohybová čára pro konstantní zatížení nosníku (stěrky).....	21
Obr. 12: Porovnání tvaru natištěné pasty v závislosti na s;těru pohybu stěrek.....	21
Obr. 13: Princip nanášení pasty dispečerem	22
Obr. 14: A - nanesená pasta pro QFP, B - vzhled pájeného spoje po přetavení, C - rentgenový snímek pouzdra BGA.....	22
Obr. 15: Princip měření výšky povrchu	24
Obr. 16: Princip vzorkování výšky povrchu	24
Obr. 17: Základní parametry inspekčního algoritmu	25
Obr. 18:Příklad částic po vyřezávání obrysů DPS, které mohou po uvolnění způsobit defekt pájení.....	27
Obr. 19: Vlevo – uvolněné částičky laminátu, Vpravo – nadzvednutý čip vlivem části laminátu	27
Obr. 20: Detekční plošky nečistot (vyplněny modrou barvou), které jsou umístěny pod IC s pouzdem SOIC.	28
Obr. 21: Gausovo rozložení s vyznačenými parametry procesu	29
Obr. 22: Strom Regulačních diagramů.....	31
Obr. 23: Diagram X.....	31
Obr. 24: Diagram R.....	31
Obr. 25: Normální rozdělení	32
Obr. 26: Závislost tvaru normálního rozdělení na parametrech μ a σ	32
Obr. 27: Závislost tvaru distribuční funkce normálního rozdělení na parametrech μ a σ	33
Obr. 28: Závislost DPMO na sigma	34

Obr. 29: Celkový pohled na měřenou DPS	37
Obr. 30: Číslování měřených apertur	37
Obr. 31: Celkový pohled na měřenou DPS	41
Obr. 32: Pohled na měřené apertury.....	41
Obr. 33: Rozložení množství pasty na DPS z linky 5	47
Obr. 34: Rozložení množství pasty na DPS z linky 6	48
Obr. 35: Rozložení množství pasty na DPS z linky 10	49
Obr. 36: DPS použitá pro test s modifikovanými aperturami	50
Obr. 37: Vlevo – modifikace apertury se zakótovanými příbytky rozměrů v každém směru Vpravo – pozice osazené součástky odporového pole.....	51
Obr. 38: řídicí diagram (v programu SPCworks) nejhoršího výsledku apertury před modifikací	53
Obr. 39: řídicí diagram (v programu SPCworks) nejhoršího výsledku apertury po modifikaci	53
Obr. 40: Histogram plochy natištěné pasty před a po modifikaci	54
Obr. 41: Histogram objemu natištěné pasty před a po modifikaci	54
Obr. 42: Normálové rozložení a histogram plochy natištěné pasty před modifikací.....	55
Obr. 43: Normálové rozložení a histogram objemu natištěné pasty před modifikací.....	55
Obr. 44: Normálové rozložení a histogram plochy natištěné pasty po modifikaci	56
Obr. 45: Normálové rozložení a histogram objemu natištěné pasty po modifikaci.....	56

Seznam tabulek

Tab. 1: Rozměry odporového pole s roztečí 0,5mm	11
Tab. 2: Standardní rozměry čipů	12
Tab. 3: Popis defektů tisku a jejich příčin	14
Tab. 4: Popis vlastností jednotlivých tvarů apertur	18
Tab. 5: Popis hlavních parametrů scanování 3D SPI Parmi.....	25
Tab. 6: Hodnocení procesu podle indexu C_{PK}	30
Tab. 7: DPMO (PPM) a přepočet mezi sigma a CPK.....	33
Tab. 8: Nejmenší ortogonální soustava L-4	35
Tab. 9: Vyhodnocení GR&R.....	38
Tab. 10: Vyhodnocení GR&R.....	40
Tab. 11: Určení faktorů a jejich úrovní	42
Tab. 12: Nastavení úrovní faktorů.....	42
Tab. 13: Výsledky měření objemu pasty.....	43
Tab. 14: Výsledky parametrů objemu	43
Tab. 15: Výsledky měření plochy pasty	44
Tab. 16: Výsledky parametrů plochy	44
Tab. 17: Výsledky měření výšky pasty	45
Tab. 18: Výsledky parametrů výšky.....	45
Tab. 19: Nastavení parametrů tisku a výsledky testů pro porovnání materiálů stěrek.....	46
Tab. 20: Zjištěné chyby z linky 5	47
Tab. 21: Zjištěné chyby z linky 6.....	48
Tab. 22: Zjištěné chyby z linky 10.....	49
Tab. 23: Výsledky sledovaného modelu od začátku výroby.....	52
Tab. 24: Výsledky před modifikací (20.7.2010 8:28-9:01).....	52
Tab. 25: Výsledky po modifikaci (20.7.2010 11:23-11:49).....	52
Tab. 26: Porovnání hodnot plochy před a po modifikaci apertur.....	54
Tab. 27: Porovnání hodnot plochy před a po modifikaci apertur.....	54
Tab. 28: Vyhodnocení výsledků po měsících	57
Tab. 29: Seznam zaznamenaných chyb po měsících	57
Tab. 30: Vyhodnocení souhrnných výsledků (za 3 měsíce) před a po modifikaci	58
Tab. 31: Výpočet časové úspory zvýšením efektivity výroby	59
Tab. 32: Výpočet časové úspory na prostojích	59

1. Úvod

Trendem v oblasti povrchové montáže pro spotřební elektroniku je bezpochyby zmenšování SMD komponent tak, aby i konečný výrobek mohl mít kompaktní rozměry. Tím lze dosáhnout nižších výrobních nákladů, což se pozitivně projeví na konkurenceschopnosti v globálním trhu. U produktů kde je nutné zaručit maximální kvalitu a mechanickou odolnost se i nadále upřednostňují komponenty s pouzdry, které mají velké vývody a tím i záruku robustního pájeného spoje (automobilový průmysl, výrobky pro zdravotnictví, armádu atd...).

Jaké jsou tedy cesty k miniaturizaci plošného spoje?

a) Omezení THT (through hole technology) komponent a nahrazení SMT komponenty

Výhodou SMD jsou jednak menší rozměry pouzder a zároveň také to, že součástky zabírají místo pouze na jedné straně plošného spoje, což je velká výhoda u vícevrstvých laminátů se složitým obvodem. Nehledě na další výhody SMD během procesu výroby.

b) Použití DPS s vyšším počtem vrstev

Vícevrstvé desky jsou ovšem náročnější na výrobu a jsou tedy i dražší. Mimo jiné je s vícevrstvámi lamináty spojena řada obtíží při výrobě, a proto se používají lamináty s pokud možno co možná nejnižším počtem vrstev.

c) Integrace funkčních částí obvodu do IC

V současnosti jsou běžně v IC integrovány různé senzory (např. na magnetickém, mechanickém základě...) což vede ke zjednodušení celého obvodu → menší rozměry výsledné sestavy, případně i zmenšení počtu komponent (pájených spojů), což se zase pozitivně projeví na chybovosti.

d) Zmenšení fyzických rozměrů součástek

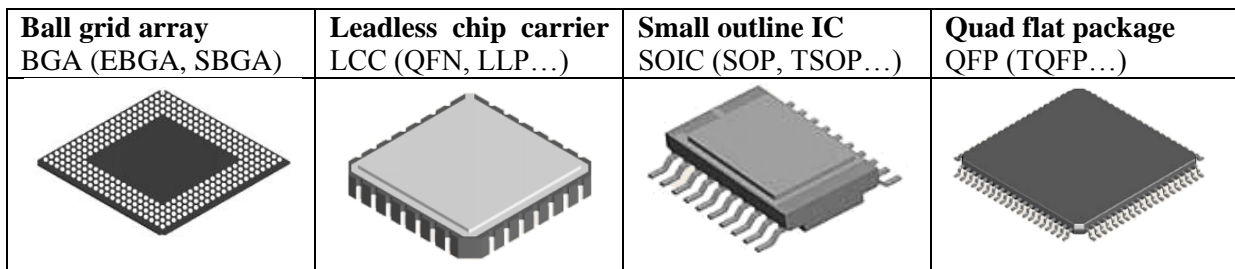
Zmenšením SMD lze úměrně snížit i velikost sestavy. To vede mimo jiné k používání IC s malou roztečí vývodů (Fine pitch) a seskupování většího počtu pasivních součástek do polí (array).

Samozřejmě při miniaturizaci vyvstane několik komplikací při výrobě, se kterými je potřeba počítat. Mezi hlavní patří zpřísnění požadavků na přesnost osazovacích strojů a také problematičtější tisk pájecí pasty pro součástky s malými vývody. Právě problematikou tisku pro tyto případy se zabývám v této práci.

2. Součástky s malými vývody

2.1. Fine pitch IC

Jako Fine pitch jsou označovány integrované obvody s roztečí $\leq 0,65\text{mm}$. Na obrázku níže jsou uvedeny příklady fine pitch pouzder. Pouzdra typu BGA používají nejmenší rozteč 0,5mm. Součástky s vývody L, J a gull wing se nejčastěji používají s roztečemi 0,65mm a 0,5mm. Menší rozteče lze sice dosáhnout, ale velmi tím utrpí mechanická odolnost (na ohyb) vývodů. U pouzder typu LCC se vyskytují také rozteče 0,4mm a 0,3mm, které jsou označovány jako Ultra fine pitch.

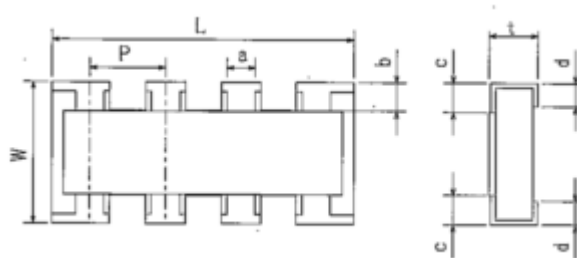


Obr. 1: Příklad pouzder s malou roztečí vývodů [3]

2.2. Pole pasivních součástek s malými vývody

Je-li v části obvodu více pasivních součástek se stejnou hodnotou, jsou často nahrazovány takzvanými poli. Tyto pole jsou vyráběny nejčastěji jako kapacitní a rezistorová. Mezi výhody tohoto řešení patří především úspora místa na plošném spoji a snížení počtu součástek (cycle time osazování se tedy o něco sníží). Pouzdra polí pasivních součástek se vyrábějí až do rozteče 0,5mm a jedná se tedy o fine pitch. V tabulce Tab. 1 jsou vyznačeny hlavní rozměry odporového pole s roztečí 0,5mm, které jsem zvolil za jedno ze sledovaných komponent v analýze.

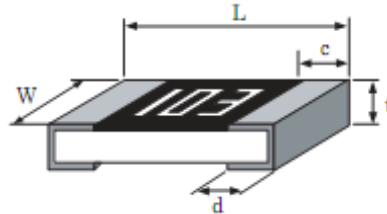
Tab. 1: Rozměry odporového pole s roztečí 0,5mm



Označení:	L	W	c	d	T	b	P
Rozměr (mm):	2,0±0,1	1,0±0,1	0,25±0,2	0,25±0,2	0,35±0,1	0,15±0,1	0,5

2.3. Čipy velikosti 0402 a menší

Čip je označení pro pasivní součástky kvádrového tvaru s metalizovanými elektrodami na kratších stranách. Z pohledu tisku pasty jsou důležité rozměry těchto čipů. Ve značení je obsažena informace o délce (první dvě čísla) a šířce (poslední dvě, případně u 01005 tři čísla) těchto čipů v setinách palce.

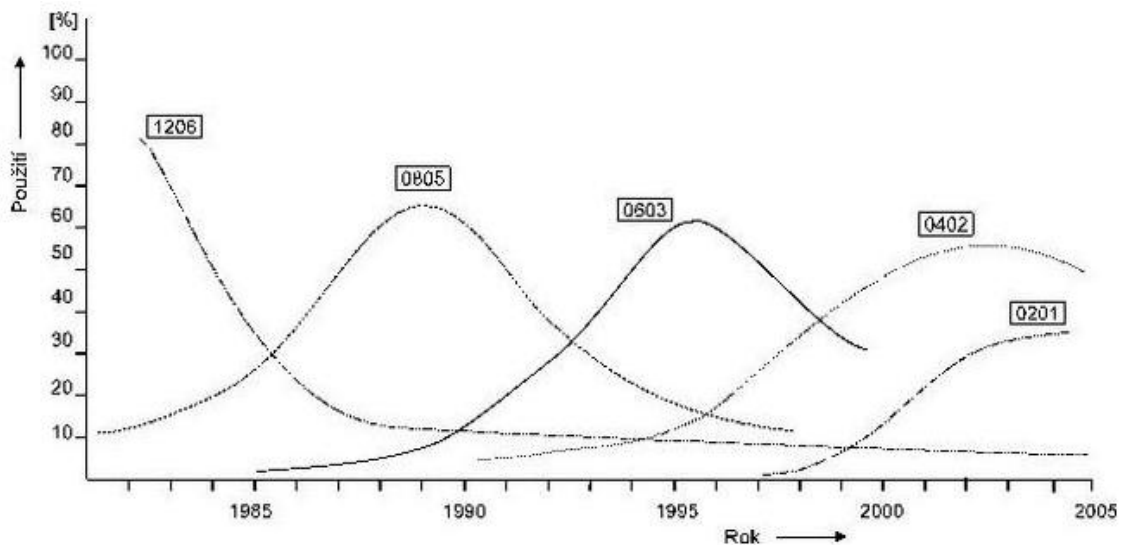


Obr. 2: Hlavní rozměry čipů [3]

Tab. 2: Standardní rozměry čipů

Označení čipu	L (mm)	W (mm)	t (mm)	d (mm)
0603	1,60	0,80	Proměnlivá	0,25 – 0,30
0402	1,00	0,50	Proměnlivá	0,25
0201	0,60	0,30	Proměnlivá	0,15
01005	0,40	0,20	Proměnlivá	0,10

Pro rozměry čipů 0603 a větší bývá tisk většinou bezproblémový. Pro rozměry 0402 a menší je již potřeba počítat s riziky malých apertur při volbě pájecí pasty a parametrů masky. Na obrázku Obr. 3 je vidět postupné upřednostňování čipů menších rozměrů.



Obr. 3: Vývoj procentuálního zastoupení velikostí čipů ve výrobě [5]

Mezi součástky s malými vývody se počítají také různé konektory a menší polovodičové součástky jako jsou například tranzistory s pouzdry typu SOT.

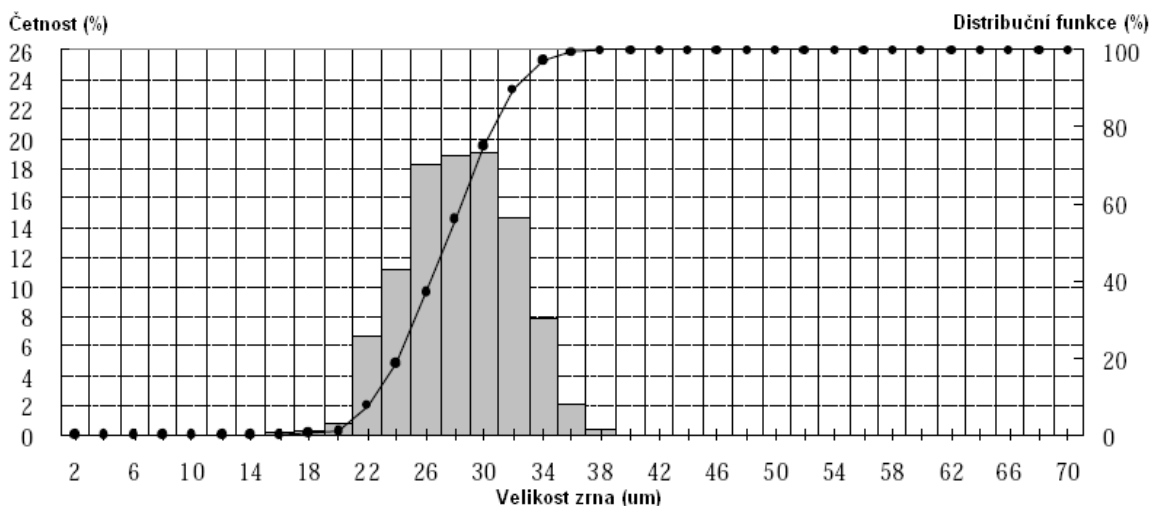
3. Tisk pasty

3.1. Pájecí pasta

3.1.1. Struktura a parametry pájecích past

Hlavní dvě složky pájecí pasty jsou vlastní pájecí slitina ve formě kuliček a tavidlo (flux) které plní funkci pojiva a jehož obsah se pohybuje okolo 10% hmotnosti. Nebudu se zabývat popisem vlastností past majících vliv při procesu pájení, ale zaměřím se primárně na vlastnosti ovlivňující tisk.

Velikost zrna (kuliček slitiny) je jeden ze základních parametrů past. Průměr kuliček v pastě není stejný, ale dosahuje určitého rozpětí, které bývá uvedeno ve specifikacích od výrobce. Větší rozměry kuliček mohou způsobit nedokonalé rozložení pasty uvnitř apertury po přejezdu stěrkou. Jako limitní největší průměr kuliček se udává $\frac{1}{4}$ tloušťka masky. Na obrázku Obr. 4 je vidět rozložení velikosti zrn pasty s deklarovaným průměrem 22~38 μ m.



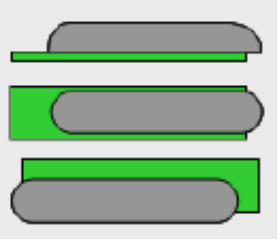
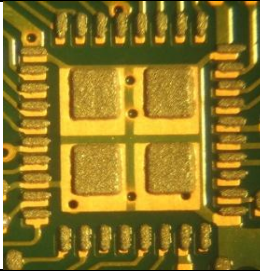
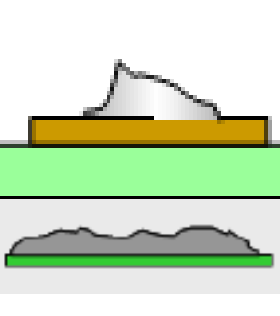

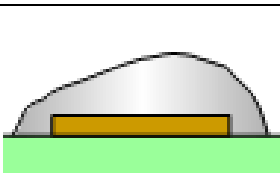

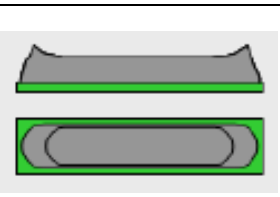

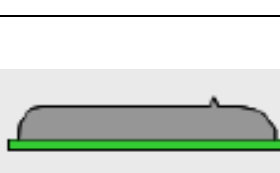
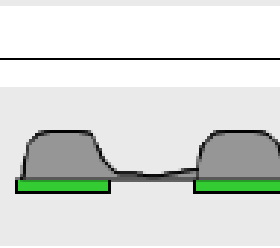
Obr. 4: Příklad histogramu četnosti a distribuční funkce rozměrů zrna

Viskozita pasty – je-li viskozita příliš vysoká (pasta je tuhá) dochází k nedokonalému vyplňování objemu apertur a při odtrhu masky od DPS má pasta tendenci zůstat v apertuře. Projevem pak je nedostatečné množství natištěné pasty. Je-li naopak viskozita pasty příliš nízká, dochází po natištění k roztékání pasty. Viskozita lze měnit změnou teploty pasty (výrobce udává rozmezí doporučených teplot při tisku) a mícháním (tixotropní vlastnosti).

3.1.2. Příprava pasty a příklady defektů při tisku

Jelikož je pájecí pasta skladována před zpracováním v nízké teplotě (obvykle 0-10°C), která není vhodná pro proces tisku, musí se pasta před použitím náležitě připravit. To obnáší aklimatizaci a následnou homogenizaci. Homogenizace se provádí mícháním, čímž se sníží viskozita pasty, dojde k rovnoměrnému rozložení tavidla a velikostí zrn. Pastu je potřeba aklimatizovat tak, aby byla teplota pasty v celém objemu v doporučených mezích teplot (obvykle 23-25°C). Při těchto teplotách ovšem dochází k vysychání pasty a může dojít k vytvoření ztuhlých hrudek. Tyto hrudky mohou negativně ovlivnit tisk částečným nebo úplným zacpáním apertury.

