

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Užití umělé inteligence pro zlepšení procesu SMT výroby Usage of artificial intelligence to improve SMT process

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Management energetiky a elektrotechniky
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Krč

Bc. Jiří Kordík
Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kordík** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **457014**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Management energetiky a elektrotechniky**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Užití umělé inteligence pro zlepšení procesu SMT výroby

Název diplomové práce anglicky:

Usage of artificial intelligence to improve SMT process

Pokyny pro vypracování:

1. Popište technologii SMT pro osazování desek plošných spojů.
2. Analyzujte proces automatické optické inspekce. Uveďte typy SMD součástek a jejich problematiku z hlediska detekce automatickou optickou inspekcí.
3. Aplikujte umělou inteligenci na proces automatické optické inspekce konkrétní výrobní SMT linky.
4. Proveďte ekonomické vyhodnocení aplikace umělé inteligence na proces automatické optické inspekce.
5. Navrhněte vhodné rozšíření aplikace na další výrobní SMT linky.

Seznam doporučené literatury:

ABEL, Martin. SMT: technologie povrchové montáže. Nakladatelství Platan, Pardubice, 2000. ISBN 80-902733-1-9.
ŘEPA, Václav. Procesně řízená organizace. Praha: Grada, 2012. Management v informační společnosti. ISBN 978-80-247-4128-4.
SVOZILOVÁ, Alena. Zlepšování podnikových procesů. Praha: Grada, 2011. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-3938-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Krč, Continental Automotive Czech Republic s.r.o.

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

Datum zadání diplomové práce: **16.08.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

Ing. Tomáš Krč
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 21. 12. 2021

.....

Bc. Jirí Kordík

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Krčovi za jeho cenné rady, ochotu a čas při vedení diplomové práce. Velké poděkování patří především rodině, která mi poskytla možnost studia na vysoké škole a veškerou pomoc se studiem spojenou, a také partnerce za její podporu při zpracování diplomové práce i během doby studia. Děkuji také spolužákům a ČVUT za krásné roky vysokoškolského života.

Anotace

Diplomová práce se zabývá zlepšením procesu v SMT výrobě užitím umělé inteligence při automatické optické kontrole kvality pájených spojů. V práci je popsán výrobní proces na SMT lince, detailně pak kontrolní proces automatické optické inspekce, která pomocí vizuální kontroly detekuje možné vady na deskách plošných spojů. Následnou verifikaci výsledků automatické optické inspekce provádí operátor. Při verifikaci však dochází k chybným ohodnocením, která mohou mít nákladné následky. Pro redukci chyb verifikace a ke zvýšení celkové automatizace výroby je proto aplikována do procesu výroby umělá inteligence, která částečně nahradí práci operátora na verifikačním pracovišti. Pro výpočet ekonomické efektivity aplikace systému využívajícího umělou inteligenci je sestaven ekonomický model, na jehož základě jsou vypočtena různá ekonomická kritéria hodnocení investic.

Klíčová slova

Povrchová montáž, automatické osazování, SMT linka, deska plošných spojů, automatická optická inspekce, vady pájených spojů, umělá inteligence, optimalizace výrobního procesu, čistá současná hodnota, vnitřní výnosové procento, doba návratnosti

Annotation

The master thesis deals with the improvement of the process in SMT production using artificial intelligence in automatic optical quality control of soldered joints. The work describes the production process on the SMT line. Exactly the control process of automated optical inspection which uses visual inspection to detect possible defects on the printed circuit boards. Subsequent verification of the results of the automated optical inspection is performed by the operator manually. However, validation errors which occur during verification have several consequences. To reduce verification errors and to increase the overall automation level of production, artificial intelligence is applied to the production process which will partially replace the operator's work at the verification workplace. The economic efficiency calculation of the system application with artificial intelligence is based on a choice of several economic conditions for investment evaluation.

Key words

Surface mount technology, automatic assembly, SMT line, printed circuit board, automated optical inspection, soldering issues, artificial intelligence, production process optimization, net present value, internal rate of return, payback period

Obsah

Úvod	9
1. SMT linka pro osazování DPS	10
1.1. Značení DPS sériovým číslem.....	10
1.2. Nanesení pájecí pasty	11
1.2.1. Pájecí pasta	11
1.2.2. Šablonový tisk	11
1.2.1. Sítotisk.....	13
1.2.2. Dispenze	13
1.3. Inspekce pájecí pasty (SPI)	14
1.4. Osazení součástkami	16
1.4.1. Metody osazování.....	16
1.4.2. Osazovací automat.....	16
1.4.3. Zásobníky součástek.....	17
1.5. Pájení přetavením – reflow.....	18
1.5.1. Ohřev horkým plynem.....	18
1.5.2. Přetavení infračervenými zářiči.....	18
1.5.3. Pájení laserem.....	18
1.6. Automatická optická inspekce – AOI.....	19
1.7. Automatická rentgenová inspekce – AXI.....	19
1.8. Průchozí montáž – THT	19
2. Automatická optická inspekce – AOI.....	20
2.1. Proces AOI	20
2.2. Rozdělení AOI.....	22
2.3. Verifikace výsledků.....	23
2.4. Základní typy SMD a detekce jejich vad pomocí AOI	24
3. Magic AOI.....	28
3.1. Princip Magic AOI	28
3.2. Učení umělé inteligence	30
3.3. Uvolnění Magic AOI na linku	31
3.4. Hodnocení chyb umělou inteligencí	32
4. Ekonomické hodnocení	34
4.1. Metody hodnocení ekonomické efektivity projektu	34
4.1.1. Čistá současná hodnota – NPV.....	34
4.1.2. Vnitřní výnosové procento – IRR.....	35
4.1.3. Doba návratnosti – PP	35