Tab. 3: Popis defektů tisku a jejich příčin [1]

Parametr	Kritéria tisku	Možné příčiny	Neshodný vzorek	Reálný příklad
Offset pájecí pasta x DPS	Pasta by neměla přesahovat pad na DPS o více než 1/5 šířky, nebo délky padu.	- špatné načtení fiduciálu masky, nebo desky - špatné uchycení laminátu při tisku pasty		
Malé množství pasty	Množství pasty by mělo být dostatečné pro dosažení dobrých vlastností pájeného spoje. Např. norma IPC-A-610.	- nízká teplota (viskozita pasty) - nehomogenní pasta (špatná příprava) - rychlý odtrh - zablokovaná apertura		
Zkratky a roztékání pasty	Spojení pasty mezi sousedními pady není přípustné.	- příliš vysoká teplota pasty - odstup deska maska při tisku		
Vytrhávání krajů pasty	Je nutné minimalizovat tento jev, protože může zapříčinit zkratky	- vysoká odtrhová rychlost		
Linka vyšší pasty po celé délce motivu	Není to příliš závažná chyba při tisku, ale může zapříčinit sníženou životnost masky	- poškozena stěrka		NA
Zkratky mezi natištěnou pastou	Velmi pravděpodobné, že se i po přetavení vyskytne zkrat	- nadměrný tlak stěrek - nerovnoměrný povrch laminátu		NA

3.2.Maska (Šablona)

Pro tisk pasty se používá šablona s motivem, tzv. masky (anglicky stencil nebo metal mask). Mezi hlavní parametry masky patří tloušťka plátu s motivem, rozměry rámu a způsob uchycení v rámu. Standardní rozměry rámu jsou 29“ x 29“ a 30cm x 40cm. Rozměr 29“ x 29“ upřednostňuje většina velkých výrobců screen printerů (dále SP), ale často lze u SP šířku pro uchycení masky nastavit.

Kvalitu zhotovení samotného motivu ovlivňují především ty to parametry:

- přesnost tvaru a rozměrů apertur
- offset apertur
- sbíhavost stěn apertur
- kvalita (kontrastnost) fiduciálů

3.2.1. Vhodné materiály pro výrobu masek

Nerezová ocel

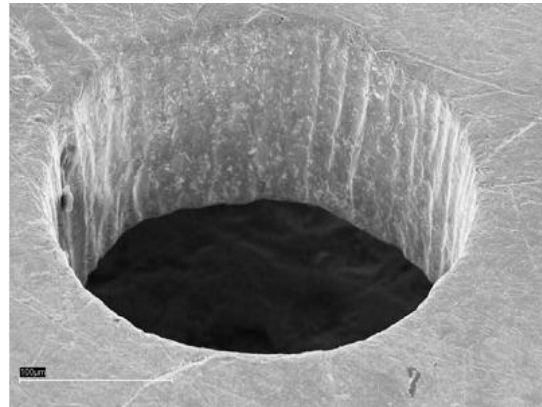
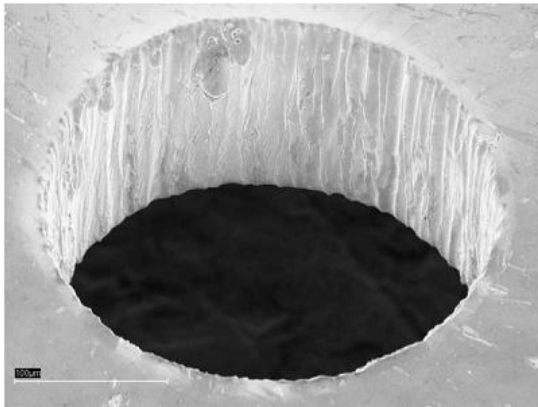
- + levnější než Ni
- větší otěr než Ni

Nikl

- + odolnější (tvrdší)
- + vhodnější pro masovou výrobu
- + vhodná pro elektroformové masky
- cenově nejnákladnější vhodný materiál

Měď

- + vhodný materiál pro leptané masky
- velký otěr → nevhodný pro velké série



Materiál Nikl – apertura o průměru 250um

Materiál nerez ocel – apertura o průměru 250um

Obr. 5: Porovnání hladkosti apertury zhotovené v Nikl a nerezové oceli [1]

3.2.2. Metody zhotovení motivu

Používají se tři základní metody zhotovení motivu na masce. Nejběžnější je zřejmě vyřezávání apertur pomocí laseru. Přesnost apertur zhotovených tímto způsobem se pohybuje řádově v μm . Nevýhodou bývá ovšem hrubější povrch stěn apertur, což může zapříčinit horší vlastnosti přenosu pasty. Moderní stroje pro „Laser cut“ dosahují rychlost 5-10 apertur/s.

Elektroformové masky vznikají tak, že se na nosný substrát nanese vrstva fotorezistu (jeho tvar odpovídá požadovaným aperturám) a následně se elektrochemicky na substrát nanese požadovaná vrstva niklu. Poté se niklový plát separuje od nosného substrátu. Takto získáme velmi přesně zhotovený motiv s tolerancí do $\pm 5\mu\text{m}$. Výhodou elektroformových masek jsou velice hladké stěny apertur a schopnost vytvoření menších apertur oproti laseru. Použitý materiál a postup se ovšem projeví na vyšší ceně masky.

Další metodou zhotovení motivu je leptání měděného polotovaru. Postup výroby je podobný jako u zhotovení motivu DPS.

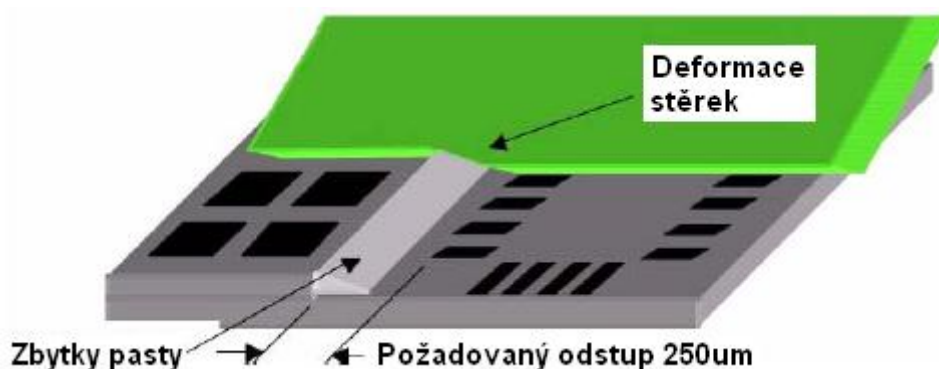
Hodnota kritického Area ratio (viz bod 2.2.4) pro elektroformové masky se udává okolo 0,55 a pro laserem řezané desky 0,65. Z toho je patrné, že elektroformové masky mohou nabídnout výrazné zlepšení výsledků tisku pasty při použití malých apertur.

3.2.3. Stepstencil

Pokud jsou v motivu apertury s velmi malými rozměry a je nutno dodržet kvůli ostatním komponentům vyšší tloušťku masky, můžeme zvolit takzvaný stepped stencil. Jedná se o masku s proměnnou tloušťkou. Tedy zmenšená tloušťka (většinou o 25 μm až 50 μm) pro apertury kde by hrozil nedostatečný přenos pasty z důvodu nedodržení doporučených hodnot „Area ratio“. V takovém případě se zmenšuje tloušťka masky ze strany stěrek.

Pokud se zmenší tloušťka masky ze strany desky, jedná se o tzv. Step less step stencil. Výhodou této metody je minimalizace poškození stěrek.

Teoreticky v případě, že na laminátu jsou štítky případně jiná překážka nad rovinou DPS, která by během tisku nadzvedávala masku a tím pádem ovlivňovala tisk, je možné použít také step stencil. Při takové situaci se ovšem tloušťka masky snižuje ze strany laminátu. Tato metoda je ovšem limitována nízkým rozdílem tloušťek masky.



Obr. 6: Tisk pasty s použitím step stencil [1]

Aby se minimalizovalo u step stencil opotřebovávání stěrek je vhodné, aby se plocha se sníženou tloušťkou pootočila přibližně o 5° oproti stěrkám. Tím se dosáhne plynulejšího nájezdu břitu stěrky na hranu na masce.

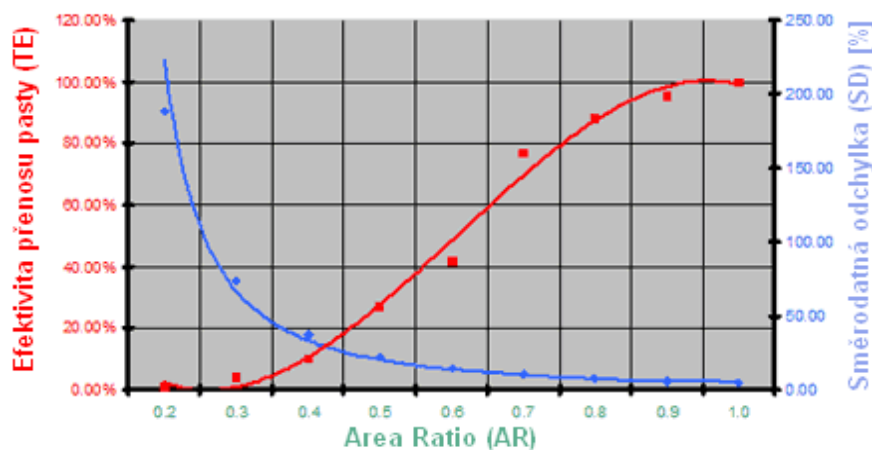
3.2.4. Parametry Area ratio (poměr ploch) a Transfer efficiency (efektivita přenosu)

Area ratio

Při odtrhu masky od DPS působí na pastu v aperturách dvě dominantní síly a to přilnavost pasty k laminátu a ke stěnám masky. Poměr těchto sil je rozhodující pro množství pasty, které zůstane na laminátu a naopak množství pasty, které zůstává po odtrhu v apertuře (viz TE). Mimo jiné tento poměr závisí na poměru plochy podstavy apertury a stěn apertury. Tento poměr se běžně nazývá AR – Area ratio. Při vysokém AR je efektivita přenosu pasty na desky vysoká a vzniká tak málo potenciálně nebezpečných zbytků pasty v aperturách masky. Pokud je AR nižší než určitá kritická hodnota, výrazně klesá množství přenesené pasty a zároveň i stabilita tisku (velký rozptyl jednotlivých výsledků -> vysoká směrodatná odchylka).

Velikost kritické hodnoty AR se různí podle metody zhotovení apertury a materiálu, ze kterého je maska vytvořena. To totiž určuje hladkost povrchu stěn apertury (plocha stěn apertury). Hladší apertura tedy znamená i nižší kritickou hodnotu AR.

Efektivita přenosu pasty je závislá na velikosti poměru AR. Při vysoké hodnotě AR se TE blíží teoretickému maximu 100%. V blízkosti limitního AR se TE rapidně snižuje a pod touto hodnotou je tisk velmi nestabilní z toho důvodu, že velké množství pasty zůstává po odtrhu masky v apertuře. Závislost TE na AR je zobrazena na Obr. 7.



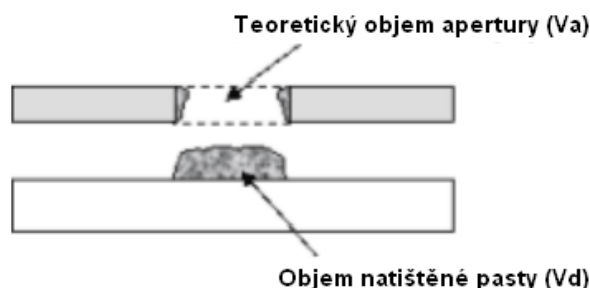
Obr. 7: Závislost efektivity a směrodatné odchylky přenosu pasty na AR [1]

Vzorec pro výpočet **Area ratio** (poměr ploch)

$$AR = \frac{\text{"Plocha podstavy apertury"}}{\text{"Plocha stěn apertury"}} = \frac{\text{"Plocha podstavy apertury"}}{\text{"Obvod apertury"} \cdot \text{"Tloušťka masky"}} \quad (1)$$

Vzorec pro výpočet **Transfer efficiency** (efektivita přenosu)

$$TE = \frac{\text{"Objem natištěné pasty (V_d)"} }{\text{"Objem apertury (V_a)"} } \quad (2)$$



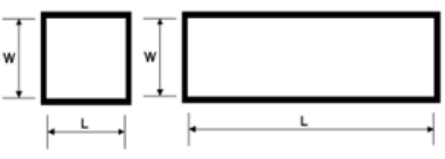
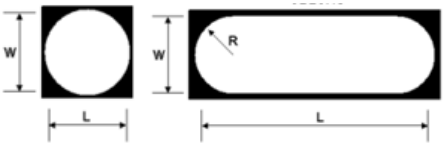
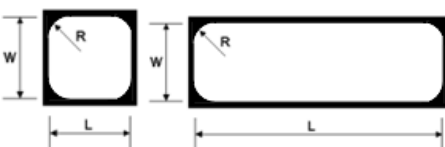
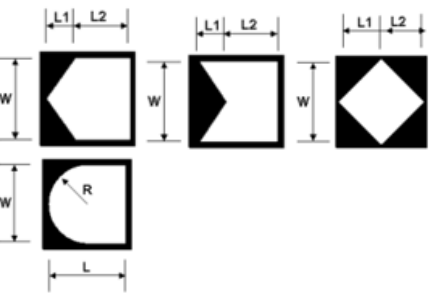
Obr. 8: Efektivita přenosu pasty

3.3.Design apertur

Rozměry apertur jsou dány velikostí plošky na DPS a redukcí. Redukce je zmenšení apertury oproti padu, což má zaručit, že pasta nebude přesahovat přes okraje padu a tím snížit riziko zkratů. Velikost redukce je závislá na metodě zhotovení motivu masky (u elektroformovaných masek se doporučuje redukce větší přibližně o 10 μ m oproti maskám řezaných laserem) a náchylností dané součástky na zkratky. Apertura může být redukována ze všech směrů, ale může se zvolit pouze redukce šířky. Obvykle redukce dosahuje hodnot mezi 25 a 50 μ m.

Tvar apertur zásadním způsobem ovlivňuje výsledky tisku pasty. V zásadě jsou nejčastěji používané obdélníkové apertury se zakulacenými rohy, se kterými se dosahuje nejlepších výsledků přenosu pasty při současné minimalizaci zkratů a extra kuliček pájky.

Tab. 4: Popis vlastností jednotlivých tvarů apertur

Název	Tvar apertury	Vlastnosti
Čtverec (Square) a Obdélník (Rectangle)		menší riziko zkratů riziko zbytků pasty v rozích apertury
Kulaté (Circle, Oblong)		Vyšší riziko zkratů oproti čtvercovým aperturám při zachování objemu pasty (Platí především pro kruh).
Oblé (round rectangle)		Nejčastěji používané Kombinují pozitivní vlastnosti hranatých a kruhových apertur
Home plate (Inverted HP) Diamant (Diamond) D (D-Shape)		Složitější tvary apertur se používají především, je-li zvýšené riziko fenoménů jako jsou např. standing chip (součástka postavená na jednom vývodu), nebo midchip balling (kulička pájky na boční straně součástky).

3.4. Screen printer

3.4.1. Stručný popis principu tisku

Screen printery jsou stroje, používané v SMT pro tisk pájecí pasty. Mohou být v provedeních jak ručních, poloautomatických, tak i plně automatických, s vysokou úrovní kvality tisku. Některé SP jsou dokonce vybaveny jednoduchou inspekcí pasty (viz kapitola Inspekce natištěné pasty).

U šablonového tisku se nanáší pájecí pasta na DPS přes masku s otvory (aperturami) pomocí stěrek (squeegee). Po průjezdu stěrky a následném odtrhu masky od laminátu pasta ulpí na povrchu padu desky plošného spoje. Pro dosažení dobrých výsledků tisku je zapotřebí, aby tištěná deska, byla pevně uchycena (zaclampována). Poté je nutné vyrovnat masku tak, aby se eliminoval offset mezi DPS a maskou. K tomu slouží záměrné značky (fiduciály) umístěné na DPS i masce. U automatických strojů se tyto značky načítají pomocí kamery. U jednoduchých ručních SP se musí provést zkušební tisk, po kterém se provede korekce offsetu.

3.4.2. Hlavní nastavitelné parametry Screen printeru

Tlak stěrek - Přímou ovlivňuje množství natištěné pasty. Při nízkém tlaku zůstává na masce tenká vrstva pasty a nedochází k dokonalému vyplnění vnitřního prostoru apertury. Při příliš vysokém tlaku dochází k velkému opotřebení stěrek a vybírání pasty z apertury z důvodu deformace stěrky.

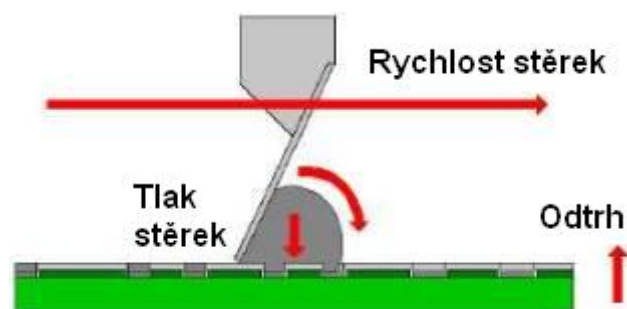
Rychlost stěrek - Při velmi vysoké rychlosti nedochází k dokonalému vyplnění vnitřního prostoru apertury. Malá rychlost naopak může způsobit zpomalení výroby.

Teplota uvnitř SP – Udává teplotu pasty a tím pádem i její viskozitu. Malá teplota způsobuje, že pasta je příliš tuhá a hrozí tak ucpávání apertur. Vysoká teplota pasty naopak může způsobit vyšší pravděpodobnost zkratů.

Odtrhová rychlost a odtrh – Pokud je odtrhová rychlost příliš vysoká, nebo naopak příliš nízká dochází na okrajích natištěné pasty k jejímu vytrhávání.

Počet stěrů – Většinou se používá pouze jeden stěr, ale pokud je kvalita tisku nízká, může se zapnout funkce dvojitého stěru. Ta má vliv především na množství natištěné pasty u malých apertur.

Cyklus čištění masky – Maska je potřeba v určitých intervalech čistit, aby nedocházelo k ucpávání apertur. Nicméně první natištěná deska po cyklu čištění dosahuje většinou nižší kvality tisku. Je proto nutné najít kompromisní hodnotu cyklu čištění.



Obr. 9: Popis sil působících při tisku

Nastavitelných parametrů SP je mnohem více, ale nemají zásadní vliv na kvalitu tisku pájecí pasty jako ty výše zmíněné.

3.4.3. Vliv materiálu a kondice stěrek na tisk

Používají se stěrky vyrobené z nerezové oceli, niklu nebo pryžové. Kovové stěrky mají tenký břit, který jim zaručuje pružnost. Pryžové stěrky se vyrábějí v několika tvrdostech, přičemž nejtvrďší se svými vlastnostmi přibližují stěrkám kovovým.

S pryžovými stěrkami se obecně dosahuje nižšího množství natištěné pasty. To je způsobeno právě nižší tvrdostí, protože se stěrky vtlačují i dovnitř prostoru apertury. Pryžové stěrky mají omezenou životnost, kdy dochází k tomu, že hrana stěrky se po přejíždění apertur zakulacuje a tím se zhoršují vlastnosti tisku.

Kovové stěrky mají podstatně vyšší životnost, ale také u nich se projevují některé vady ovlivňující tisk. Mezi nejčastější defekty stěrek patří ohnutí, což je způsobeno přitlakem stěrky k masce. Zvlnění je klasickým jevem při opotřebení, které je provázáno nerovnoměrným tiskem, na masce po průjezdu stěrky zůstává tenká vrstva pasty. Podobný vliv na tisk má i různé mechanické poškození stěrky, jako je např. ulomení nebo nalomení menší části stěrky.

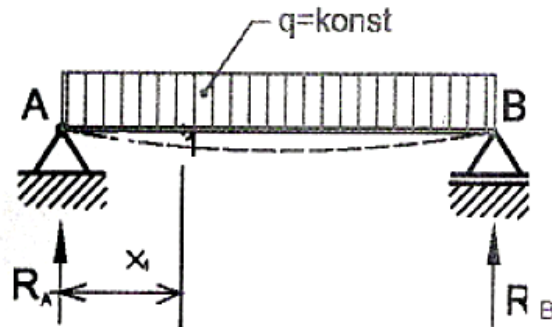


Obr. 10: Defekty kovových stěrek- ohnutá, zvlněná a popraskaná

3.4.4. Průhyb stěrky uvnitř masky působením přitlaku

U větších apertur (platí pouze pro rozměr apertury, který je rovnoběžný s hranou stěrek) dochází k jistému průhybu břitu stěrky působením přitlaku na masku. Velikost průhybu je ovlivněna velikostí apertury, modulem pružnosti materiálu břitu stěrky a tlakem působícím na stěrku. Modul pružnosti oceli je přibližně $2 \cdot 10^{11} Pa$, ale u pryže to je pouze přibližně $1,5 - 5 \cdot 10^6 Pa$. Je tedy zřejmé, že pokud použijeme pryžové stěrky pro tisk pasty, musíme počítat se jistým pronikáním materiálu stěrky do apertury a tím pádem i s určitým snížením množstvím natištěné pasty. Pro výpočet jsem použil vzorec průhybu nosníku s konstantním zatížením. Tato metoda má ale pár nedostatků a data z ní získané budou zkreslené. Prvním nedostatkem je to, že stěrka není kolmá na šablonu a tak se většina síly působící jako přitlak projeví v průhybu břitu stěrky mezi povrchem šablony a upevňovacím bodem břitu stěrky. Zadruhé nelze přesně určit příčný průřez nosníku (břitu stěrky) u pryžových stěrek, protože průhyb do apertury se pohybuje v řádu maximálně μm (u menších apertur spíše desetin či setin μm) a nejsme schopni dostatečně přesně změřit parametry hrany pryžové stěrky.

Každopádně vzhledem k velkému modulu pružnosti oceli vyšel maximální průhyb (pro šířku apertury 5mm, tlak na stěrku 5kg a příčný průřez $1mm^2$) $1,64 \cdot 10^{-8} \mu m$, což je naprosto zanedbatelná hodnota. Pro pryžovou stěrku je průhyb značně vyšší ale jak jsem již popsal výše, není možné správně určit účinný průřez materiálu. Po pryžové stěrky je doporučovaná hodnota přitlaku přibližně poloviční oproti stěrkám ocelovým, kvůli menšímu průhybu a opotřebování hrany stěrky.



Obr. 11: Ohybová čára pro konstantní zatížení nosníku (stěrky) [6]

$$x_{2max} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3)$$

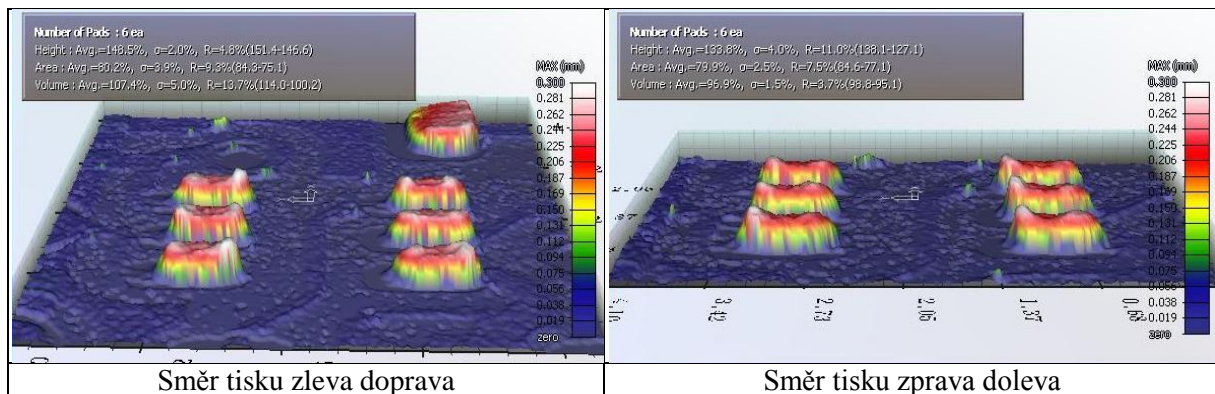
F – síla působící na šířce apertury

l – šířka apertury

E – modul pružnosti v tahu

I – příčný průřez nosníku

3.4.5. Vliv směru stěru pasty



Obr. 12: Porovnání tvaru natištěné pasty v závislosti na směru pohybu stěrek

Na obrázcích je možno pozorovat vliv směru posunu stěrek při tisku pasty. Jedná se plošky pro součástku s pouzdem SOP6. Směr pohybu stěrek přímo ovlivňuje tvar natištěné pasty a to především špiček vytažených směrem nahoru. Tento jev lze minimalizovat vhodným nastavením rychlosti odtrhu masky, ale není jím primárně způsoben. Pravděpodobná příčina vzniku je, že při pohybu stěrky se pasta odvaluje příliš rychle a za hranou apertury se pasta nedokonalě protlačí do celého objemu apertury. Tím dojde na jedné straně k jistému snížení výšky pasty oproti průměrné výšce. Je-li tato teorie správná, bude mít na tento jev velký vliv i rychlost stěrek při tisku. Se zvyšující se rychlostí se rozdíl výšky obou konců bude dále zvyšovat.

3.5. JET Printing

JET printing je označení technologie speciálních tiskáren pasty. Při nanášení pasty se nevyužívá šablona, ale pasta se dávkuje přes trysky dispenzeru. Samotná pasta je uložena v cartridge. Tato technologie umožňuje velmi rychlé změny výroby, kdy se nemusí čistit šablona od pasty a roztěkávat masku novou, ale stačí pouze změnit program. Lze říci, že pro výroby se středním objemem výroby ale s různorodou skladbou vyráběných produktů je toto řešení ideální. [7]

Výhody:

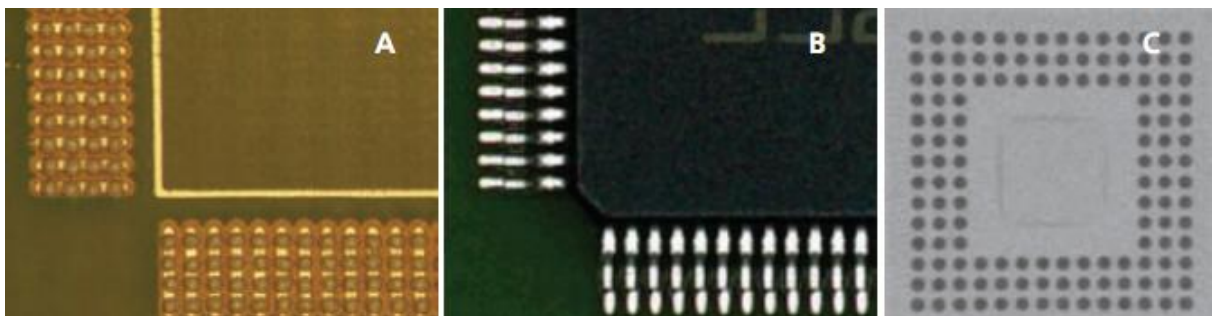
- Rychlá změna mezi modely
- Není potřebná šablona (odpadá skladování, čištění a možnost poškození masky)
- Velmi krátká doba pro vytvoření programu v řádu minut (výroba a doprava nové šablony je minimálně den)
- Možnost nastavit množství pasty a offset pro každou plošku zvlášť
- Možnost nanesení správného množství pro rozdílné součástky bez použití kompromisních řešení jako např. stepped stencil
- Možnost nanášet jedním strojem lepidlo i pastu

Nevýhody:

- Malá kapacita linky při výrobě složitějších DPS s velkým počtem součástek
- Pasta nanášena v tečkách (možný problém s dokonalým pokrytím pastou u IC)
- Většinou nutnost použití jiných past vhodných pro dispenzní tisk



Obr. 13: Princip nanášení pasty dispenzerem – na obrázku je vidět rozdílné nastavení množství nanášené pasty pro jednotlivé součástky [7]



Obr. 14: A – nanesená pasta pro QFP, B – vzhled pájeného spoje po přetavení, C – rentgenový snímek pouzdra BGA [7]

4. Inspekce natištěné pasty

Měření množství pasty na pájecích ploškách laminátu je velmi důležité pro sledování a vyhodnocování procesu tisku pájecí pasty. Nepoužívá se pouze pro vyhodnocování kvality tisku jednotlivých desek, ale také jako vhodný pomocný nástroj pro nastavení parametrů tisku a především pro dlouhodobou analýzu pomocí některého z nástrojů SPC analýzy.

4.1. Metody inspekce

4.1.1. 2D Inspekce

2D inspekce využívají ke snímání množství natištěné pasty jedné kamery. Při tvorbě programu je nutné nejdříve definovat pozice a rozměry kontrolovaných ploch (padů). Vlastní scan probíhá tak, že se pomocí kamery nasnímá oblast s natištěnou pastou a podle odstínu (pasta je tmavší než měděné, případně pocínované plošky) se vyhodnotí poměr plochy s natištěnou pastou a předem definovanou plochou padu.

Vlastnosti 2D inspekce pasty

- + je součástí moderních screen printerů (většinou jako přídatné příslušenství)
- pokud je součástí SP může se prodloužit dobou vyhodnocování i celkový cycle time výrobní linky
- pouze 2D (nevyhodnocuje se výška a objem natištěné pasty)
- offset lze odhalit pouze ze sníženého množství pasty
- zkratky není možné odhalit běžnými metodami 2D snímání

4.1.2. 3D Inspekce

Metody 3D snímání povrchu se často liší podle výrobce (kvůli patentům). Vyhodnocovat lze například obraz z více kamer, odlesky pomocí jedné kamery a několika různobarevnými světelnými zdroji, nebo pomocí laseru (to je případ i SPI PARMi, kterou použijí pro vyhodnocování pomocí SPC a budu se věnovat podrobnému popisu principu dále v textu).

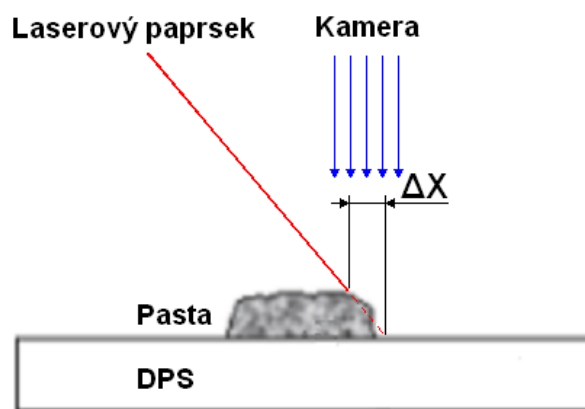
- + vyhodnocování výšky, plochy, objemu
- + při 3D pohledu lze odhalit defekty tvaru natištěné pasty (vytrhávání, vybrání, zkratky, offset...)
- + jelikož jsou v naprosté většině ve formě samostatného stroje, nezpomaluje se cycle time SP a případně i celé výrobní linky
- cena je vyšší než u přídatných modulů 2D inspekce

4.2.3D SPI PARMÍ

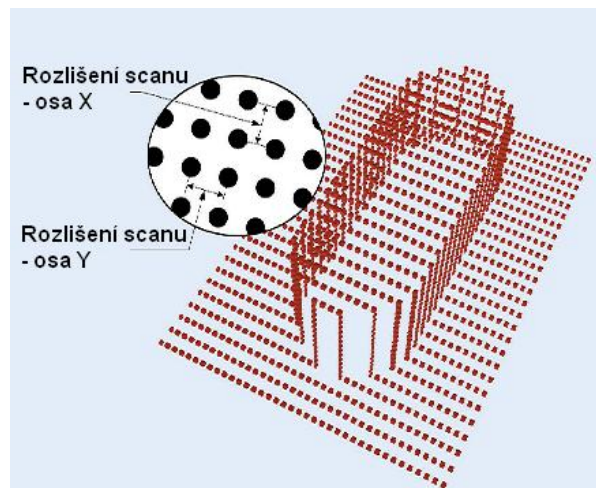
4.2.1. Princip snímání

3D SPI společnosti PARMÍ používá triangulační techniky scanování povrchu s pomocí laseru a kamery. Přesnost metody není závislá na druhu pasty a barvě laminátu. Výrobce udává hodnota opakovatelnosti je mnohem nižší než 10 → přístroj podává velmi stabilní výsledky měření, takže jej lze použít pro vyhodnocování procesu tisku.

Laserový paprsek je zaměřen pod sklonem přibližně 60° směrem k laminátu. Kamera, která je namířena kolmo k DPS, snímá pozici bodu laserového paprsku na povrchu scanované plochy. Laserový paprsek se pohybuje po řádcích (šířka scanované oblasti je 24mm), které jsou od sebe vzdáleny 20 μm. Na jednom řádku se každých 18μm změní jeden vzorek (poloha paprsku v ose X). Ze změřených ΔX (viz. obrázek) lze pomocí goniometrických funkcí vypočítat výšku změřeného objektu.



Obr. 15: Princip měření výšky povrchu



Obr. 16: Princip vzorkování výšky povrchu [2]

Ze změřené výšky všech vzorků lze vypočítat objem natištěné pasty. Plocha je počítána pouze ze vzorků, pro které je vypočítána určitá minimální výška, která lze nastavit v prostředí obslužného programu.

Tvorba programu pro inspekci je jednoduchá a trvá přibližně 10-15 minut. Nejdříve je potřeba připravit gerber data ve formátu GBX. S tímto formátem pracuje program dodávaný k 3D SPI, který z dat získá rozměry a pozici apertur a fiduciálů. Tento vytvořený program se nakopíruje do SPI a po zadání vlastností jako jsou tloušťka masky, minim a maxim

sledovaných parametrů (výška, plocha, objem, offset) a nastavení fiduciálů je připraven pro inspekci DPS.

Pokud jsou DPS značně prohnuté (příčinou může být průjezd pecí, nebo nevhodné skladování – FR2 jsou obecně mnohem náchylnější na prohnutí než FR4) dochází k nepřesnostem měření. V tomto případě lze využít funkci prescan kdy se naskenuje holý laminát před produkcí a určí se jako vzor pro následující DPS.

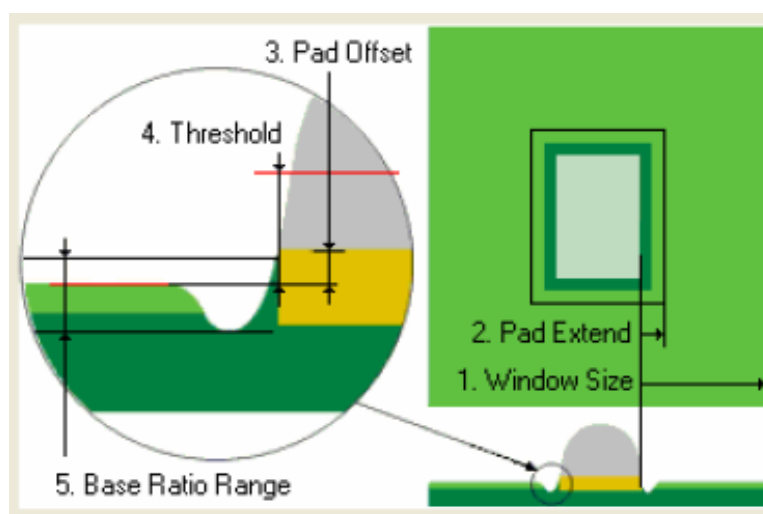
4.2.2. Hlavní parametry SPI PARMi

Tab. 5: Popis hlavních parametrů scanování 3D SPI Parmí [2]

Maximální prohnutí panelu	3 mm (standard)
	10 mm (s použitím prescanu)
Rozlišení scanování – osa Y	18 μ m
osa X	20 μ m
Rychlost scanování	30cm ² /sec (standard)
	60cm ² /sec (High Speed)
	120cm ² /sec (Prescan)
Šířka jednoho průjezdu scanování	24mm
Opakovatelnost měření – výška	$\pm 1,5\mu$ m (3 σ)

Nastavení inspekčních parametrů

SPI HS60 umožňuje uživateli změnit nastavení detailů inspekčního algoritmu. Každý popsaný parametr může být v jistém rozsahu měněn v teaching modu. Parametry nelze měnit v inspekčním modu a bez práv pro úpravu nastavení.



Obr. 17: Základní parametry inspekčního algoritmu [2]

Window size – Rozšíření plochy ve které se ještě získávají data ze scanování (výchozí hodnota 1000 μ m).

Pad expand - Nastavené pole pro vyhodnocení plošky (výchozí hodnota 100 μ m).

Pad offset – Rozdíl výšky plošky oproti výšce rezistu (výchozí hodnota 0 μ m).

Threshold value – Minimální výška která se ještě zaznamená (výchozí hodnota 50 μ m).

Base Ratio – Poměr, který nastavuje základní hladinu získanou z inspekčního okna (výchozí poměr 0,67).

Minimal guaranteed amplitude

Rozhoduje o minimální hladině, která bude ještě zaznamenána. Je-li výsledek nižší, zapíše se výsledek jako 0.

Mask Setting

Zde se nastavuje tloušťka použité masky.

4.2.3. Vyhodnocení GR&R – „Gauge Repeatability and Reproducibility“

Slouží k ověření opakovatelnosti měření měřicího zařízení dané veličiny, tzn. schopnost měřit opakovaně se stabilní přesností. Tato vlastnost měřících zařízení je nutná pro řízení jakéhokoliv procesu.

Ověření probíhá na předem určeném počtu výrobků, které opakovaně měřícím přístrojem testujeme (v našem případě 3D SPI). Obecně se používá metoda tří měření pro tři různé operátory. Jelikož je SPI automatický stroj a tak není výsledek ovlivněn člověkem, provedl jsem tři série po třech opakováních, přičemž mezi sériemi jsem měřenou desku vyjmul a znovu vložil.

Definice použitých termínů

Opakovatelnost (Repeatability) je variabilita výsledků měření vyprodukovaná jedním měřícím přístrojem, použitým opakovaně jedním hodnotitelem měřícím jednu identickou charakteristiku na stejném výrobku.

Reprodukovatelnost (Reproducibility) je variabilita v průměrech měření provedených různými hodnotiteli za pomoci stejného měřicího přístroje pro měření stejné charakteristiky na stejném výrobku.

E.V. - Odchylka stroje

A.V. - Odchylka vyhodnocení

Obecné směrnice pro vyhodnocení R&R%

$$R\&R\% = \sqrt{\%EV^2 + \%AV^2} \quad (4)$$

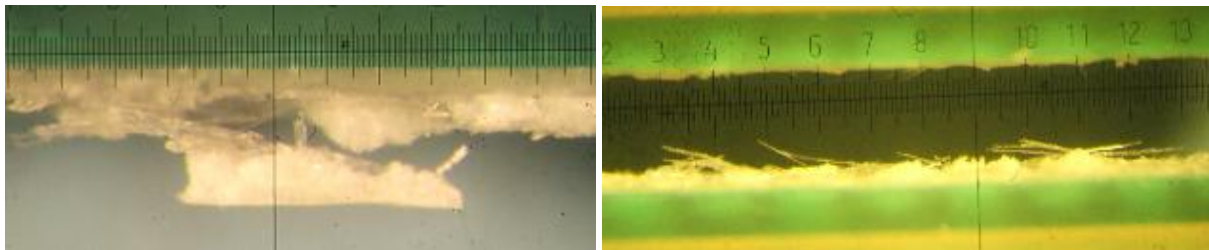
R&R% < 10% - systém měření je přípustný vzhledem k procesu resp. tolerančnímu rozpětí.

10% < R&R% < 30% - systém měření je podmíněně přípustný vzhledem k procesu resp. tolerančnímu rozpětí, závisí na poměru ceny nápravy a významnosti sledované veličiny.

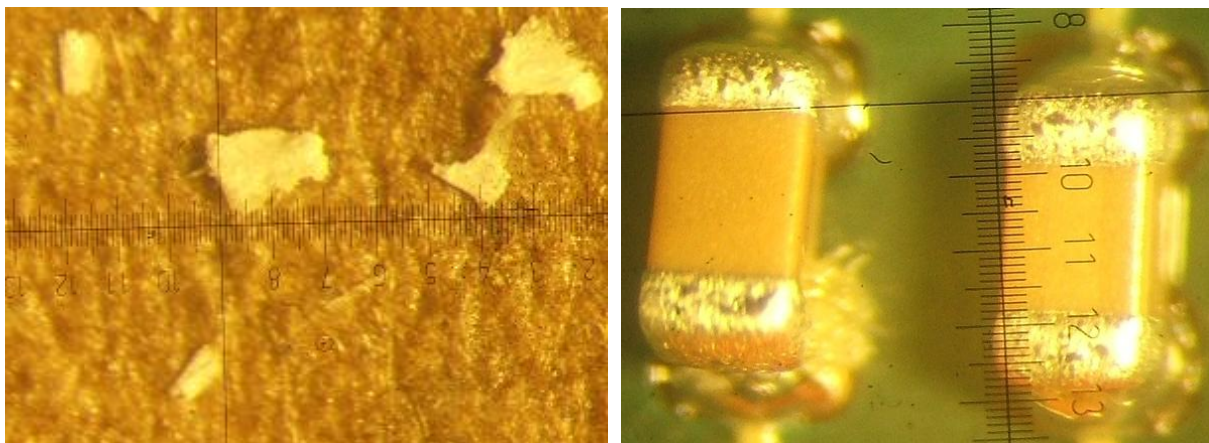
R&R% > 30% - systém měření není přípustný vzhledem k procesu resp. tolerančnímu rozpětí.