4.2.	Ekonomické vstupy	36
4.2.1.	Kurz EUR/CZK	36
4.2.2.	Doba životnosti projektu	36
4.2.3.	Inflace	36
4.2.4.	Růst mezd	36
4.2.5.	Diskont	36
4.2.6.	Vážený průměr nákladů kapitálu – WACC	38
4.3.	Hodnocení ekonomické efektivity projektu aplikace Magic AOI	39
4.3.1.	Licence	40
4.3.2.	Virtuální server	40
4.3.3.	Redukce práce operátorů	40
4.3.4.	Únik zmetků	41
4.3.5.	Prostoje SMT linky	42
4.3.6.	Práce inženýrů	42
4.3.7.	Modelový výpočet	43
4.3.1.	Vyhodnocení ekonomické efektivity projektu Magic AOI	44
4.4.	Citlivostní analýzy	44
4.4.1.	Citlivostní analýza čisté současné hodnoty na diskontu	44
4.4.2.	Citlivostní analýza inflace čisté současné hodnoty na inflaci	45
5.	Rozšíření aplikace Magic AOI	46
5.1.	Rozšíření na další SMT linky	46
5.2.	Rozšíření na další optické kontrolní systémy	46
5.3.	Komunikace Magic AOI s automatickou optickou inspekcí	46
	Závěr	47
	Zdroje	48

Úvod

Proces osazování desek plošných spojů prochází neustálým vývojem kupředu. Trend minimalizace přístrojů a maximalizace funkcí tak zasáhl právě elektronické systémy, které jsou vyráběny na montážních linkách. Hlavní změnou osazování je neustálý přechod technologie montáže součástek, kdy jsou postupně součástky s drátovými vývody určené pro průchozí montáž deskou plošných spojů nahrazovány součástkami pro montáž povrchovou. S touto revolucí v oblasti osazování desek plošných spojů tak došlo k výrazné automatizaci a zjednodušení procesu výroby. Dalším trendem je minimalizace součástek, která vede k redukci velikosti desky plošných spojů, případně k možnému rozšíření funkcí daného systému.

Pro celkový proces výroby je pak požadavek na zrychlení při zachování, nebo zvýšení kvality. K plnění tohoto požadavku je tak kladen důraz na automatizaci procesů a jejich optimalizaci. Rychlost výroby desek plošných spojů je závislá na konkrétních strojích výrobní SMT linky. Jejich automatizace a optimalizace je stálým tématem a postupnými kroky, vedoucími ke zlepšování strojů, dochází ke zvyšování produkce. SMT linka se skládá z několika strojů, které na sebe vzájemně navazují a výsledným produktem je osazená deska plošných spojů určité kvality. Jednotlivými procesy jsou: značení sériovým číslem, nanášení pájecí pasty a optická kontrola nanesené pasty, osazení součástkami, přetavení pájecí pasty v peci a kontrola kvality pájených spojů. Následovat může také osazení součástek pro průchozí montáž, pokud jimi má deska plošných spojů disponovat. Ke zlepšení procesu výroby je možné zdokonalovat každý zmíněný proces na SMT lince.

Ke kontrole kvality pájených spojů je využívána automatická optická inspekce, která na základě vizuálního porovnání kontrolované desky plošných spojů s deskou referenční detekuje možné vady. V případě nalezení odchylky je potenciální vada hodnocena operátorem na verifikačním pracovišti za automatickou optickou inspekci. Operátor následně klasifikuje, zda je chyba skutečnou vadou, nebo byla detekce nesprávná.

Na verifikačním pracovišti tedy vzniká výrazný prostor pro automatizaci klasifikace chyb detekovaných automatickou optickou inspekci. Jednou z možností je využití umělé inteligence, která by svými rozhodnutími zredukovala počet výstupů, které by musel operátor klasifikovat a tím i jeho práci. Zároveň by při dostatečné kvalitě hodnocení byla schopna snížit počet nepřesných hodnocení oproti operátorovi, neboť by se snížil vliv chybovosti lidského faktoru. Díky tomu by docházelo k menším počtům úniků vadných kusů z SMT linky.

S užitím umělé inteligence se v dnešní době můžeme setkat v mnoha sektorech. Své uplatnění si již našla například ve zdravotnictví, kde využívá své strojové učení, při použití různých chytrých asistentů, ověřování identit a dalších. Její využití je tedy široké, a proto by její aplikace ve výrobě, konkrétně SMT lince, mohla být dalším výborným krokem vpřed z pohledu automatizace a zrychlení výroby.

Nasazení umělé inteligence na proces automatické optické kontroly kvality pájených spojů by však nemusel být jediným použitím umělé inteligence ve výrobě plošných spojů. Je tak jen otázkou času, než dojde k jejímu rozšíření i na další výrobní procesy a automatizace v oblasti SMT výroby se tak opět posune na vyšší stupeň. Již nyní je možné brát v úvahu další využití umělé inteligence popsané v této práci na ty výrobní procesy, kde je využívána optická kontrola.

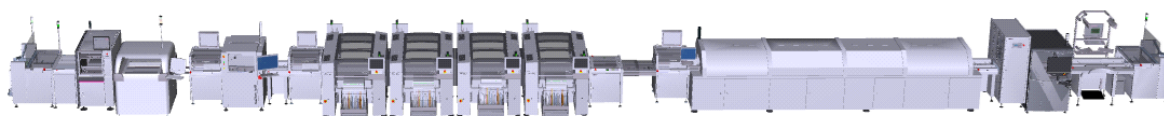
1. SMT linka pro osazování DPS

Technologie povrchové montáže – Surface Mount Technology (SMT) postupem času nahrazovala montáž klasickou osazující součástky s drátovými vývody – Through Hole Technology (THT). Se změnou technologie musely být nahrazeny také osazované desky, u kterých se pokovené průchody nahradily plošnými spoji a klasické součástky součástkami pro povrchovou montáž – Surface Mount Device (SMD). Tato změna umožnila výrazné zmenšení osazovaných desek a k pokračování v tomto trendu přispělo zmenšování SMD součástek. Přesun k povrchové montáži způsobil vyšší automatizaci procesu a výrazné zrychlení procesu výroby.

SMT linka zastupuje řadu činností, které na sebe navzájem navazují. Výsledným produktem SMT linky je osazená deska plošných spojů určité kvality. Kvalita spojů a osazení je kontrolována průběžně během procesu výroby, aby se vzniklé chyby detekovaly a případně eliminovaly co nejdříve od jejich vzniku.

Na začátku každé linky je podavač DPS, který si z magazínu (zásobníku) postupně odebírá neosazené DPS. Ty jsou dále přesouvány pomocí dopravníku do stroje s laserem, kde je pomocí laserového paprsku na každé DPS vytvořeno sériové číslo. Následuje nanášení pájecí pasty a optická kontrola přesnosti a množství jejího nanesení. V případě úspěšného projití kontrolou následuje osazení součástkami v osazovacích automatech. Po osazení dochází k přetavení pájecí pasty v pájecí peci, čímž se součástky zapájí k DPS. Poté je na řadě automatická optická inspekce, která kontroluje kvalitu pájených spojů. Pro těžko přístupná místa je možné využít rentgenovou kontrolu. Pokud jsou optickou inspekci nebo rentgenem detekovány chyby, je DPS umístěna na verifikační pracoviště, kde je detekovaná chyba podrobena vizuální kontrole operátorem. Jestliže není na DPS reálná chyba, následuje přesun pomocí dopravníku do magazínu s osazenými DPS.

Součástí SMT linky jsou také dopravníky a buffery. Dopravníky zajišťují pohyb DPS mezi jednotlivými stroji na lince, buffery jsou pak zásobníky, do kterých mohou být DPS ukládány v případě, kdy další stroj není připraven přijmout další DPS.



Obr. 1 SMT linka [1]

1.1. Značení DPS sériovým číslem

Prvním krokem SMT linky je unikátní označení desky plošných spojů pro přímou identifikaci každého produktu. Značení je vytvářeno vypalováním maticového kódu (datamatrixu) pomocí laserového paprsku.

V každém stroji výrobní SMT linky jsou umístěny čtečky datamatrixů, které načtou datamatrix a tím identifikují sériové číslo dané DPS a přiřadí jí veškeré atributy a nastavení stroje. Díky tomu vzniká možnost zpětné vazby například v hledání příčin vad při reklamaci, kdy je možné zjistit, jaká pájecí pasta byla použita, jaký teplotní profil pájecí pece byl nastaven a další podrobnosti výroby spojené přímo s vybranou DPS.

1.2. Nanesení pájecí pasty

Po označení sériovým číslem je DPS pomocí dopravníku přesunuta na tisk pájecí pasty. K osazování SMD součástkami jsou dostupné různé druhy past, které se liší svým složením. Nanášení pájecí pasty pak může probíhat různými technologiemi, kterými jsou v sériové výrobě především šablonový tisk, sítotisk a dispenze, která je však využívána spíše při výrobě menších sérií.

1.2.1. Pájecí pasta

Pájecí pasta je využívána při povrchové montáži desek plošných spojů. V současnosti je možné pájet pomocí pájecí pasty kromě SMD součástek také součástky s průchozí montáží, což bude popsáno v kapitole 1.4.1. Největší výhodou používání pájecí pasty je nanesení přesného požadovaného množství na vyvedené plošky DPS, které je dáno velikostí plošky a součástky. Pájecí pasta je tvořena dvěma složkami – směsí kovů ve formě miniaturních kuliček a tavidlem, které působí proti oxidaci pájeného spoje. Teplota tání slitin, při které dochází k přetavení pájecí pasty, se odvíjí právě od směsi složení.

Pájky se obecně dělí podle složení na olovnaté a bezolvnaté. Olovnaté pájky vykazují lepší technologické vlastnosti a jejich teplota tání je nižší, ale kvůli obsahu olova bylo jejich užívání z nařízení Evropské unie téměř zakázáno. Výjimka je vztažena tam, kde je potřeba disponovat lepšími spoji, které vykazují právě olovnaté pájení. Jedná se o sektory letectví, automobilového průmyslu a zdravotnictví.

Dělení pájecích past z pohledu oplachovosti, tedy zda je potřeba danou DPS po přetavení zbavit nečistot způsobených tavidlem, je na oplachovou a bezoplachovou. Při využití bezoplachových pájecích past není nutné DPS mýt, díky čemuž nevzniká potřeba pořízení mycího stroje na SMT linku a také dochází ke zrychlení procesu výroby. Nevýhodou bezoplachového pájení je však vyšší cena pájecích past.

1.2.2. Šablonový tisk

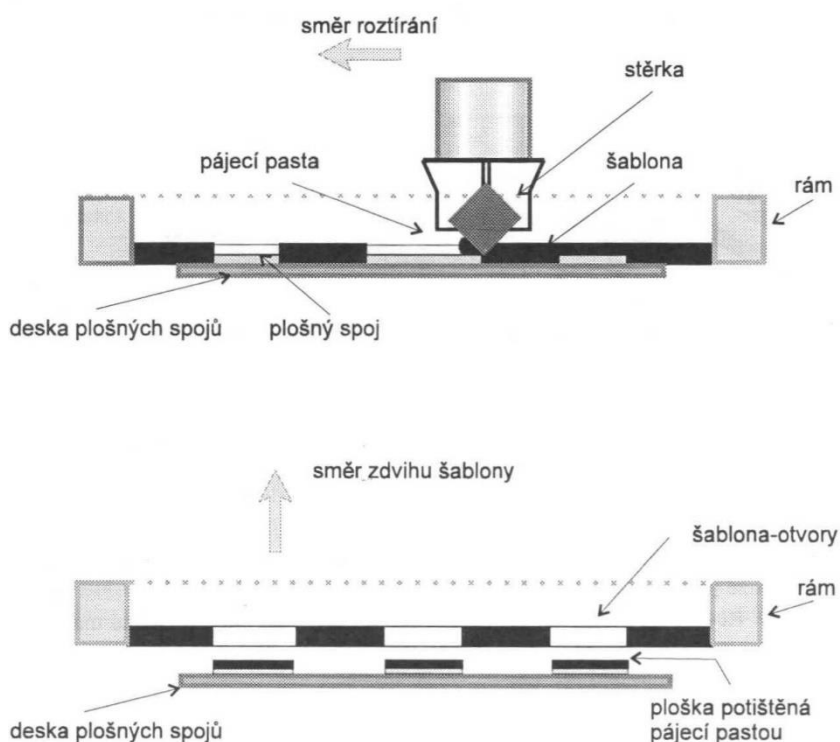
V dnešní době je tisk přes šablonu nejvíce využívanou metodou pro nanášení pájecí pasty na DPS. Nanášení probíhá protlačení pájecí pasty otvory šablony na plošky DPS. Množství nanášené pájecí pasty je určeno velikostí otvoru a závisí na druhu součástky, která bude na dané plošky následně osazena. Šablony jsou vyráběny z odolného materiálu, nejčastěji nerezové oceli, aby byly odolné proti opotřebení způsobeným kovovou stěrkou. Na šablonu může být nanášena ještě ochranná vrstva, tzv. nano coating. Jedná se o povrchovou úpravu, která zajistí lepší ochranu šablony proti poškození stěrkou a také menší přichytávání pájecí pasty v otvorech, díky čemuž bude pájecí pasta nanášena na plošky DPS v požadovaném tvaru. Otvory, kterými je pájecí pasta protlačována na DPS, jsou do šablony řezány laserem, nebo leptány.