4.3. Detekce nečistot pomocí 3D SPI

Při zhotovení vnitřních i vnějších hran DPS se při masových výrobách často používají slisované lamináty, které jsou levnější oproti frézovaným kvůli kratším časům opracování, ale jako podstatná nevýhoda se ukazuje, že na okrajích řezů jsou nerovné hrany plné kousků vláken laminátu. Ty se mohou v průběhu výroby sestavy uvolnit a mohou tak způsobit zacpání otvoru v šabloně, nebo mohou negativně ovlivnit tvar a vlastnosti pájeného spoje. Dalším druhem defektu, který tyto nečistoty mohou způsobit, je nadzdvihnutí součástky pokud by se dostala nečistota na povrch laminátu před osazením součástky. Aby se předcházelo těmto defektům, holé lamináty se po před tiskem pájecí pasty čistí od částíček. Ať už je ale metoda čištění jakákoliv (kartáčky, polo-lepící kotoučky...), výsledky nejsou nikdy 100%. Na obrázcích níže je měřítko cca 25 dílků/mm.



Obr. 18: Příklad částic po vyřezávání obrysů DPS, které mohou po uvolnění způsobit defekt pájení



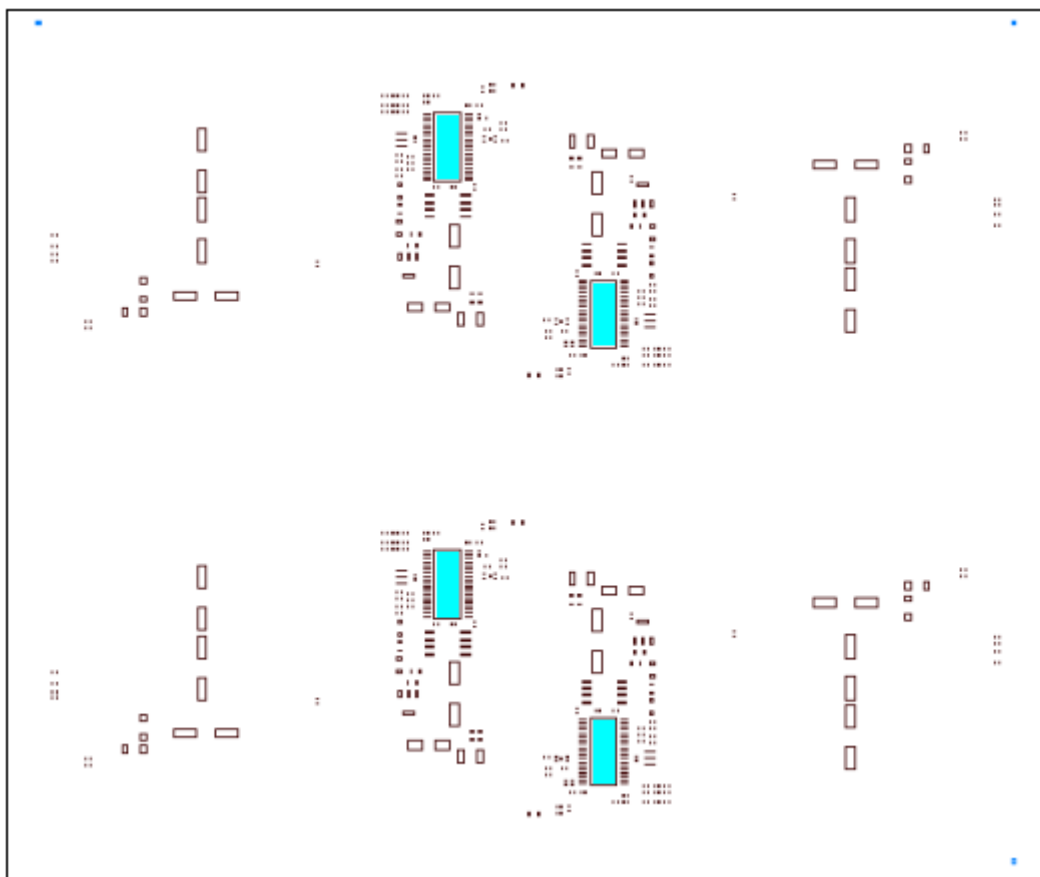
Obr. 19: vlevo – uvolněné částičky laminátu, vpravo – nadzvednutý čip vlivem části laminátu

Zamyslel jsem se tedy, jakým způsobem by se dala využít 3D SPI pro detekci právě takových nečistot. Standardně 3D inspekce vyhodnocuje pouze plošky s natištěnou pastou, které si nadefinujeme (z gerber dat laminátu) v programu GerberWorks. Mezi těmito ploškami se vyhodnocují při skenování laminátu i zkratky. Takže pokud by se některá nečistota dostala mezi plošky (a splnila by nastavené minimální rozměry), měla by být detekována jako chyba „solder bridge“ (můstek mezi pájecí pastou). Pro lepší detekci nečistot je lepší snížit výchozí hodnoty nastavení pro detekci zkratů následovně.

	Původní hodnota	Hodnota po úpravě
Šířka můstku	80 μm	60 μm
Výška můstku	60 μm	50 μm

Tato metoda však nedokáže odhalit částečky, které by mohly nadzvednout pouzdro součástek a způsobit tak nezapájení některého z jejich vývodů. Takové nečistoty by šlo detekovat pomocí skenovaných oblastí pod pouzdra velkých součástek. Bohužel možnost přidávání ploch a jejich úprava není možná v mou používané verzi GerberWorks. Využil jsem proto dřívějších zkušeností při úpravě dat pro tvorbu programu a přidal skenované plochy v textovém editoru. Později mě napadla i jiná možnost přidání ploch. V jakémkoliv editoru gerber dat lze přidat pady na požadovaná místa a uložit soubor nejlépe s příponou GBX. Poté v programu GerberWorks pouze vytvořit program pro SPI s takto upravenými daty.

Nečistoty lze v takovém případě detekovat jako překročení maximální nastavené výšky. Jelikož je 3D SPI uzpůsobena pro měření natištěné pasty a s detekcí nečistot se nepočítá, narazil jsem na několik překážek při ladění programu, které jsem však dokázal obejít. Nečistoty, které mohou nebezpečně zvednout pouzdro součástky, mají v průměru okolo 50 μm . Ale minimální hodnota výšky, která lze nastavit jako limit je 110% tloušťky masky. Vzhledem k tomu, že používáme masky především o tloušťce 150 μm , což by odpovídalo detekovatelné výšce nečistot 165 μm . Musel jsem tedy využít možnosti změnit nastavení tloušťky masky pro jednotlivé plošky. Změnil jsem tedy tloušťku masky pro plošky pro detekci nečistot na 40 μm .



Obr. 20: Detekční plošky nečistot (vyplněny modrou barvou), které jsou umístěny pod IC s pouzdem SOIC.

5. SPC

5.1. Definice statistických parametrů

μ - aritmetický průměr. Často označován jako \bar{X} s pruhem.

σ - směrodatná odchylka

dpmo (defects per million opportunities) - počet defektů na milion příležitostí ke vzniku vady.

LSL (Lower specification limit) – Dolní toleranční mez. Minimální množství pasty nutné pro vytvoření dostatečně robustního pájeného spoje + dostatečná rezerva.

USL (Upper specification limit) – Horní toleranční mez. Maximální množství pasty, při kterém se nevyskytují zkratky, případně jiné defekty.

LCL (Lower counted limit) – Dolní vypočítaný limit parametru. Jeho hodnota je dána aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou (4) měřené veličiny v procesu.

$$LCL = \mu - 3\sigma \quad (5)$$

UCL (Upper counted limit) – Horní vypočítaný limit parametru. Jeho hodnota je dána aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou (5) měřené veličiny v procesu.

$$UCL = \mu + 3\sigma \quad (6)$$

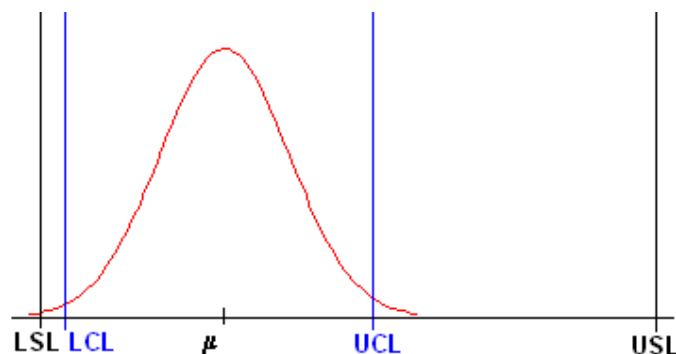
C_p (Capability index) – Index způsobilosti procesu není závislý na aritmetickém průměru měřených hodnot.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (7)$$

C_{pk} – Oproti C_p je závislý na pozici aritmetického průměru oproti LSL a USL. Pokud je aritmetický průměr přesně uprostřed mezi hodnotami LSL a USL má C_{pk} a C_p stejnou hodnotu.

$$C_{pk} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (8)$$

$$C_{pk} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (9)$$



Obr. 21: Gaussovo rozložení s vyznačenými parametry procesu [9]

Tab. 6: Hodnocení procesu podle indexu C_{PK}

Hodnota indexu C_{PK}	Hodnocení procesu	Poznámka
$C_{PK} > 1,33$	Velmi vyhovující	Výborná způsobilost procesu
$1 < C_{PK} < 1,33$	Vyhovující	Pokud je potřeba, zaveď nápravná opatření
$0,67 < C_{PK} < 1$	Nevyhovující	Pracovní postupy potřebují změnit
$C_{PK} < 0,67$	Zcela nevhovující	-

5.2. Metody vyhodnocování tisku pomocí SPC

Důležité parametry natištěné pasty, které jsou snadno sledovatelné (měřitelné) a vyhodnotitelné pomocí 3D inspekce jsou:

- výška
- plocha
- objem
- offset

Z těchto hodnot lze pomocí jednoduchého výpočtu získat aritmetický průměr a směrodatnou odchylku pro každý z měřených údajů. Pokud bychom chtěli sledovat vyhodnocovat proces tisku pomocí parametrů C_p a C_{pk} , je nutné specifikovat také hodnoty LSL (Lower specification limit) a USL (Upper specification limit).

Pro vyhodnocování a regulaci měřené veličiny se používají takzvané regulační diagramy, které zobrazují časovou závislost veličiny. K regulačnímu zásahu dojde v době kdy je z grafů patrné, že se porušily některé z nastavených pravidel.

Regulační diagram je základní grafický nástroj statistické regulace procesu, který umožňuje posoudit statistickou zvládnutost procesu. Statisticky zvládnutý proces je takový proces, který ovlivňují pouze náhodné příčiny variability. Statistická regulace představuje preventivní přístup k řízení jakosti. Každý regulační diagram se liší podle způsobu použití.

Regulační diagramy srovnáním (statistická regulace procesu srovnáním):

pro počty neshodných jednotek:

RD (p) – podíl neshodných jednotek ve skupině,

RD (n, p) – počet neshodných jednotek v podskupině,

pro počty neshod:

RD (c) – počet neshod v podskupině,

RD (u) – podíl neshod v podskupině,

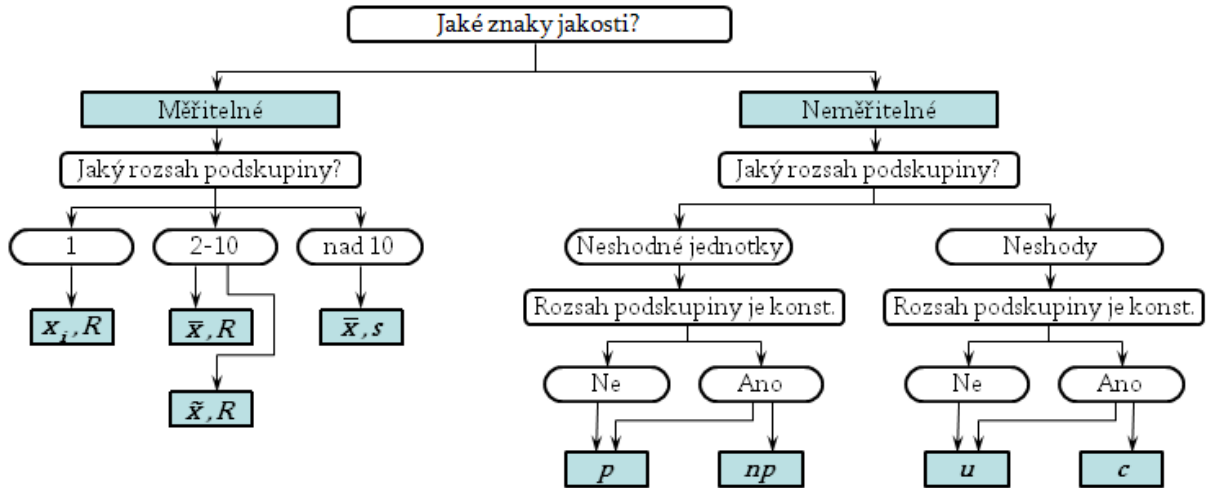
Regulační diagramy měřením (statistická regulace procesu měřením):

RD (x, R) – pro střední hodnotu a variační rozpětí,

RD (x, s) – pro střední hodnotu a směrodatnou odchylku,

RD (x_i , R_i) – pro jednotlivé hodnoty a klouzavé rozpětí,

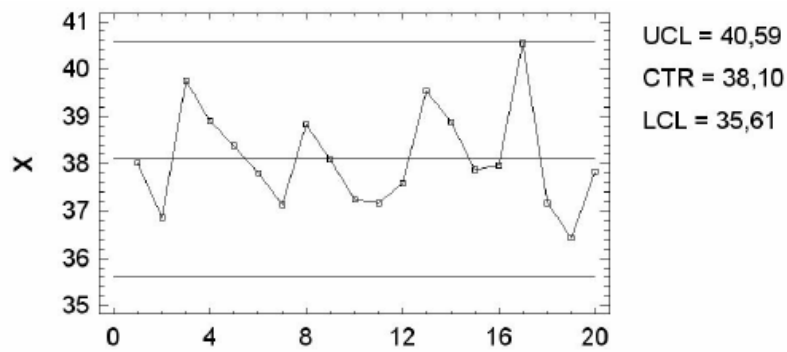
RD (x, R_v) – pro medián a variační rozpětí,



Obr. 22: Strom Regulačních diagramů

Regulační diagram X

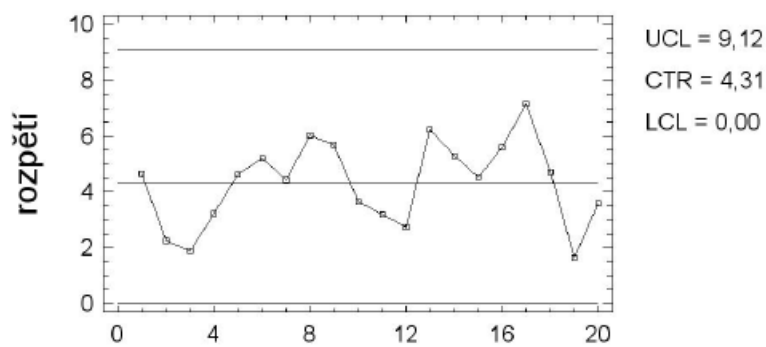
Zobrazuje závislost absolutní hodnoty měřené veličiny na pořadí měřeného vzorku.



Obr. 23: Diagram X [9]

Regulační diagram R

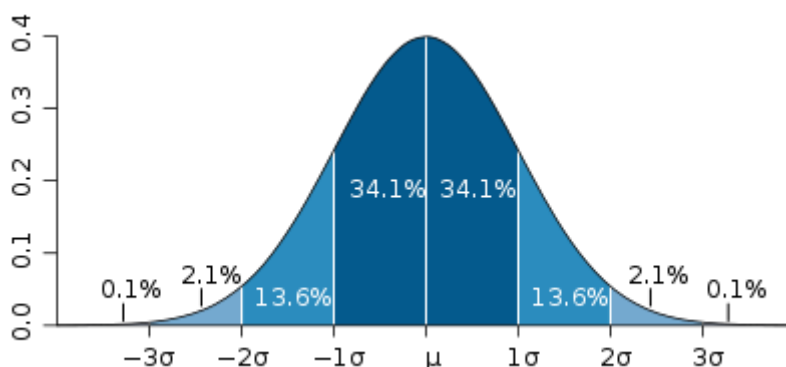
Zobrazuje závislost rozptylu měřené veličiny na pořadí měřeného vzorku.



Obr. 24: Diagram R [9]

5.4. Normální (Gaussovo) rozdělení x Histogram

Normální rozdělení popisuje jedno z náhodných možných rozdělení spojitých veličin. Rozložení je definováno pouze střední hodnotou normálního rozdělení (μ) a směrodatnou odchylkou (σ). Jelikož je rozdělení symetrické na obě strany rovná se hodnota mediánu hodnotě střední hodnoty.



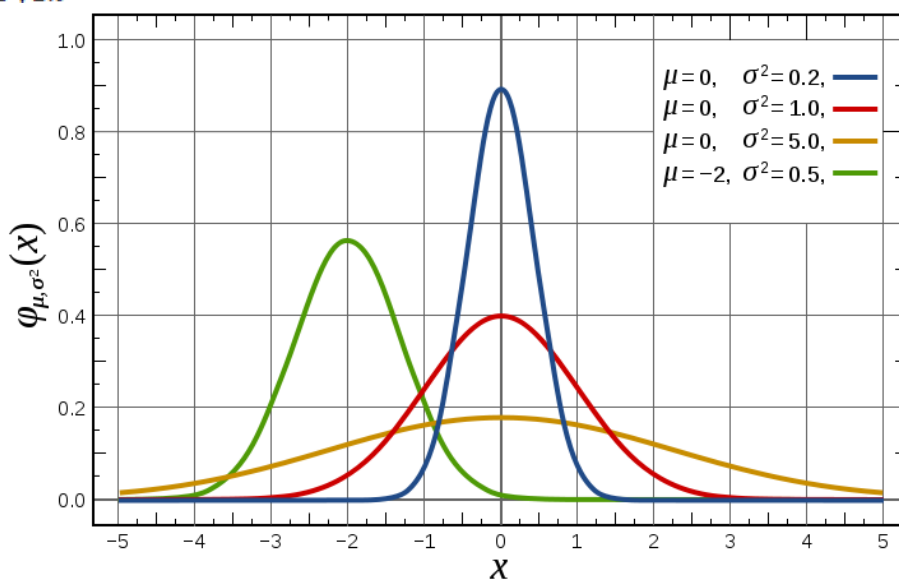
Obr. 25: Normální rozdělení [8]

Ve vzdálenosti $<1\sigma$ od střední hodnoty se nachází 68,2% všech hodnot. Ve vzdálenosti 2σ se již nachází 95,5% hodnot a pro 3σ již platí 99,73%. Jsou-li tedy specifičtí limity výrobku ve vzdálenosti 3σ , tedy za touto hranicí se vyskytují defekty, je chybovost výrobku cca 0,27%.

Pro vyhodnocování kvality výroby se často využívá označení DPMO – defects per milion oportunities (v našem případě můžeme počítat i s DPMJ – defects per milion joints). V ALPS electric je počítáno DPMO na počet všech součástek. Některé firmy udávají DPMO jako DPMJ a tedy jsou výsledky neporovnatelné (2-4 nižší než při výpočtu s počtem součástek).