Vzhledem k výšce šablony, která se pohybuje od 120 do 150 mikrometrů a se kterou přímo souvisí množství nanášené pasty, je nutné zafixování šablony do rámu, který zabraňuje prohýbání a zajišťuje tak vyšší kvalitu nanášení pájecí pasty. Ke snížení prohýbání slouží také tzv. toolingy, což jsou pevné formy, které tlakem na desky plošných spojů ze spodní strany docílí rovnoměrného kontaktu šablony a DPS.

Parametry ovlivňující kvalitu nanesení pájecí pasty jsou kromě tlaku na šablonu a DPS také tlak stěrky a rychlost jejího pohybu. Nanášení může ovlivnit také směr tisku a rychlost oddělení šablony od DPS po dokončení tisku. Na kvalitu tisku přes šablonu má výrazný vliv také viskozita pájecí pasty, která může být ovlivněna teplotou při skladování i při samotném tisku.

Jakmile je proces nanášení pájecí pasty dokončen, je DPS pomocí dopravníku dopravena na optickou kontrolu množství nanesené pájecí pasty. Po každém použití je šablona automaticky čištěna ze spodní strany speciálním papírem, neboť zde mohou zůstat zbytky pájecí pasty, které by zabránily rovnoměrnému kontaktu šablony a následující DPS. Po určitém počtu použití dochází k důkladnému čištění šablony v myčce se speciálním roztokem, aby byla zajištěna dostatečná kvalita v procesu nanášení pájecí pasty. Aby nedocházelo k prostojům celé linky, je použita šablona náhradní, která zároveň slouží jako alternativa v případě poškození šablony primární.

Výhody šablonového tisku oproti sítotisku jsou především vyšší odolnost šablony proti opotřebení a s tím související doba životnosti. Díky lepšímu soutuisku šablony a DPS dochází k vyšší kvalitě nanesení pájecí pasty oproti sítotisku. Kvůli pevnosti šablony je výhodou šablony také tisk jemnějších motivů na DPS.



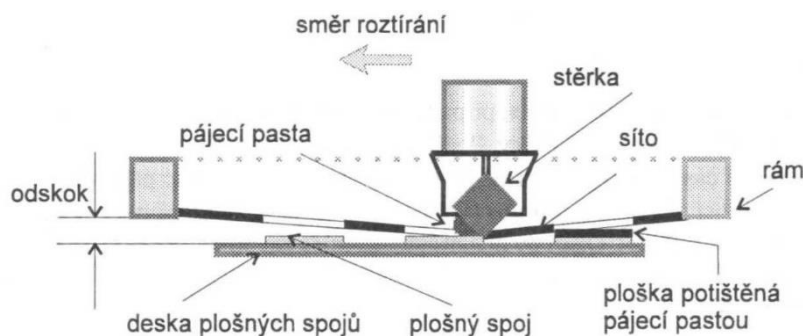
Obr. 2 Šablonový tisk [2]

1.2.1. Síťotisk

Další metoda pro nanášení pájecí pasty je tisk přes síto. Pro výrobu síťovin se využívá nejčastěji polyester. Motiv síta je vytvářen na síťovinu vypnutou v rámu a na níž se nanese fotocitlivá emulze. Podle plošek na DPS, tedy míst pro nanášení pájecí pasty, je přiložen požadovaný obrazec. Následně pomocí UV záření fotocitlivá vrstva exponuje a motiv se vyvolá.

Princip nanášení pomocí síťotisku je pak podobný jako u tisku přes šablonu s výjimkou toho, že síto se při nanášení prohýbá. Rozdíl je také v materiálu stěrky, která je vyrobena z polyuretanu, neboť je síto na rozdíl od šablony méně odolné.

Výhodou síťotisku oproti šablonovému tisku jsou nižší pořizovací náklady na výrobu síta. Pomocí síťotisku je také možné tisknout větší plochy, které by v případě tisku pájecí pasty přes šablonu mohly být problémové kvůli dostatečné pevnosti šablony. Oproti šablonovému tisku pak může síťotisk dosahovat vyšší rychlosti roztírání pájecí pasty.



Obr. 3 Síťotisk [2]

1.2.2. Dispenze

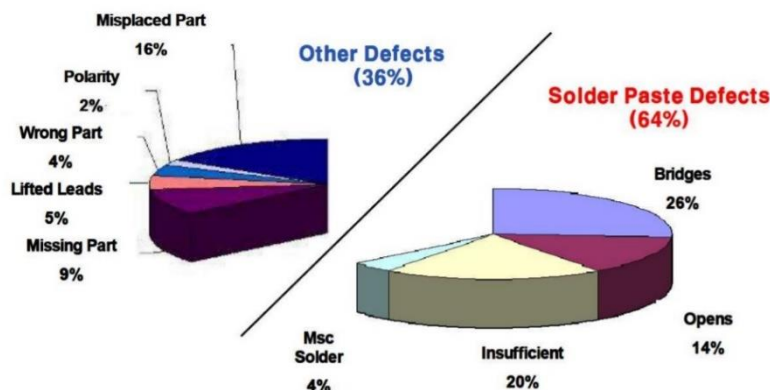
Třetí možností nanášení pájecí pasty je automatická dispenze. Pájecí pasta je nanášena na plošky desky plošných spojů ze zásobníku pomocí dávkovací trysky. Ta je součástí dispenzní hlavy, která zajišťuje pohyb na předem definované pozice. Kromě pozic je definované také přesné množství pájecí pasty, které je dáno velikostí plošky, a teplota pájecí pasty, která ovlivňuje její viskozitu. Deska plošných spojů je fixně upevněna, aby nedocházelo k nepřesnostem při nanášení pájecí pasty. Dispenzní metoda nanášení pájecí pasty je využívána především u výroby malých sérií.



Obr. 4 Automatický dispenzer [3]

1.3. Inspekce pájecí pasty (SPI)

Kontrola nanesení pájecí pasty je velmi důležitým krokem v automatické výrobě DPS. Jak je patrné z Obr. 5, většina chyb vzniká právě kvůli nesprávnému nanesení pájecí pasty. Proto je po tomto kroku zavedena kontrola kvality nanesení pájecí pasty, kterou provádí SPI.

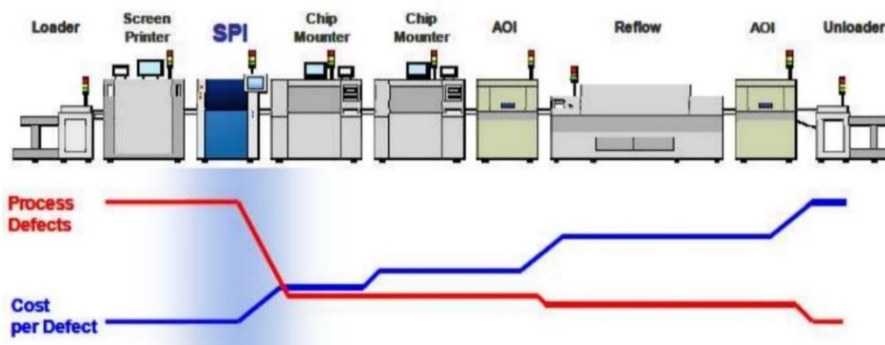


Obr. 5 Podíl vzniku vad vlivem nesprávného nanášení pájecí pasty [4]

Nejčastěji jsou využívány dva typy inspekce pájecí pasty. První metoda využívá laserový paprsek, pomocí jehož odrazu je měřena vzdálenost mezi nanesenou pájecí pastou a senzorem snímajícím paprsek. Nevýhoda této metody je však zrkadlení nežádoucími odrazy, neboť DPS není tvarově homogenní. Druhá metoda využívá optický efekt zvaný moaré, kdy dochází pomocí světelného zdroje pod určitým úhlem k projekci mřížky na kontrolované místo. Z důvodu projekce pod úhlem však není možné kontrolovat zastíněnou část. Proto jsou u této metody vždy minimálně dva světelné zdroje, případně více. Tvar mřížky vytvořený na nanesené pájecí pastě je snímán kamerou a pomocí výpočtu je vypočítán přesný objem pájecí pasty. Obě metody disponují možností převedení výpočtu do grafické podoby jako na Obr. 8. [5]

Nastavení parametrů kontroly probíhá určením tolerancí, kdy jsou nastaveny meze pro jednotlivé rozměry. Nastavení může probíhat globálně pro celou DPS, případně lze provést speciální nastavení pro určité plošky desky plošných spojů. K tomuto kroku dochází v případech, kdy je potřeba nastavit přísnější kritéria hodnocení problematických plošek, nebo naopak benevolentnější při kontrole plošek, u kterých je potenciál na případnou chybu nízký.

V průběhu výroby na SMT lince klesá počet vytvářených chyb, naopak rostou náklady s těmito vadami spojené, což je průkazné z Obr. 6. Proto je důležité detekovat chyby co nejdříve a díky tomu zabránit nežádoucím nákladům spojeným s opravami nebo vyřazením celé DPS z výrobního procesu.



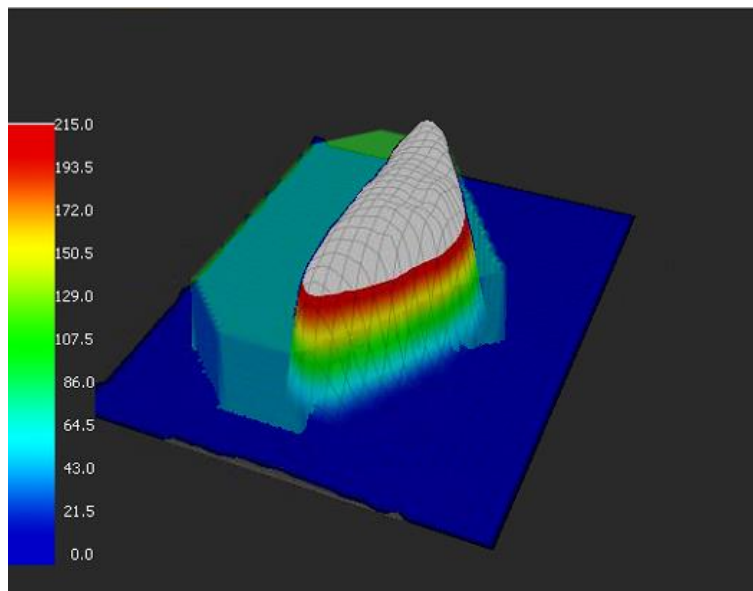
Obr. 6 Růst nákladů spojených s vadou a pokles vzniku vad na SMT lince [4]

Na Obr. 7 je znázorněna kontrola správně nanesené pájecí pasty. DPS tak může vstoupit do dalšího procesu SMT linky, kterým je osazení SMD součástkami. V případě nalezení potenciálních chyb inspekční kontrolou je operátor upozorněn a musí překontrolovat danou vadu.