Funkce normálního rozdělení

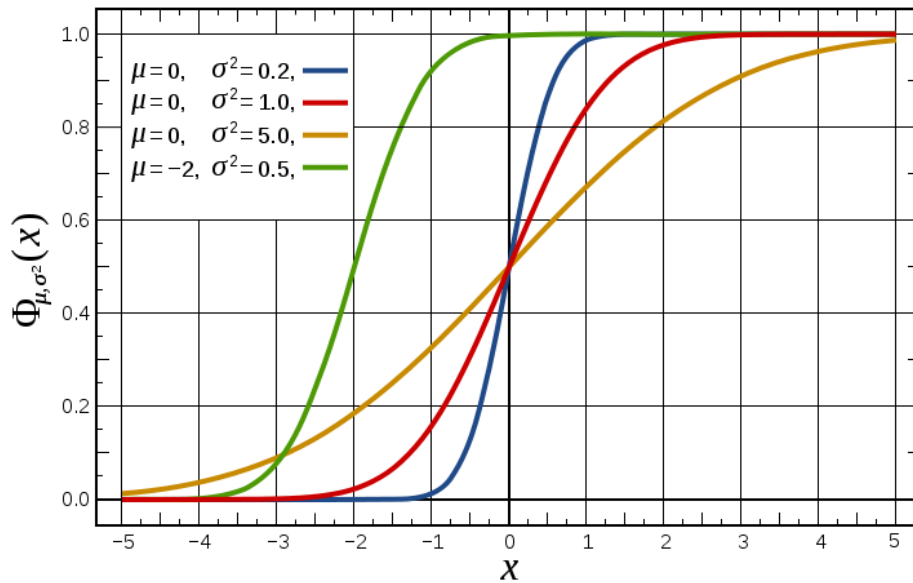
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$



Obr. 26: Závislost tvaru normálního rozdělení na parametrech μ a σ [8]

Distribuční funkce normálního rozdělení

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (11)$$



Obr. 27: Závislost tvaru distribuční funkce normálního rozdělení na parametrech μ a σ [8]

Tab. 7: DPMO (PPM) a přepočet mezi sigma a C_{PK}

CPK	sigma	DPMO
0,111	0,33	738 883
0,222	0,67	504 985
0,333	1,00	317 311
0,444	1,33	182 422
0,556	1,67	95 581
0,667	2,00	45 500
0,778	2,33	19 631
0,889	2,67	7 661
1,000	3,00	2 700
1,111	3,33	858
1,222	3,67	246
1,333	4,00	63
1,444	4,33	15
1,556	4,67	3,061
1,667	5,00	0,573
1,778	5,33	0,096
1,889	5,67	0,015
2,000	6,00	0,002



Obr. 28: Závislost DPMO na sigma

Při vyhodnocování tisku pasty se využívá právě normálového rozložení. Při hlubší analýze jsem však zjistil, že počet hodnot, které leží mimo nastavené limity je více, než by odpovídalo teoreticky vypočteným hodnotám. Rozhodl jsem se tedy prozkoumat reálné rozložení hodnot pomocí histogramu pro lepší pochopení principů. Získané vědomosti lze poté využít pro efektivní nastavení limitů. Analýzu histogramů jsem provedl

6. Plánování (návrh) experimentů - Design of experiments (DOE)

V případě, že chceme otestovat vlivy více faktorů na vlastnosti, případně jakost výsledného produktu formou experimentování zjistíme, že pokud bychom provedli testy všech možností, dojdeme k velkému počtu experimentů (testů), které tak budou nejen náročné časově, ale často materiálově a tím pádem i cenově. Z tohoto důvodu se používají zjednodušující metody, které mají za úkol snížit počet zkoušek na minimum při současném zlepšení vyhodnocování výsledků, které pak můžeme použít při optimalizaci procesu výroby a tím pozitivně ovlivnit kvalitu (jakost) produktu.

Jakost z pohledu zákazníka

Vyšší jakost znamená menší poruchovost a vyšší životnost produktu. Výsledkem je spokojenost zákazníka a zvýšení prestiže výrobce.

Jakost z pohledu výrobce

Vyšší jakost znamená menší množství opravitelných i neopravitelných kusů, které zmenší prostoje (není nutno řešit problémy s kvalitou). Klesnou náklady na výrobu a budou vyšší zisky.

Obecně platí, že každé 1% neshodných kusů znamená o 4% zvýšené výrobní náklady, proto mezi kvalitou a náklady je nepřímá úměra, což odporuje obecně zažitým představám.

6.1. Základní pojmy DOE

Charakteristika jakosti (Y) – je to veličina, pomocí které vyjadřujeme určité vlastnosti produktu, nebo procesu. Je to hodnota měřené veličiny daného experimentu.

Faktor, parametr (A...) – nezávislá návrhová proměnná, která ovlivňuje charakteristiku jakosti. Faktory se označují velkými tiskacími písmeny a jejich úroveň se označuje dolním indexem.

Úroveň faktoru – udává nastavenou hodnotu faktoru

6.2. Návrh a vyhodnocování experimentů

K návrhu jednotlivých experimentů se používají Taguchiho ortogonální soustavy.

Tab. 8: Nejmenší ortogonální soustava L-4

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

Ve sloupcích tabulky jsou zaznamenány jednotlivé parametry, v řádcích pořadí experimentů a v poli tabulky jsou zapsány úrovně faktorů v jednotlivých experimentech.

Výpočet průměrného účinku faktoru provádíme tak, že sečteme všechny výsledky experimentů, které obsahují daný faktor na dané úrovni, a podělíme počtem takovýchto experimentů. Počítáme pro všechny faktory všech úrovní.

Příklad výpočtu pro tabulku L-4:

$$A_1 = (Y_1 + Y_2)/2 \quad (12)$$

$$A_2 = (Y_3 + Y_4)/2 \quad (13)$$

Úroveň faktoru s nejlepším výsledkem pak odpovídá optimálnímu nastavení procesu. Jelikož je počet experimentů menší než je počet kombinací všech faktorů na všech úrovních, často se stává, že žádný z provedených experimentů neodpovídá ideálnímu nastavení procesu. Předem již ale můžeme výpočtem odhadnout, jakých výsledků můžeme dosáhnout s optimálním nastavením procesu. Nejdříve je potřeba určit průměrnou hodnotu výsledků označovanou T . Vzorec opět platí pro L-4.

$$T = (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)/4 \quad (14)$$

Pomocí této hodnoty můžeme určit optimální výsledek podle následujícího vzorce. Parametry s indexem OPT mají úroveň s nejlepším dosaženým výsledkem.

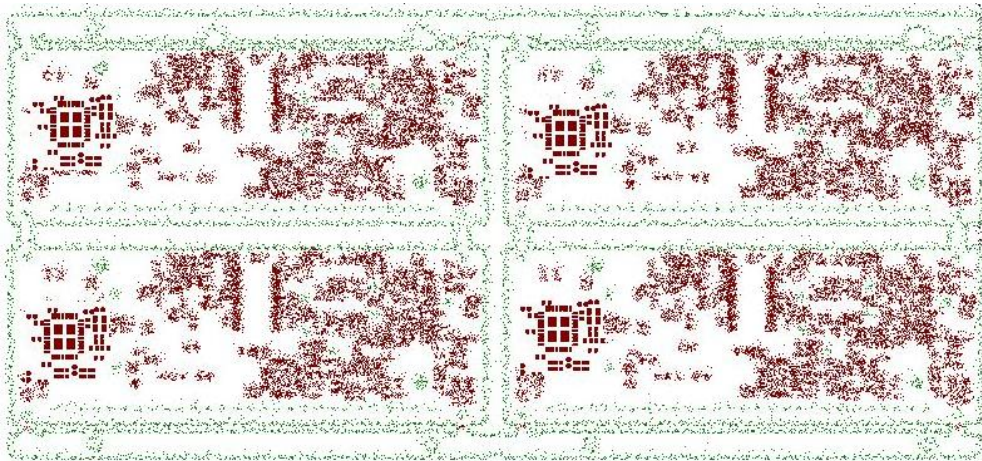
$$Y_{OPT} = T + (A_{OPT} - T) + (B_{OPT} - T) + (C_{OPT} - T) \quad (15)$$

7. Výsledky Měření

7.1.GR&R SPI PARMi

Parametry a podmínky při testování:

Materiál laminát: FR4
Rozměry laminátu: 138 mm x 64 mm x 0,8 mm
Podpora DPS: pole podpůrných pinů
Použitá pasta: SAC 305, velikost zrn 22-38 μm
Použitý SP: DEK Horizon
Použitá SPI: PARMi HS60
Odrhová vzdálenost: 2mm
Cyklus čištění masky: 8
Maska: 130 μm , Laser cut



Obr. 29: Celkový pohled na měřenou DPS

Parametry měřených apertur

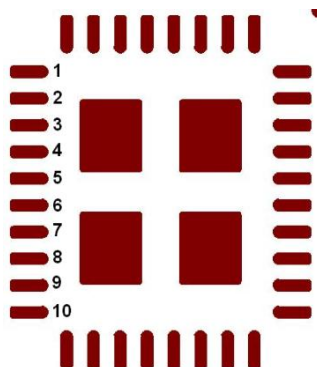
Sledované apertury jsou určeny pro QFN s roztečí 0,5mm a jejich rozměry jsou 220 μm x 900 μm .

Nastavené limity inspekce pasty

Výška: 50-160%

Plocha: 50-160%

Objem: 50-160%



Obr. 30: Číslování měřených apertur

Vyhodnocení GR&R

Tab. 9: Vyhodnocení GR&R

Číslo pinu	Měření proměnná	jednotka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			1. vyhodnocení (A)				2. vyhodnocení (B)				3. vyhodnocení (C)			
			1. SCA N	2. SCA N	3. SCA N	ROZP TYL	1. SCA N	2. SCA N	3. SCA N	ROZP TYL	1. SCA N	2. SCA N	3. SCA N	ROZP TYL
1	výška	%	120,5	120,0	120,8	0,8	121,8	124,2	121,4	2,8	121,1	122,0	121,8	0,9
2	výška	%	126,7	127,6	128,2	1,5	128,2	126,6	127,1	1,6	128,0	127,5	127,7	0,5
3	výška	%	119,6	116,7	118,1	2,9	116,7	116,9	117,6	0,9	117,9	116,7	117,2	1,2
4	výška	%	124,1	123,6	123,8	0,5	123,6	124,2	123,5	0,7	124,2	123,7	123,5	0,7
5	výška	%	129,8	129,2	128,4	1,4	128,3	128,3	128,4	0,1	128,7	128,5	128,4	0,3
6	výška	%	126,0	125,8	127,0	1,2	125,8	125,8	125,8	0,0	125,8	125,9	125,8	0,1
7	výška	%	118,7	117,2	117,2	1,5	117,2	117,2	117,2	0,0	117,5	120,0	119,0	2,5
8	výška	%	118,9	118,6	118,1	0,8	119,4	118,2	118,1	1,3	118,1	118,1	119,3	1,2
9	výška	%	110,3	110,3	113,2	2,9	110,3	111,5	110,3	1,2	110,5	110,4	110,3	0,2
10	výška	%	130,6	132,1	131,9	1,5	129,8	129,7	130,2	0,5	129,5	129,5	131,1	1,6
TOTAL			1225,2	1221,1	1226,7	15,0	1221,1	1222,6	1219,6	9,1	1221,3	1222,3	1224,1	9,2
				1225,2				1221,1				1221,3		
				1226,7				1219,6				1224,1		
			Sum:	3673,0	RA	1,500	Sum:	3663,3	RB	0,910	Sum:	3667,7	RC	0,920
			XA	122,4			XB	122,1			XC	122,3		

počet scanů na vyhodnocení	A ₂	D ₃	D ₄
2	1,880	0	3,267
3	1,023	0	2,575
4	0,729	0	2,282
5	0,577	0	2,115
6	0,483	0	2,004
⋮	⋮	⋮	⋮

RA	1,500	XA	122,433	Max. X	122,433
RB	0,910	XB	122,110	Min. X	122,110
RC	0,920	XC	122,257	X Diff.	0,323
Sum	3,330	Sum	366,800		
R	1,110	X	122,267	σ	5,882

Kontrolní limity - Rozptyl :

$$UCL_R = R \times D_4 = 2,858$$

$$LCL_R = R \times D_3 = 0,000$$

Kontrolní limity - Výška :

$$UCL_x = X + 3\sigma = 139,914$$

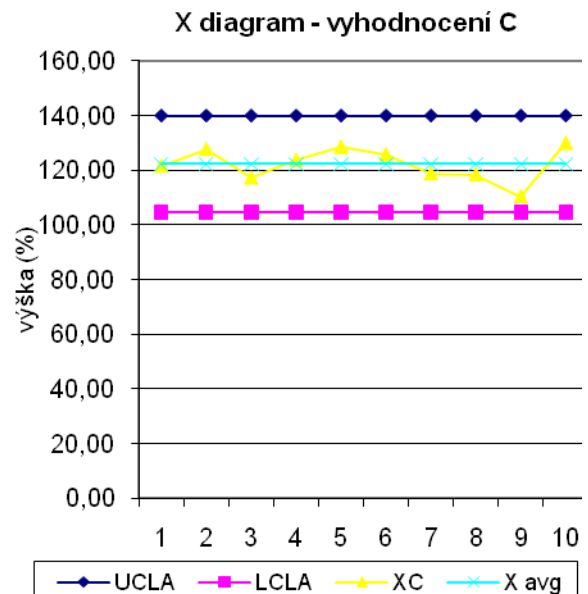
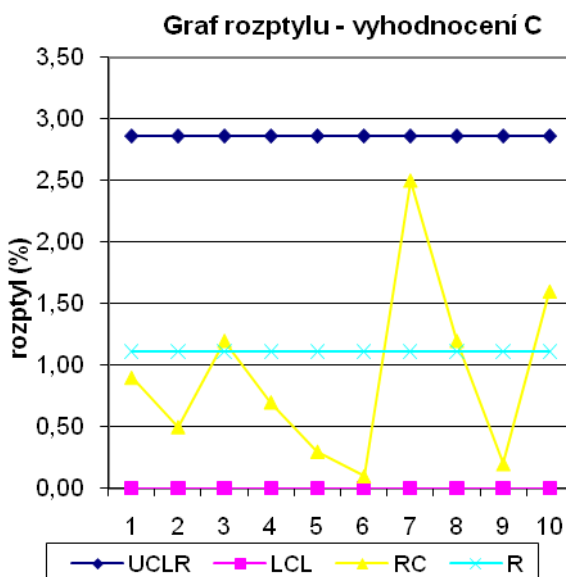
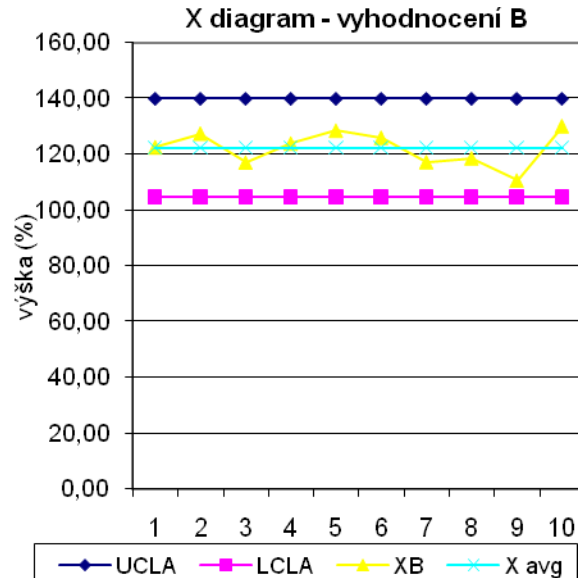
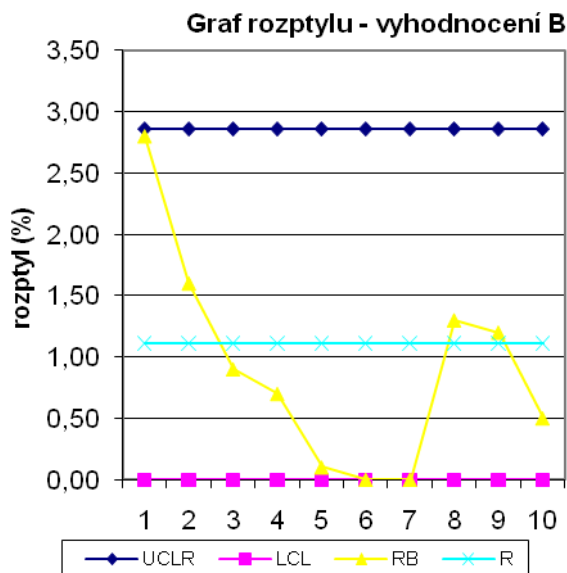
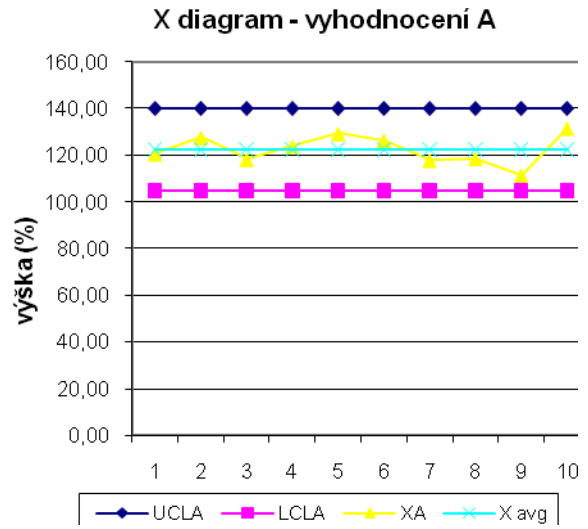
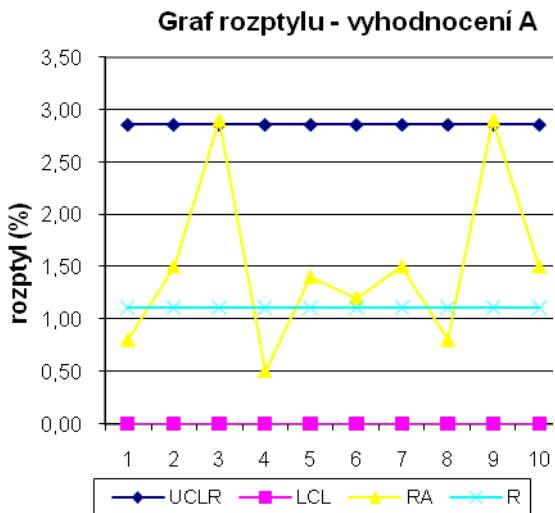
$$USL = 160,000$$

$$LCL_x = X - 3\sigma = 104,619$$

$$LSL = 50,000$$

$$CPK = (USL - X) / 3\sigma = 2,138$$

Grafické závislosti naměřené výšky a rozptylu



Tab. 10: Vyhodnocení GR&R

GAGE REPEATABILITY AND REPRODUCIBILITY REPORT

Specification :	50,0000	160,0000
Total Tolerance :	110,0000	
From Data Sheet :	R=	1,1100
	X Diff.=	0,3233

g	m = 2	m = 3	m = 4	m = 5	...	m = 15
1	1,41	1,91	2,24	2,48	...	3,55
2	1,28	1,81	2,15	2,40	...	3,51
3	1,23	1,77	2,12	2,38	...	3,50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
>15	1,128	1,693	2,059	2,326		3,472

$$K_1 = 5.15/d_2^*$$

$$K_2 = 5.15/d_2^*$$

Trials	K ₁
2	4,5656
3	3,0419

Trials	K ₂
2	3,6525
3	2,6963

Opakovatelnost - Odchylka stroje (E.V.)

$$E.V. = R * K_1$$

E.V.=	3,377
--------------	--------------

$$\% EV = 100[EV/Tolerance]$$

%EV=	3,070
-------------	--------------

Reprodukovatelnost - Odchylka vyhodnocení (A.V.)

$$A.V. = \sqrt{\{(X Diff) * (K_2)\}^2 - [(E.V.)^2 / (nr)]}$$

A.V. =	0,616
---------------	--------------

$$\% AV = 100[AV/Tolerance]$$

%AV=	0,560
-------------	--------------

REPEATABILITY AND REPRODUCIBILITY (R&R)

$$R\&R = \sqrt{\{(E.V.)^2 + (A.V.)^2\}}$$

R&R =	3,432
------------------	--------------

$$\% R\&R = \sqrt{\{\%EV^2 + \%AV^2\}}$$

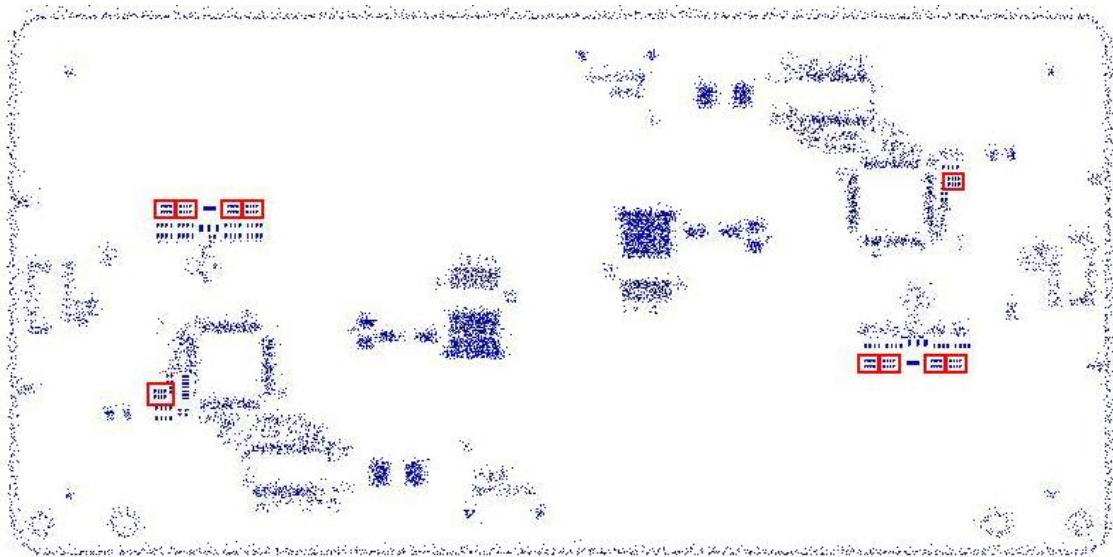
%R&R=	3,120
------------------	--------------

%R&R < 10% - systém měření je přípustný vzhledem k procesu

7.2.SPC analýza metodou DOE

Parametry a podmínky při testování:

Materiál laminát:	FR4
Rozměry laminátu:	195 mm x 95 mm x 1,6 mm
Podpora DPS:	pole podpůrných pinů
Použitá pasta:	Sn 63% Pb 37%, velikost zrn 25-38 μm
Použitý SP:	DEK Horizon
Použitá SPI:	PARMI HS60
Odrhová vzdálenost:	3mm
Cyklus čištění masky:	10
Maska:	150 μm , Laser cut



Obr. 31: Celkový pohled na měřenou DPS

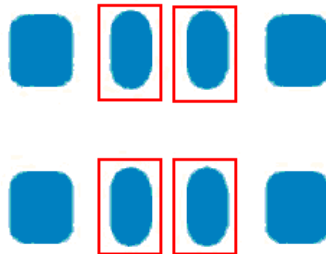
Sledované apertury jsou určeny pro odporové pole s roztečí 0,5mm a jejich rozměry jsou 270 μm x 520 μm .