Obr. 7 Úspěšná kontrola SPI [6]

Obr. 8 znázorňuje detekované nesprávné nanesení pájecí pasty na plošku DPS pomocí 3D modelu. K sériovému číslu DPS s nesprávným nanesením pasty je pak přiřazen status NOK kus a DPS je tak vyřazena z dalších procesů výroby. Barevná škála na obrázku znázorňuje hranice tolerance pro posuzování správnosti naneseného množství a tvaru pájecí pasty. Světle zelený model pak zobrazuje optimální množství pájecí pasty.



Obr. 8 Chyba nanesení pájecí pasty detekovaná SPI [6]

1.4. Osazení součástkami

Po úspěšné inspekci nanesení pájecí pasty dochází k osazení DPS součástkami. V současné době jsou osazovány kromě SMD součástek také součástky pro průchozí montáž.

1.4.1. Metody osazování

Osazování se dělí podle typu DPS, které mohou být osazovány součástkami pouze z jedné strany, nebo z obou stran. Takto osazené DPS mohou být dodatečně osazeny součástkami s vývody pro průchozí montáž, případně je v dnešní době využívána metoda Pin-in-Paste (PIP).

Osazování jednostranných desek je nejjednodušší metodou. Na osazované straně mohou být veškeré typy součástek a po dokončení výroby na SMT lince je DPS přesunuta buď na THT linku pro osazení součástkami pro průchozí montáž, nebo přímo ke kontrole elektrických vlastností.

V případě oboustranné montáže SMD součástek jsou zpravidla na první stranu umístěny menší a lehčí součástky. Po kompletním procesu výroby první strany vstupuje DPS znovu od začátku SMT linky do výroby a je osazena druhá strana zbylými součástkami. Součástky již osazené první strany jsou umístěné na spodní straně DPS. Při procesu přetavení pájecí pasty druhé strany se však díky svým rozměrům a vahám neuvolní. Stejně jako u jednostranné montáže jsou oboustranně osazené DPS přesunuty buď na THT linku, nebo přímo ke kontrole elektrických vlastností.

V poslední době však dochází k redukci THT výroby a přesunu k Pin-in-Paste metodě osazování. Jedná se o osazování součástek pro THT montáž osazovaných na SMT lince. Aby bylo množství pájky dostatečné, je pájecí pasta nanášena také do okolí pokoveného otvoru i do samotného otvoru, do kterého je následně vsazen pin součástky. Při přetavení vzlíná pájecí pasta z okolí k pinu a dochází k jeho zapájení. Tato metoda pájení se nazývá intruzivní pájení.

1.4.2. Osazovací automat

Úkolem osazovacích automatů je osazení součástky ze zásobníku na přesně definované místo na DPS. K uchycení součástky jsou využívány vakuové pipety, které pomocí podtlaku uchopí součástku, hlava osazovacího automatu se následně pomocí pohybu dvěma směry přesune do optimální polohy a pipeta následně součástku uvolní do nanesené pájecí pasty. Součástí osazovací hlavy bývá více pipet, což zrychluje celý proces osazování. V případě potřeby pipety jiných rozměrů, kvůli velikosti součástek, je součástí osazovacího automatu paleta s náhradními pipetami různých velikostí, kde si osazovací hlava podle nastavení vybrané pipety mění. Ke zrychlení procesu osazování, který z celého procesu výroby na SMT lince trvá nejdéle, napomáhá také umístění více osazovacích automatů za sebou.

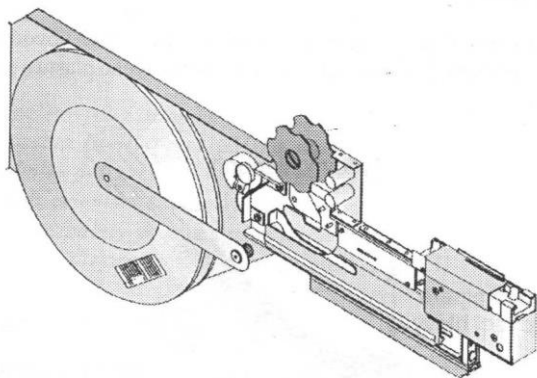
1.4.3. Zásobníky součástek

Pro osazovací automaty je nutné příprava SMD součástek do zásobníků, ze kterých si budou pipety součástky odebírat. Zásobníky mohou být buď pásové, tyčové nebo paletové.

Pásové zásobníky jsou nejčastěji využívanou metodou přípravy SMD součástek k osazení. Do zásobníků jsou umístěny kotouče se součástkami, ze kterých se postupně pomocí vakuové pipety osazovacího automatu součástky odebírají. Šířka zásobníků závisí na šířce kotouče umístěného v pásovém zásobníku. Po osazení všech součástek z kotouče je možné snadno zásobník vyjmout a nahradit jiným zásobníkem se stejným typem součástek. Kromě snadné výměny je výhodou také fixní poloha součástek v kotouči, což je důležité především při osazování součástek s polaritou. Po odebrání součástky z kotouče je pásovým zásobníkem kotouč odvinut o definovanou vzdálenost podle velikosti dané součástky a zároveň je z vrchní strany kotouče odvinuta krycí folie ze součástky následující, kterou tak připraví k osazení.

Tyčové zásobníky jsou využívány především pro integrované obvody s nižším počtem pinů. Pohyb součástek v tyčovém zásobníku je zajištěn pomocí vibrační jednotky, která součástky posouvá až do místa, odkud může být součástka odebrána pomocí vakuové pipety.