Nastavené limity inspekce pasty

Výška: 50-160%

Plocha: 50-160%

Objem: 50-160%



Obr. 32: Pohled na měřené apertury

Tab. 11: Určení faktorů a jejich úrovní

FAKTOR	OZNAČENÍ	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Tlak stěrek	A	4,2 kg	4,6 kg	5 kg
Rychlost stěrek	B	25 mm/s	30 mm/s	35 mm/s
Separáčn ^í rychlost	C	2 mm/s	3 mm/s	4 mm/s
Teplota ve SP	D	22 °C	23 °C	24 °C

Každý experiment se sestával z 25 laminátů

Tab. 12: Nastavení úrovní faktorů

Experiment	NASTAVENÁ ÚROVEŇ FAKTORU			
	A	B	C	D
1.	1	1	1	1
2.	1	2	2	2
3.	1	3	3	3
4.	2	1	2	3
5.	2	2	3	1
6.	2	3	1	2
7.	3	1	3	2
8.	3	2	1	3
9.	3	3	2	1

Vzorce pro výpočet hodnot úrovní faktorů:

$$A1 = (Y1 + Y2 + Y3) / 3 \quad B1 = (Y1 + Y4 + Y7) / 3 \quad C1 = (Y1 + Y6 + Y8) / 3 \quad D1 = (Y1 + Y5 + Y9) / 3$$

$$A2 = (Y4 + Y5 + Y6) / 3 \quad B2 = (Y2 + Y5 + Y8) / 3 \quad C2 = (Y2 + Y4 + Y9) / 3 \quad D2 = (Y2 + Y6 + Y7) / 3$$

$$A3 = (Y7 + Y8 + Y9) / 3 \quad B3 = (Y3 + Y6 + Y9) / 3 \quad C3 = (Y3 + Y5 + Y7) / 3 \quad D3 = (Y3 + Y4 + Y8) / 3$$

Vyhodnocení objemu pájecí pasty:

Tab. 13: Výsledky měření objemu pasty

Experiment	NASTAVENÁ ÚROVEŇ FAKTORU				Objem				
	Y	A	B	C	D	Cp	Cpk	X	σ
1.	1	1	1	1	1	4,725	4,472	102,05	3,88
2.	1	2	2	2	2	4,129	3,710	99,41	4,44
3.	1	3	3	3	3	4,365	4,277	103,89	4,20
4.	2	1	2	3	3	4,407	3,943	99,21	4,16
5.	2	2	3	1	1	4,538	4,255	101,57	4,04
6.	2	3	1	2	2	4,538	4,163	100,45	4,04
7.	3	1	3	2	2	4,928	4,037	95,05	3,72
8.	3	2	1	3	3	3,917	3,631	100,97	4,68
9.	3	3	2	1	1	3,852	3,264	96,61	4,76

Příklad výpočtu pro Cpk:

$$A1 = (Y1+Y2+Y3)/3 = (4,472+3,710+4,277)/3 = \underline{4,153}$$

Výsledky:

Tab. 14: Výsledky parametrů objemu

Parametr	Cp	Cpk	X	Σ
A ₁	4,406	4,153	101,78	4,17
A ₂	4,494	4,120	100,41	4,08
A ₃	4,232	3,644	97,54	4,39
B ₁	4,687	4,151	98,77	3,92
B ₂	4,195	3,865	100,65	4,39
B ₃	4,252	3,901	100,32	4,33
C ₁	4,393	4,089	101,16	4,20
C ₂	4,129	3,639	98,41	4,45
C ₃	4,610	4,190	100,17	3,99
D ₁	4,372	3,997	100,08	4,23
D ₂	4,532	3,970	98,30	4,07
D ₃	4,230	3,950	101,36	4,35

Výpočty pro Cpk:

$$T = (Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Y6+Y7+Y8+Y9)/9 = \underline{3,972}$$

$$T_{OPT} = T + (A_1 - T) + (B_1 - T) + (C_3 - T) + (D_1 - T) =$$

$$= 3,972 + (4,153 - 3,972) + (4,151 - 3,972) + (4,190 - 3,972) + (3,997 - 3,972) = \underline{4,575}$$

Vyhodnocení plochy pájecí pasty:

Tab. 15: Výsledky měření plochy pasty

Experiment	NASTAVENÁ ÚROVEŇ FAKTORU				Plocha			
	Y	A	B	C	D	Cp	Cpk	X
1.	1	1	1	1	3,884	2,811	89,80	4,72
2.	1	2	2	2	3,667	2,491	87,36	5,00
3.	1	3	3	3	3,819	2,822	90,64	4,80
4.	2	1	2	3	3,696	2,398	85,68	4,96
5.	2	2	3	1	3,884	2,777	89,32	4,72
6.	2	3	1	2	3,917	2,761	88,76	4,68
7.	3	1	3	2	3,696	2,425	86,08	4,96
8.	3	2	1	3	3,499	2,529	89,76	5,24
9.	3	3	2	1	3,446	2,145	84,24	5,32

Tab. 16: Výsledky parametrů plochy

Parametr	Cp	Cpk	X	Σ
A ₁	3,790	2,708	89,27	4,84
A ₂	3,832	2,645	87,92	4,79
A ₃	3,547	2,366	86,69	5,17
B ₁	3,759	2,545	87,19	4,88
B ₂	3,683	2,599	88,81	4,99
B ₃	3,727	2,576	87,88	4,93
C ₁	3,767	2,700	89,44	4,88
C ₂	3,603	2,345	85,76	5,09
C ₃	3,800	2,675	88,68	4,83
D ₁	3,738	2,578	87,79	4,92
D ₂	3,760	2,559	87,40	4,88
D ₃	3,671	2,583	88,69	5,00

Výpočty pro Cpk:

$$T = (Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+Y_5+Y_6+Y_7+Y_8+Y_9)/9 = \underline{2,573}$$

$$T_{OPT}=T+(A_1-T)+(B_2-T)+(C_1-T)+(D_3-T)=$$

$$= 2,573+(2,708-2,573)+(2,599-2,573)+(2,700-2,573)+(2,583-2,573)= \underline{2,871}$$

Vyhodnocení výšky pájecí pasty:

Tab. 17: Výsledky měření výšky pasty

Experiment	NASTAVENÁ ÚROVEŇ FAKTORU				Výška				
	Y	A	B	C	D	Cp	Cpk	X	σ
1.	1	1	1	1	1	4,661	2,858	126,27	3,93
2.	1	2	2	2	2	4,661	2,716	127,95	3,93
3.	1	3	3	3	3	4,351	2,523	128,11	4,21
4.	2	1	2	3	3	4,479	2,538	128,83	4,09
5.	2	2	3	1	1	4,479	2,776	125,91	4,09
6.	2	3	1	2	2	4,911	3,061	125,71	3,73
7.	3	1	3	2	2	4,351	3,039	121,59	4,21
8.	3	2	1	3	3	4,523	2,922	124,47	4,05
9.	3	3	2	1	1	4,270	2,584	126,71	4,29

Tab. 18: Výsledky parametrů výšky

Parametr	Cp	Cpk	X	Σ
A ₁	4,558	2,699	127,44	4,02
A ₂	4,623	2,792	126,82	3,97
A ₃	4,381	2,848	124,26	4,18
B ₁	4,497	2,812	125,56	4,08
B ₂	4,554	2,805	126,11	4,02
B ₃	4,511	2,723	126,84	4,08
C ₁	4,698	2,947	125,48	3,90
C ₂	4,470	2,613	127,83	4,10
C ₃	4,394	2,779	125,20	4,17
D ₁	4,470	2,739	126,30	4,10
D ₂	4,641	2,939	125,08	3,96
D ₃	4,451	2,661	127,14	4,12

Výpočty pro Cpk:

$$T = (Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+Y_5+Y_6+Y_7+Y_8+Y_9)/9 = \underline{\underline{2,780}}$$

$$T_{OPT} = T + (A_1 - T) + (B_3 - T) + (C_2 - T) + (D_3 - T) =$$

$$= 2,780 + (2,848 - 2,780) + (2,812 - 2,780) + (2,947 - 2,780) + (2,939 - 2,780) = \underline{\underline{3,206}}$$

Zhodnocení výsledků:

Jako zásadní parametr pro vyhodnocování tisku jsem si vybral Cpk, protože právě tento údaj udává, jaké hodnoty bude dosahovat parametr dpmo. Z výsledků je patrné, že nejstabilnějšího tisku z pohledu objemu natištěné pasty se dosáhne s následujícím nastavením (platí pouze pro měřené pady a pouze pro tento konkrétní model).

Tlaku stěrek: 4,2kg

Rychlost stěrek: 25 mm/s

Separační rychlost: 4 mm/s

Teplota ve SP: 24 °C

7.3. Vliv materiálu stěrek na množství natištěné pasty

Tab. 19: Nastavení parametrů tisku a výsledky testů pro porovnání materiálů stěrek

název linky/line	SMT5			SMT6			SMT10			
teplota ve SP [°C]	25,6			25,3			25,5			
Relativní vlhkost [%]	38,3			38,7			45,7			
tlak stěrek [Kg]	5,2			3,4			5,2			
rychlost stěrek [mm/s]	15			15			15			
odtrhová rych. [mm/s]	2			2			5			
odtrh [mm]	1			2			X			
cyklus čištění	15			15			7			
sledované množství	80			80			80			
materiál stěrek	ocel/steel			pryž/rubber			ocel/steel			
typ součástky	chip0402	RA	IC	chip0402	RA	IC	chip0402	RA	IC	
rozměry apertury [mm]	0,40x0,55	0,25x0,40	1,1x0,22	0,40x0,55	0,25x0,40	1,1x0,22	0,40x0,55	0,25x0,40	1,1x0,22	
height	x [%]	123,72	126,13	117,41	114,89	120,14	115,47	117,22	112,27	107,67
	σ [%]	5,68	8,29	4,09	8,09	8,68	8,41	4,30	4,38	3,56
	Cp [-]	2,93	2,01	4,07	2,05	1,92	1,98	3,87	3,81	4,68
	Cpk [-]	2,57	1,86	3,04	1,43	1,54	1,41	2,88	2,46	2,59
area	x [%]	92,40	82,07	96,72	92,38	80,90	99,46	99,50	91,40	100,87
	σ [%]	4,67	9,15	6,65	4,82	5,78	6,33	5,90	5,07	8,48
	Cp [-]	3,75	1,91	2,63	3,62	3,03	2,76	2,97	3,45	2,06
	Cpk [-]	2,67	0,99	2,09	2,58	1,49	2,34	2,51	2,39	1,80
volume	x [%]	104,68	91,53	104,62	97,31	86,79	104,59	106,09	92,54	99,50
	σ [%]	7,17	10,59	7,68	7,96	6,15	8,16	6,98	4,60	8,53
	Cp [-]	3,04	2,05	2,82	2,72	3,52	2,66	3,10	4,71	2,54
	Cpk [-]	2,54	1,30	2,37	1,98	1,99	2,23	2,68	3,08	1,93

Analýza rozložení množství pasty jednotlivých SP a zjištěné defekty na sledované výrobní dávce

Z obrázků rozložení výšky pasty na DPS pro jednotlivé SP je patrné, že při použití stěrek s pryžovým břitem je změřená výška nižší (modrozelené odstíny) než při použití ocelových stěrek (žluté odstíny). To by odpovídalo rozdílu množství asi 10% což, ale není zcela patrné z dat v tabulce. Z hodnot C_{PK} není patrné, že by jeden z materiálů stěrek dosahoval výrazně lepších výsledků. Ani z pohledu množství defektů se nezjistilo žádné vybočení z normy. Velká část defektů je navíc způsobena nečistotami spadlými na DPS což přímo nesouvisí s procesem tisku a materiálu stěrek.

Linka SMT5

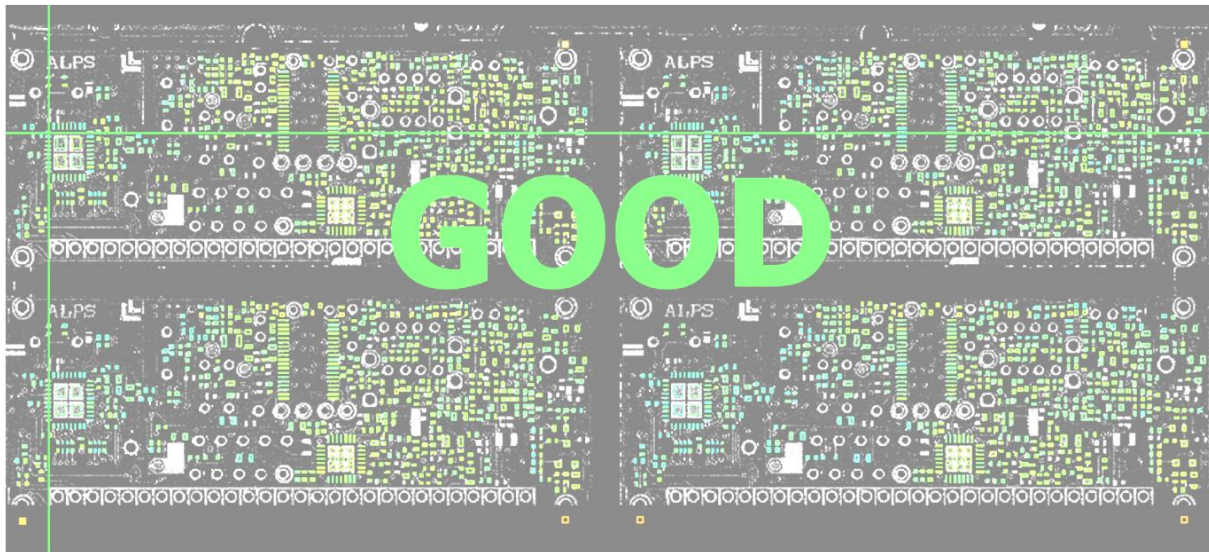


Obr. 33: Rozložení množství pasty na DPS z linky 5

Tab. 20: Zjištěné chyby z linky 5

Popis chyby	3D Zobrazení SPI	Fotografie	Nápravné opatření
Chyba zhlášena jako zkrat – úlomek laminátu na natištěné pastě			Změna technologie vyřezávání obrysů laminátu na frézování Použití účinnějšího čištění laminátů Preventivní údržba – čištění vnitřního prostoru SP

Linka SMT6



Obr. 34: Rozložení množství pasty na DPS z linky 6

Tab. 21: Zjištěné chyby z linky 6

Popis chyby	3D Zobrazení SPI	Fotografie	Nápravné opatření
Velké množství chyb – objem pasty vyšší než limit (nečistota na clumpu která nadzvedávala masku → gap maska-laminát)			Vyčištění clumpu
Chyba zhlášená jako zkrat – úlomek laminátu na natištěné pastě			Změna technologie vyřezávání obrysů laminátu na frézování Použití účinnějšího čištění laminátů Preventivní údržba – čištění vnitřního prostoru SP

Linka SMT10



Obr. 35: Rozložení množství pasty na DPS z linky 10

Tab. 22: Zjištěné chyby z linky 10

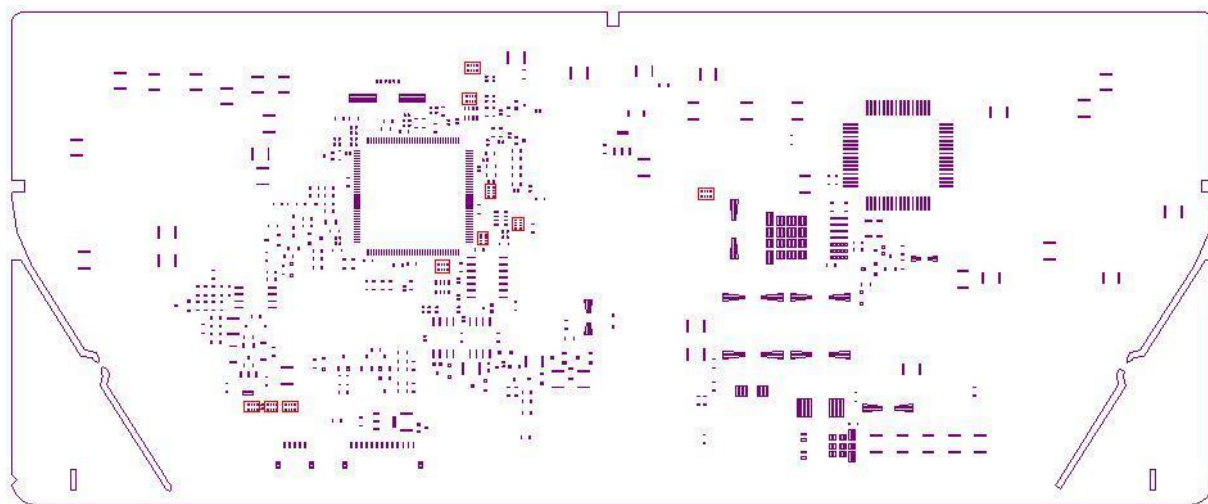
Popis chyby	3D Zobrazení SPI	Fotografie	Nápravné opatření
zkrat – vytržená pasta			<p>Takto vytržená pasta je velmi nestandardní a může to poukazovat na nějaký vnější vliv. Ostatní plošky v okolí nejeví známky vytrhávání pasty.</p>

7.4. Modifikace apertur pro odporová pole

Sledovaný model se začal vyrábět v březnu 2010. Na odporových polích se však dlouhodobě dosahovalo velmi špatného tisku. Důvodem byla nedostatečná hodnota area ratio (poměr ploch apertury a stěn apertury) i přes zvolenou malou tloušťku masky. Z důsledku nedostatečného tisku se přikročilo ke dvojitému stěru, který ale způsoboval horší tisk z pohledu zkratů. Dlouhodobým řešením je zvětšení apertur RA tak, aby nedocházelo ke zkratům a zároveň se vyřešil problém s nezapájenými RA.

Parametry a podmínky při testování:

Materiál laminát:	FR4
Rozměry laminátu:	232 mm x 95 mm x 1,6 mm
Podpora DPS:	pole podpůrných pinů
Použitá pasta:	Sn 63% Pb 37%, velikost zrn 25-38 μm
Použitý SP:	DEK Horizon
Použitá SPI:	PARMI HS60
Odrhová vzdálenost:	2mm
Maska:	1. Tloušťka 120 μm , Laser cut 2. Tloušťka 130 μm , Laser cut (modifikované apertury pro RA)
Cyklus čištění masky:	10
Způsob stěru	1. dvojitý (oba směry stěru na jednu DPS) 2. jednoduchý (vždy jen jeden stěr)



Obr. 36: DPS použitá pro test s modifikovanými aperturami

Původní apertury:

rozměry:	250 x 450 μm
tloušťka masky:	120 μm
AR =	0,705
V =	0,0125 mm ³

Upravené apertury:

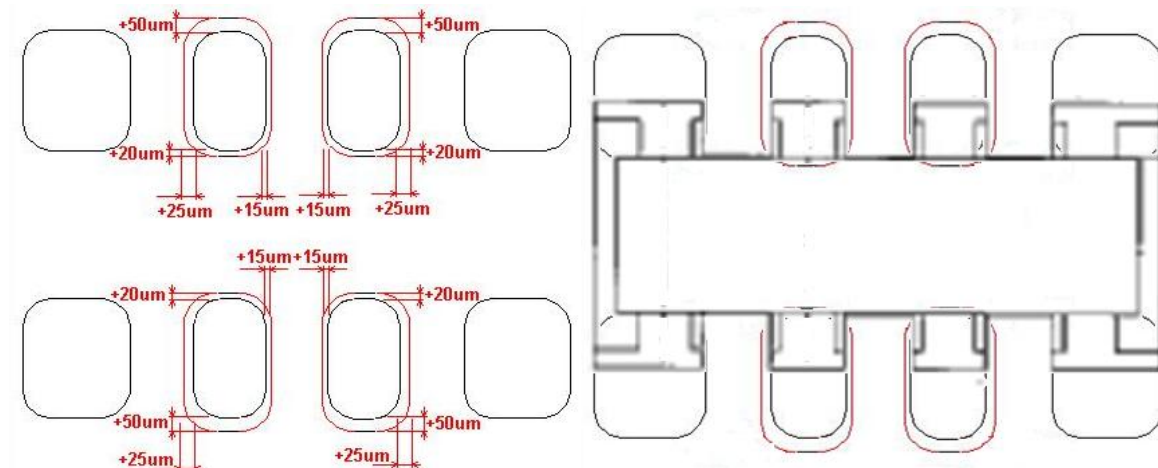
Rozměry: 290 x 520 um

tloušťka masky: 130um

AR = 0,755

V = 0,0185 mm³ (offset - viz příloha)

Celkem bylo modifikováno 40 apertur (10 RA)



Obr. 37: Vlevo – modifikace apertury se zakótovanými příbytky rozměrů v každém směru
Vpravo – pozice osazené součástky odporového pole

I přesto, že původní otvory v šabloně dosahovaly dostatečné hodnoty $AR = 0,705$, bylo to dosaženo malou tloušťkou šablony (120 um). Ta se ukázala jako nedostatečná pro použitou pastu a tak jsme byli nuceni tuto tloušťku zvýšit a zároveň i zvětšit rozměry apertury tak aby se ještě zvětšil AR. Rozhodující pro správný tisk je vždy menší z rozměrů. Tento rozměr jsme zvětšili o 40 um, a abychom zmenšili riziko zkratů mezi vnitřními vývody RA, přistoupili jsme k offsetu všech modifikovaných apertur o 5 um od sebe. Větší z rozměrů jsme také zvětšili a to o 20 um na stranu součástky a o 50 um vně součástky. Rozdíl těchto hodnot byl opět z důvodu, aby se pod součástkou nevyskytovaly zkratky, které by byly obtížně zjistitelné pomocí AOI.

Vyhodnocovány byly data z 50 natištěných desek

- objem pasty,
- C_{pk} ,
- histogram rozložení tisku
- chyby z výstupní inspekce

Nastavené meze objemu:

LSL 50% nominálního objemu apertury

USL 170%

SL 100%

Tab. 23: Výsledky sledovaného modelu od začátku výroby

Vyrobeno ks:	8477	
celkem osazeno všech součástek:	2265936	
nezapájené RA (odporová pole)	72	
nezapájené IC	14	- modifikace pravděpodobně nebude mít vliv
nezapájená jiná součástka	11	- modifikace pravděpodobně nebude mít vliv
málo pasty na celé DPS	5	- modifikace pravděpodobně nebude mít vliv
zkrat na IC	30	
zkrat na jiné součástce	0	
DPMO způsobené tiskem:	58,3	
Chyby způsobené tiskem:	132	
Možné snížení DPMO po modifikaci o:	45,0	
Chyby odstranitelné modifikací:	102	
Předpokládané DPMO po modifikaci:	13,3	

Z tabulky je patrné, že více než polovina všech zaznamenaných defektů bylo právě nezapájené odporové pole. To bylo způsobeno nedostatkem pájky pro vytvoření dostatečně silného pájeného spoje. Jako nápravné opatření pro snížení počtu nezapájených odporových polí se využívalo dvojitého stěru pro každou DPS. To sice přineslo jisté snížení výskytu této chyby, ale naopak to znamenalo zvýšení výskytu jiných chyb jako například zkrat na IC s pouzdrem QFP144 s roztečí vývodů 0,5mm. Pokud by se odstranily modifikací masky tyto závady, kleslo by DPMO z nadprůměrných 58 na 13, což je bráno za standardní výsledek srovnatelný s ostatními výrobami.

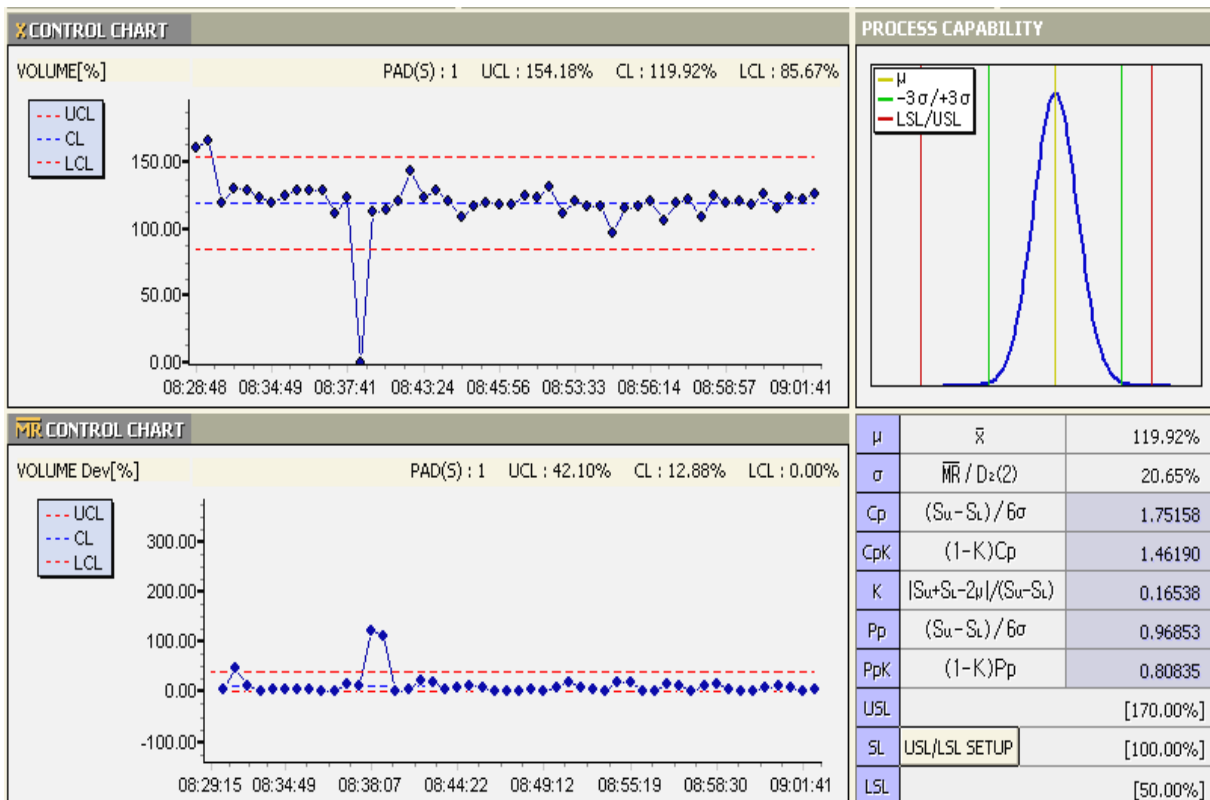
Výsledky testů

Tab. 24: Výsledky před modifikací (20.7.2010 8:28-9:01)

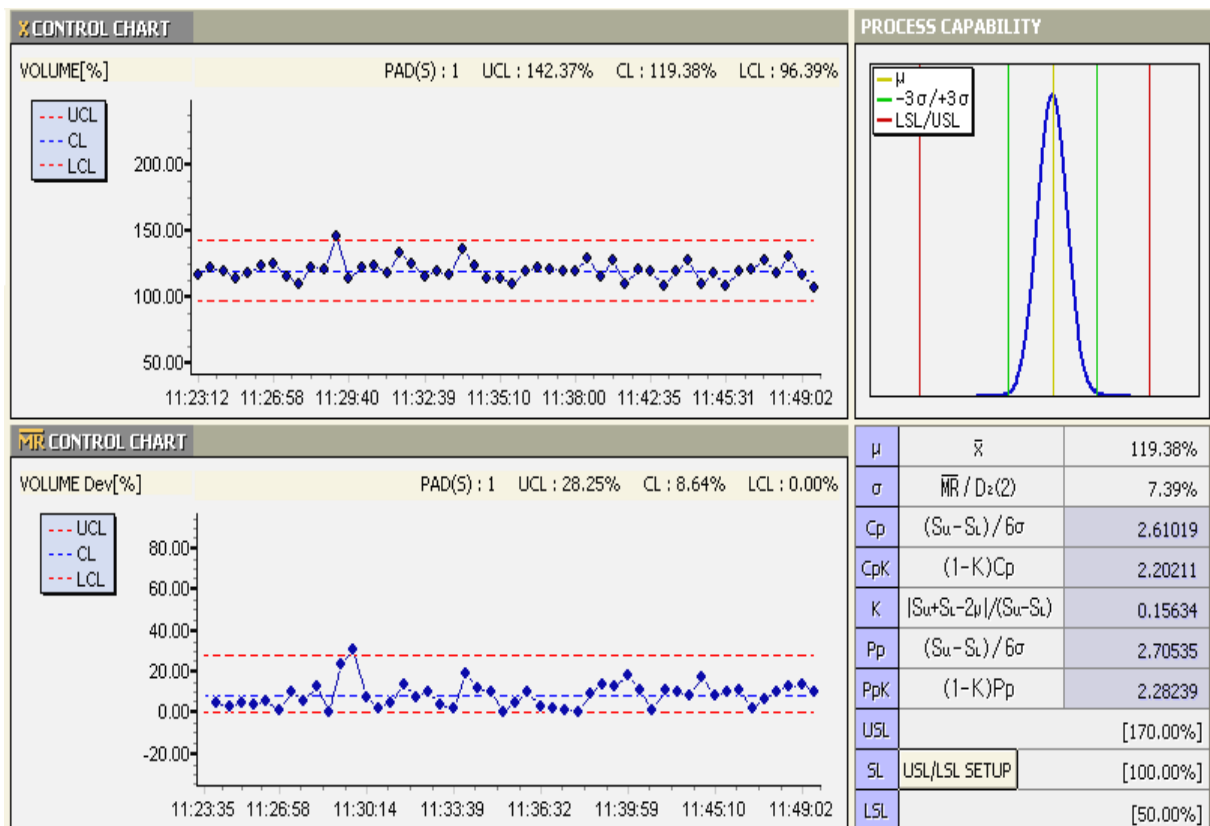
číslo apertury	1	2	3	4	nejhorší
relativní objem (%)	112,53	111,30	115,90	116,38	119,92
σ (%)	19,51	18,54	19,16	19,00	20,65
C_p	2,058	2,075	2,070	2,050	1,751
C_{pk}	1,971	2,030	1,866	1,833	1,461
DPMO nezapájené	56,436	83,088	11,481	11,188	41,868

Tab. 25: Výsledky po modifikaci (20.7.2010 11:23-11:49)

číslo apertury	1	2	3	4	nejhorší
relativní objem (%)	117,92	113,37	117,61	117,02	119,38
σ (%)	5,35	4,31	4,90	4,43	7,39
C_p	3,268	4,565	4,179	4,727	2,610
C_{pk}	2,837	4,308	3,649	4,174	2,202
DPMO nezapájené	0,000	0,000	0,000	0,000	0,137



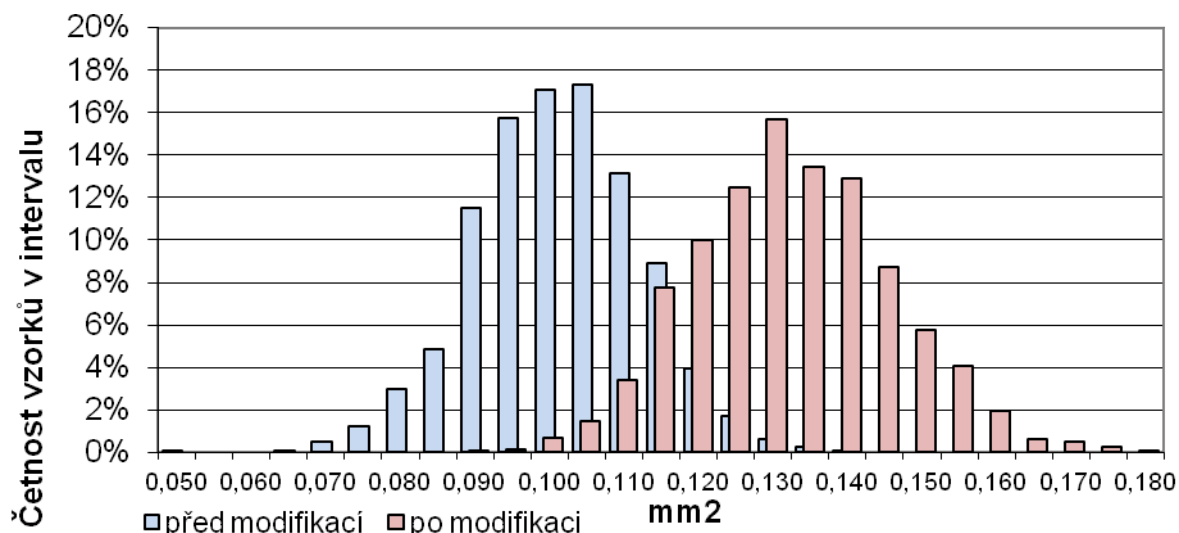
Obr. 38: řídicí diagram (v programu SPCworks) nejhoršího výsledku apertury před modifikací



Obr. 39: řídicí diagram (v programu SPCworks) nejhoršího výsledku apertury po modifikaci

Tab. 26: Porovnání hodnot plochy před a po modifikaci apertur

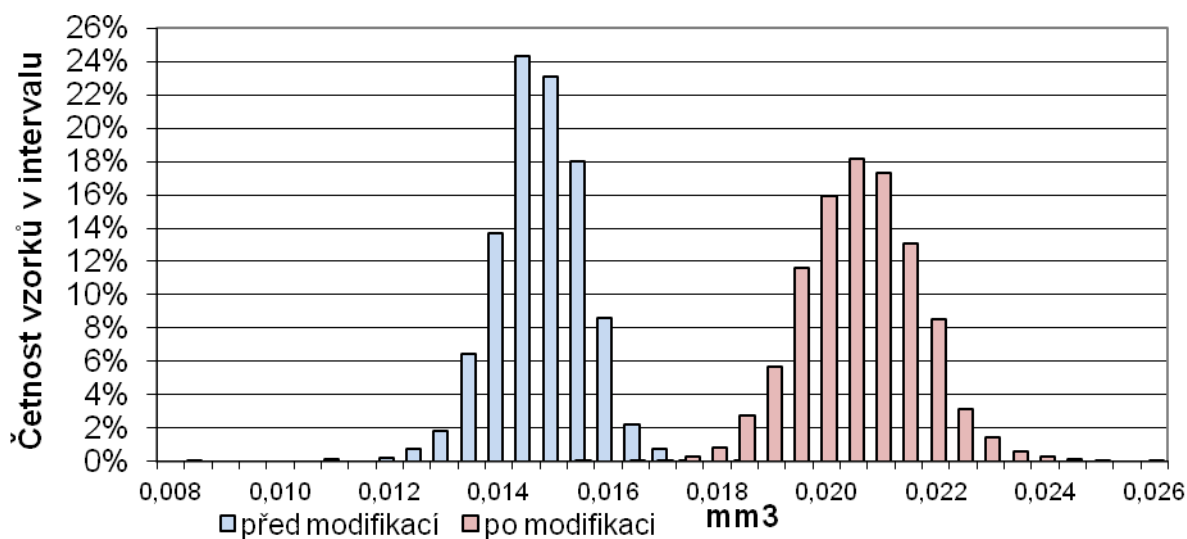
	Před modifikací	Po modifikaci
střední hodnota (mm ²)	0,099	0,130
směrodatná odchylka (mm ²)	0,0111	0,0134
počet vzorků (-)	1960	2000
Min (mm ²)	0,048	0,089
Max (mm ²)	0,137	0,177



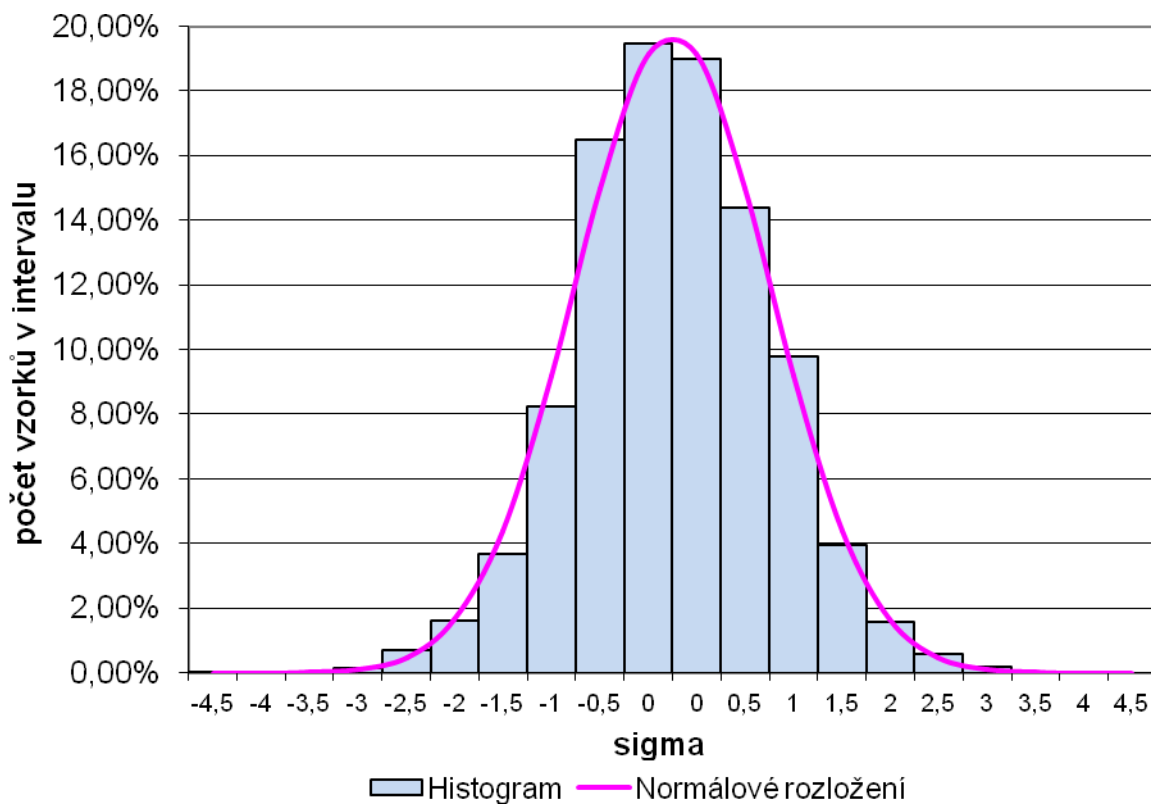
Obr. 40: Histogram plochy natištěné pasty před a po modifikaci