Paletové zásobníky jsou využívány především u rozměrově velkých procesorů a integrovaných obvodů s velkým počtem pinů. Díky paletovým zásobníkům jsou piny chráněny proti poškození, především z důvodu ohybu, což by mohlo vést k nesprávnému zapájení daného pinu. [2]



Obr. 9 Pásový zásobník [2]



Obr. 10 Tyčový zásobník [2]

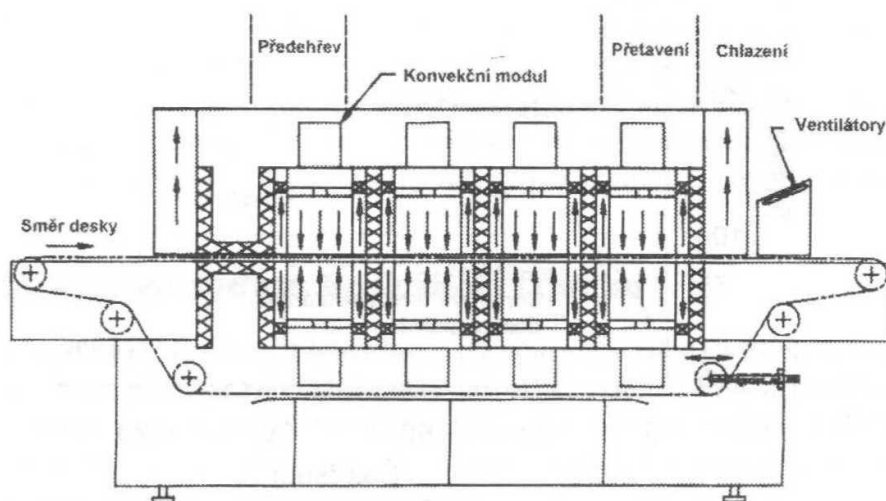
1.5. Pájení přetavením – reflow

Po osazení SMD součástek dochází k přetavení pájecí pasty a zapájení k ploškám DPS. Oproti pájení tekutou pájkou je výhodou pájení přetavením pájení součástek s malou rozteční pinů, u kterých by v opačném případě vznikaly zkraty mezi vývody. Pájení přetavením je možné několika způsoby – ohřevem horkým plynem, ohřevem infračervenými zářiči a laserem.

1.5.1. Ohřev horkým plynem

Ohřev pomocí horkého plynu v pájecí peci je velmi často využívanou metodou přetavení. Používaným plynem bývá nejčastěji vzduch a dusík, který zabraňuje zároveň oxidaci pájených spojů. Nevýhodou užívání dusíku je však jeho cena.

Plyn je ohříván a veden za pomoci trysek na desky plošných spojů, které jsou dopravovány pecí velmi nízkou rychlostí. Pro správné zapájení je velmi důležité nastavení teplotního profilu, který definuje teploty v jednotlivých zónách pájecí pece. Teplota zpočátku pomalu vzrůstá, aby nedocházelo k teplotnímu šoku. Po dosažení vrcholu teplotního profilu dochází k přetavení pájecí pasty a teplota se postupně snižuje.



Obr. 11 Pájecí pec s ohřevem horkým plynem [2]

1.5.2. Přetavení infračervenými zářiči

Při pájení pomocí infračervených zářičů jsou využity infrazářiče s vlnovou délkou 0,1 až 100 mikrometrů. K přetavení dochází díky pohlcení záření a tím ohřátí DPS a zapájení spoje. Nevýhodou této metody je oproti přetavení horkým plynem horší prohřátí DPS z důvodu vyšší závislosti teploty na vlastnostech povrchu DPS – barva, materiál, drsnost. Záření není z tohoto důvodu pohlceno, ale od takto rozdílného povrchu se odrazí. [7]

1.5.3. Pájení laserem

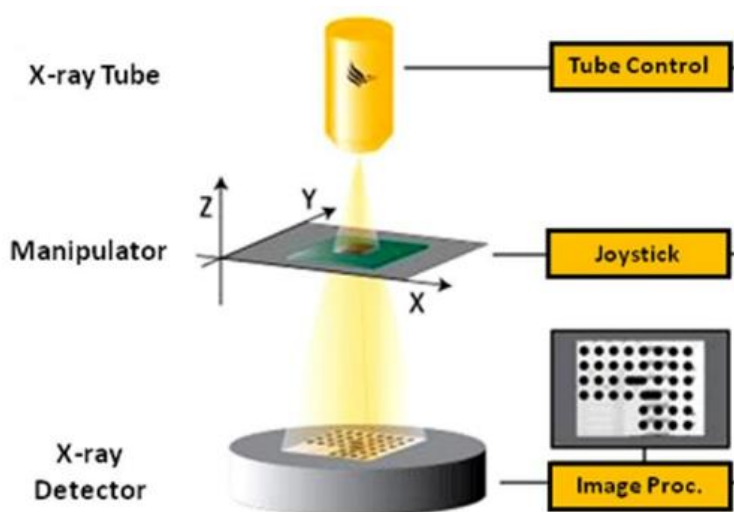
Přetavení pájecí pasty pomocí laseru je způsobeno ohřevem pájecí pasty na teplotu tání, čímž dojde k zapájení. Pájení laserem probíhá selektivně, kdy je laserový svazek postupně směřován na všechny plošky určené k přetavení. Tato metoda je využívána především pro součástky, které jsou náchylné na teplotu anebo pro užívání v malosériové výrobě.

1.6. Automatická optická inspekce – AOI

Automatické optické inspekci a verifikaci výstupů z AOI se detailněji věnuje kapitola 2.

1.7. Automatická rentgenová inspekce – AXI

Rentgenová inspekce se využívá pro kontrolu těch součástek, jejichž kontrola není možná pomocí AOI. Jedná se především o pájené spoje umístěné pod kontrolovanou součástkou, nebo místa, která jsou kvůli jiným komponentům kamerám AOI nedostupná. Díky prosvícení DPS rentgenovým (RTG) paprskem je možné kontrolovat obě strany najednou. AXI se v SMT výrobě využívá také pro detekci poškození součástek, hlavní využití AXI je však pro kontrolu tzv. voidů, což jsou dutinky vznikající uvnitř nebo na povrchu pájených spojů.