Tab. 27: Porovnání hodnot plochy před a po modifikaci apertur

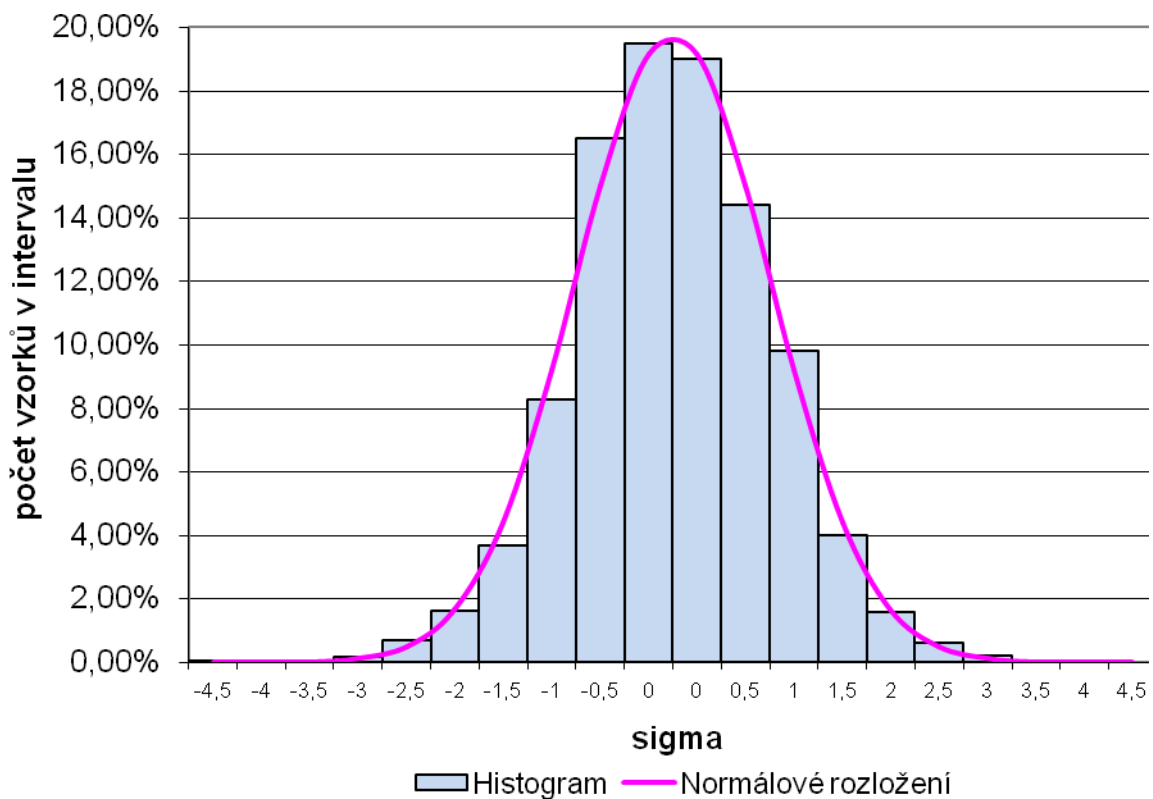
	Před modifikací	Po modifikaci
střední hodnota (mm ³)	0,0141	0,0199
směrodatná odchylka (mm ³)	0,00082	0,00108
počet vzorků (-)	1960	2000
Min (mm ³)	0,0078	0,0147
Max (mm ³)	0,0179	0,0252



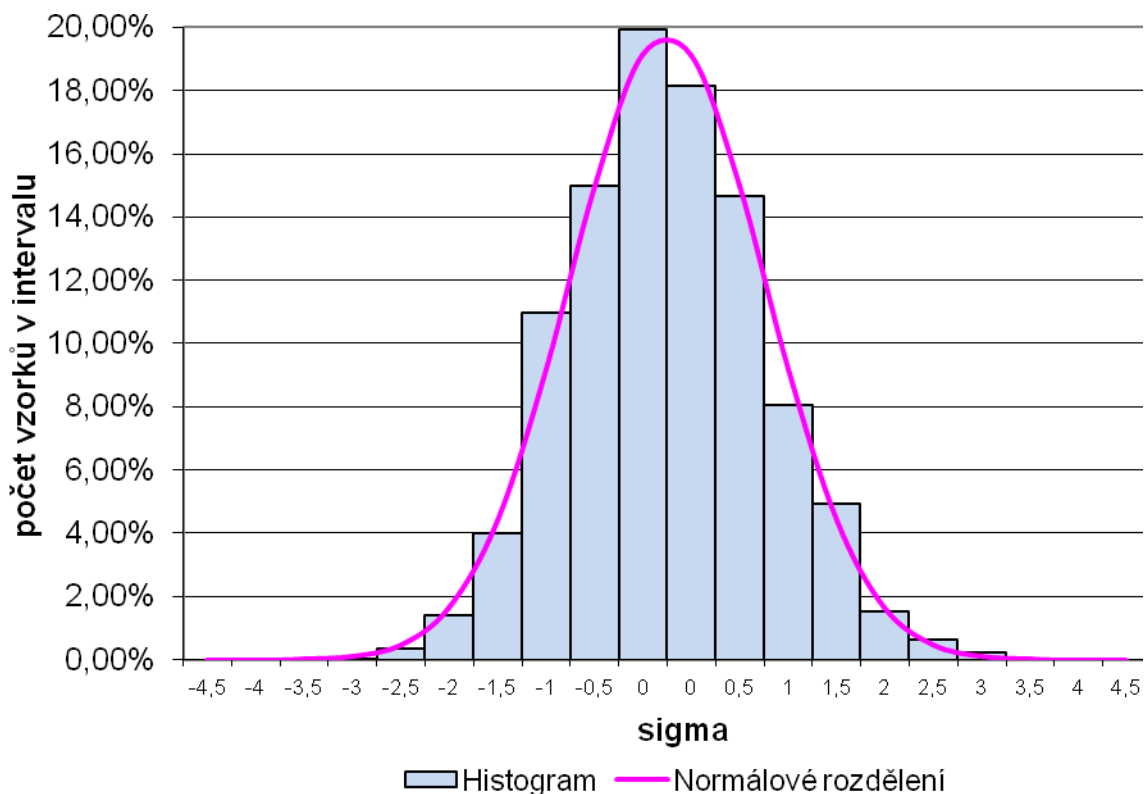
Obr. 41: Histogram objemu natištěné pasty před a po modifikaci



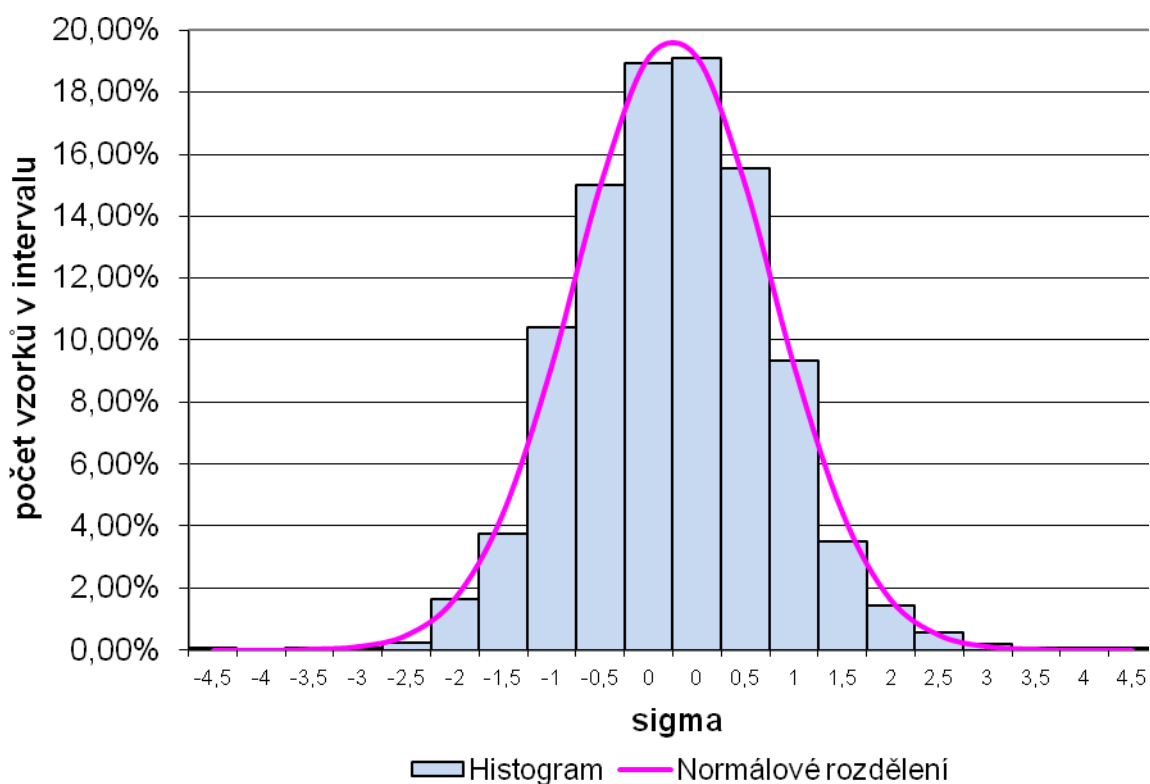
Obr. 42: Normálové rozložení a histogram plochy natištěné pasty před modifikací



Obr. 43: Normálové rozložení a histogram objemu natištěné pasty před modifikací



Obr. 44: Normálové rozložení a histogram plochy natištěné pasty po modifikaci



Obr. 45: Normálové rozložení a histogram objemu natištěné pasty po modifikaci

Dlouhodobé ověření výsledků

Tab. 28: Vyhodnocení výsledků po měsících

sledované období	Před modifikací		Po modifikaci		
	19.4. - 18.6.2010	19.6. - 19.7.2010	21.7. - 20.8.2010	21.8. - 20.9.2010	21.9. - 21.10.2010
doba výroby	4145	5910	3180	3820	5885
vyrobena kusů	2520	5071	3400	3956	5235
počet osazených součástek	690696	1392435	932014	1086305	1438834
počet chyb	60	75	15	11	10
OLR [%]	2,38%	1,48%	0,44%	0,28%	0,19%
DPMO [-]	86,9	53,9	16,1	10,1	7,0

Tab. 29: Seznam zaznamenaných chyb po měsících

sledované období	Před modifikací		Po modifikaci		
	19.4.- 18.6.2010	19.6.- 19.7.2010	21.7.- 20.8.2010	21.8.- 20.9.2010	21.9.- 21.10.2010
Nezapájené odporové pole	34	34	1	0	3
Zkrat na IC	10	14	1	5	4
Nedostatečně zapájené IC	3	11	3	2	0
Nedostatečně zapájené ost. součástky	6	5	1	0	0
Ploška bez pasty	1	4	3	0	0
Zkrat na ostatních součástkách	0	0	0	0	1
Chyby nezapříčiněné tiskem pasty	6	7	6	4	2

Z měsíčních výsledků (první období je delší z důvodu začínající produkce) je patrné, že ihned po modifikaci masky se razantně zlepšila kvalita produkce. Bylo to způsobeno především téměř úplným odstraněním chyby „nezapájené odporové pole“. To, že se mohlo po modifikaci upustit od dvojitého tisku, se projevilo na snížené chybovosti i v jiných kategoriích souvisejících s tiskem. Naopak chybovosti nesouvisející s tiskem modifikace neovlivnila a postupné snižování je zapříčiněno postupným doladováním výrobních procesů u tohoto modelu. Výsledná hodnota DPMO je velmi podobná té, která byla předpokládána před modifikací.

Výpočet úspory nákladů díky zlepšení efektivity

Tab. 30: Vyhodnocení souhrnných výsledků (za 3 měsíce) před a po modifikaci

*změna je přepočítána poměrově k počtu vyrobených kusů

	Před modifikací	Po modifikaci	Změna*
sledované období	19.4. - 19.7.2010	21.7. - 21.10.2010	
doba výroby [min]	10055	12885	
vyrobena kusů [ks]	7585	12587	
počet osazených součástek [ks]	2083131	3457153	
počet hlášení chyb (ks)	1027	378	-78%
OK DPS/všechny DPS	86,5%	97,0%	
celkový počet chyb	135	36	
poměr chyby/hlášení SPI	13,1%	9,5%	
OLR [%] -	1,78%	0,29%	-84%
DPMO [-]	64,8	10,4	-84%

Soupis opravitelných chyb

Nezapájené odporové pole	68	4	-96%
Zkrat na IC	24	10	-75%
Nedostatečně zapájené IC	14	5	-78%
Nedostatečně zapájené ost. součástky	11	1	-95%
Ploška bez pasty	5	3	-64%
Zkrat na ostatních součástkách	0	1	
Chyby nezapříčiněné tiskem pasty	13	12	-44%

Prostoje v minutách

celkem (včetně CHO a přestávek)	3009	4278	-14%
celkem (bez CHO a přestávek)	630	1037	-1%
Prostoje SPI - nastavení	60	0	-100%
Prostoje SP - ladění tisku	115	15	-92%
Rozjezd linky - roztisk	373	255	-59%

Náklady na pořízení šablony

Použitý kurz pro přepočet z € = 24,5 Kč/€

Výroba šablony:	220 €
Doprava expresní dopravní službou:	32 €
Celkové náklady:	252 € (6174 Kč)

Cenová úspora (počítaná za 21.7.2010 – 21.10.2010)

- Úspora času zvýšením efektivity

Tab. 31: Výpočet časové úspory zvýšením efektivity výroby

	Před modifikací	Po modifikaci	Očekávatelné výsledky (bez modifikace)
Sledované období	19.6.-19.7.2010	21.7.-21.10.2010	21.7.-21.10.2010
Doba výroby [min]	5910	12885	15011
Prostoje celkem (včetně CHO a přestávek) [min]	1586	4278	4278
Čistý výrobní čas [min]	4324	8607	10733
Vyrobena kusů [ks]	5071	12587	12587
CT [min]	0,85 (51s)	0,68 (40,8s)	0,85
Ideální změněný CT [min]	0,55 (33s)	0,55 (33s)	0,55
Efektivita výkonnosti výroby [%]	64,5%	80,4%	64,5%

Čistý výrobní čas:	8607 minut
Potřebný výrobní čas bez modifikace:	10733 minut
Časový rozdíl zvýšením performance rate:	2126 minut
Kalkulovaná cena za minutu:	8,256 Kč
Cenová úspora:	17552 Kč

Ihned po změně šablony za modifikovanou se ukázalo, že velká změna se udála i ve výkonnosti linky. Ideální CT se nezměnil, ale zlepšení bylo ve snížení malých nezaznamenaných prostojích (chybová hlášení SPI...). Například právě počet hlášení z SPI poklesl o 78%. Při těchto hlášeních se zastaví SPI (a poté i stroje v lince před SPI). Performance linky touto úpravou vzrostl z 64,5% na 80,4% a za tři měsíce to znamená časovou úsporu 2126 minut při stejné výrobě oproti stavu před modifikací šablony. Tento čas by mohl být poté použit na výrobu jiných produktů. Cenová úspora byla vypočtena z kalkulované ceny za minutu výroby firmy ALPS. Pro porovnání byl použit z doby před modifikací pouze jeden (poslední měsíc), protože se již neuplatňovaly rozdíly v efektivitě způsobené začínající výrobou modelu.

- Úspora na prostojích při nastavování tisku

Tab. 32: Výpočet časové úspory na prostojích

	Před modifikací	Po modifikaci	Očekávatelné výsledky (bez modifikace)
Sledované období	19.6.-19.7.2010	21.7.-21.10.2010	21.7.-21.10.2010
Doba výroby [min]	10055	12885	12885
Vyrobena kusů [ks]	7585	12587	12587
Prostoje SPI – nastavení [min]	60	0	99
Prostoje SP – ladění tisku [min]	115	15	190
Rozjezd linky – roztisk [min]	373	255	619
Prostoje SPI, SP a roztisk [min]	548	270	908

Prostoje (nastavení SPI, SP a roztisk) po modifikaci:	270 minut
Očekávané prostoje (nastavení SPI, SP a roztisk) bez modifikace:	908 minut
Rozdíl prostožů:	638 minut
Kalkulovaná cena za minutu:	8,256 Kč
Cenová úspora:	5267 Kč

Prostoje typu nastavování SPI, Screen printeru a roztisku (maska při vložení do SP se musí roztisknout, protože se za začátku nedosahuje dobré kvality) jsou velmi závislé na kvalitě návrhu masky. I zde se dosáhlo velkého zlepšení. Celková úspora času byla vypočtena na 638 minut a 5267 Kč za sledované tříměsíční období.

- **Úspora na opravách**

Při opravách zkratů a nedostatečných pájených spojů se spotřebovává pouze materiál pájecího drátu a opotřebovává se hrot. Cenová náročnost a tedy úspora není příliš vysoká.

- **Ostatní úspory**

Dopad na FMEA – Tím, že se snížilo množství (výskyt) chyb, je možné si i snížit hodnocení ve FMEA, která je využívána v ALPS.

- Zvýšení kvality – Snížením výskytu chyb se snížila i pravděpodobnost proniknutí defektů přes kontroly kvality (AOI, ICT) a tím i menší ohrožení zákazníků. Samozřejmě i riziko zákaznických reklamací a následných finančních vyrovnání za nekvalitu se snížilo.
- Úspora pracovních sil – Před modifikací, kdy se nedosahovalo příliš stabilního tisku, bylo potřeba výrobu více sledovat a často nastavovat parametry tisku. Tyto změny stály čas jak obsluhy linky, techniků a v neposlední řadě i opravářů při opravě defektů pájení. Po modifikaci se tento čas výrazně zkrátil.

Úspory na opravách a ostatní úspory nebudou zahrnovat pro výpočet návratnosti.

Výpočet návratnosti modifikace šablony

$$\begin{aligned}
 \text{návratnost} &= \frac{\text{náklady na pořízení šablony}}{(\text{úspora zvýšením efektivity} + \text{úspora snížením prostožů})} = \frac{6174}{(17552 + 5267)} \\
 &= 0,81 \text{ měsíce} \\
 \text{měsíční úspora} &= \frac{(\text{úspora zvýšením efektivity} + \text{úspora snížením prostožů})}{\text{počet sledovaných měsíců}} \\
 &= \frac{(17552 + 5267)}{3} = 7603 \text{ Kč}
 \end{aligned}$$

8. Závěr

V tomto semestrálním projektu jsem se zaměřil na problematiku tisku pájecí pasty pro součástky s malou roztečí vývodů (případně malými vývody). Zhodnotil jsem dopad volby parametrů šablony, nastavení parametrů Screen printeru, a parametrů pájecí pasty na kvalitu tisku.

Dalším bodem bylo popsat metody inspekce natištěné pasty a jejího vyhodnocování pomocí SPC. Zaměřil jsem se na metody, které jsou používány programem SPCworks, který je součástí vybavení 3D SPI Parmi.

Před tím než jsem začal s analýzou tisku s využitím metody Design of Experiments bylo potřeba ověřit opakovatelnost měření SPI. Pro ověření jsem použil analýzu tisku fine pitch QFN s roztečí 0,5mm. Výsledná hodnota %R&R = 3,120 je velmi nízká a hluboko pod maximálním limitem vhodnosti zařízení pro měření.

Po ověření SPI jsem mohl začít s analýzou tisku. Zvolil jsem odporové pole na jiném modelu. Po zrealizování experimentů jsem z historie uložené v SPI získal hodnoty potřebné pro vyhodnocení. Z výsledků jsem určil nejlepší nastavení parametrů SP pro tisk pájecí pasty pro konkrétní apertury.

V semestrálním projektu 2 jsem dále rozvinul metody SPC a zaměřil se na rozdíly ve výsledcích tisku pro ocelové a pryžové stěrky.

V závěrečné části jsem udělal analýzu změny designu šablony u problematických komponent. Výsledky byly opravdu zajímavé a kromě výrazného snížení chybovosti se dosáhlo i větší efektivity výroby skrze snížení prostojů pro roztisk při změně výroby a snížení počtu chybných hlášení z 3D SPI.

Dále jsem provedl analýzy pomocí histogramů pro ověření, zda proces tisku ovlivňují pouze náhodné chyby (normálové rozdělení) a nevyskytují se jiné druhy chyb, které by mohly histogramy deformovat.

Dalším krokem pro zefektivnění práce s 3D SPI, by bylo využití warning zón pro snížení počtu falešných hlášení při zachování principů SPC.

Chtěl bych zároveň poděkovat firmě ALPS ELECTRIC CZECH, s.r.o. za umožnění provedení analýzy v jejich výrobě a zařízení.

9. Použitá literatura a odkazy

- [1] Cookson electronics - Alpha stencils, *Stencil Design Guidelines*, Dostupné z WWW:
<http://www.alphametals.com>
- [2] PARMÍ CO., *SPI HS60 specifications*, Dostupné z WWW: <http://www.parmi.com>
- [3] ŠANDERA, *Součástky SMD*, Dostupné z WWW: <http://www.smtplus.cz>,
- [4] PQM Ostrava, *Design of experiments*, Dostupné z WWW:
<http://www.pqm.cz/doe.htm>
- [5] *Pasivní součástky*, Dostupné z WWW: <http://smtcentrum.cz>
- [6] *Základní typy pružných deformačních členů*, Dostupné z WWW:
http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/typy_pruznych_clenu.htm
- [7] MY DATA CO., *Jet printing for high mix production*, Dostupné z WWW:
<http://www.mydata.com/www2/main.nsf/content.xsp?action=openDocument&documentId=48BF55DB06CCED31C125777D002C2628&cat=C38>
- [8] *Wikipedia - Normální rozdělení*, Dostupné z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%AD
- [9] *Statistické regulační diagramy*, Dostupné z WWW:
eso.vscht.cz/cache_data/1385/www.vscht.cz/ufmt/cs/.../SRD-1.pdf