Obr. 12 AXI kontrola [8]

1.8. Průchozí montáž – THT

Průchozí montáž stále nachází částečné využití při osazování DPS. Ačkoli byla většina součástek s průchozí montáží nahrazena SMD součástkami a některé součástky s průchozí montáží lze díky PIP metodě osazování také osazovat na SMT lince, existují součástky, které touto metodou stále osazovat nelze – jedná se především o samostatné moduly, konektory a mechanicky namáhané součástky.

Osazení je podobné jako u automatů osazujících SMD součástky, nedochází však k nanášení pájecí pasty a jejímu přetavení, ale pájení tekutou pájkou. Součástky jsou ručně osazeny na vrchní stranu DPS tak, že jejich vývody jsou vyvedeny na straně opačné. Po osazení všech součástek jsou vyčnívající vývody ze spodní strany zapájeny tekutou pájkou. Dříve se pro pájení součástek s průchozí montáží využívaly metody pájení vlnou, vlečením a ponorem, které pro své využití potřebovaly velké množství roztavené pájky, která kontaktovala celou DPS a došlo tak ke kompletnímu zapájení všech průchozích kontaktů. V současnosti, při pájení pouze malého množství součástek s průchozí montáží, se využívá selektivní pájení. Při selektivním pájení je dutou tryskou, kterou proudí roztavená pájka, kontaktován jednotlivě každý vyvedený pin a dochází k postupnému zapájení všech součástek, díky čemuž nedojde ke znečištění celé DPS na rozdíl od předchozích metod. Po zapájení součástek je nutné, stejně jako u povrchové montáže, provést kontrolu kvality zapájení kontaktů.



Obr. 13 Selektivní pájení vlnou [9]

2. Automatická optická inspekce – AOI

Automatická optická inspekce – Automated Optical Inspection (AOI) zajišťuje na SMT lince optickou kontrolu kvality pájených spojů osazených součástek. Požadavky na kvalitu pájení stále rostou a s trendem minimalizace rozměrů součástek získává AOI stále více zájemců. Největšími výhodami oproti pouhé vizuální kontrole lidským okem jsou dozajisté přesnost, opakovatelnost a rychlost kontroly. Zařazení systému AOI je po SPI již druhým kontrolním bodem na SMT lince, neboť včasné zachycení vady zabraňuje navyšování ceny zmetku a tím i celé výroby.

2.1. Proces AOI

AOI je tvořena systémem kamer, zrcátek a osvětlení. Počet zmíněných komponentů je dán typem AOI. Kamery snímají obraz buď ortogonálně, tedy přímo shora dolů, anebo bočně pomocí odrazu zrcátek. Osvětlení je osazené po celém obvodu kamerové hlavy. Její pohyb je zajištěn ve dvou směrech pomocí kolejniček, po kterých se celý kamerový systém posouvá, pohonem může být elektrický motor umístěný u kamerové hlavy, nebo soustava elektromagnetů a permanentních magnetů. Přesun DPS uvnitř AOI je pomocí dopravníků, jejichž počet je dán typem AOI – viz 2.2. Součástí dopravníku je tzv. stopper, který zastaví DPS přesně v takovém místě, kde může být provedena kontrola AOI. Vyhodnocení algoritmů probíhá v počítači, který je součástí AOI a společně s monitorem slouží k obsluze stroje.

Aby mohla být provedena jakákoli kontrola, je nutné vytvoření programu dané DPS. K určení pozic jednotlivých kontrol je nutné znát pozice všech součástek na DPS. Ty jsou získány z dat použitých již v předchozích procesech, kde bylo nutné přesné zadání souřadnic (osazovací automaty). Pro použití AOI je nyní třeba získat snímky osazené referenční DPS, podle které budou nastaveny parametry kontroly. Ty se nastavují v závislosti na tvaru pouzdra, případně součástky, aby byly případně odhaleny veškeré detekovatelné vady. Pro každou součástku je tak možné nastavit různý počet kontrol.

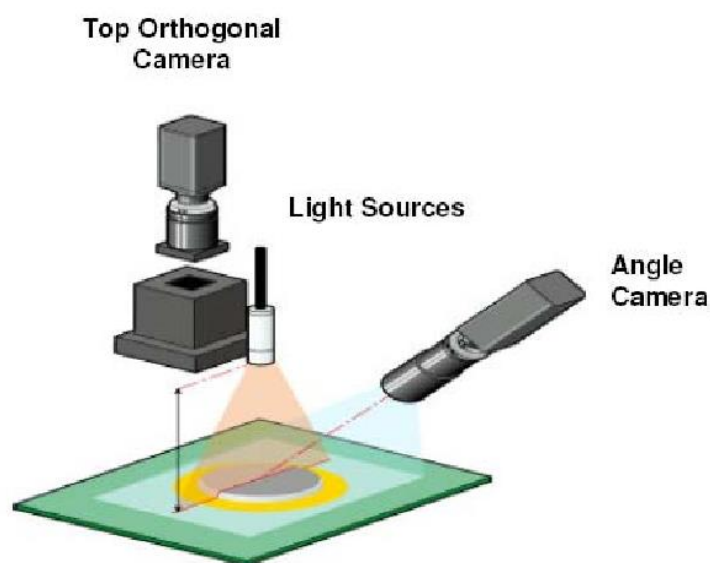
Po nastavení kontrolních algoritmů na referenční DPS je nyní možné kontrolovat vyráběné DPS stejného typu. DPS jsou po procesu pájení dopraveny na AOI a pomocí kamer jsou vytvářeny snímky potřebné pro jednotlivé kontroly. Pomocí výpočetních algoritmů jsou následně hodnoty porovnávány s hodnotami referenční DPS a v případě neshody jsou na monitoru zobrazeny detekované chyby.

AOI pracuje s obrazovou kontrolou kamerami zachycených snímků součástek osazených na DPS. Princip AOI je založen na odrazu světla do kamery, neboť světlo se při dopadu na DPS, součástky a pájené spoje odráží. Odražený paprsek do kamery se pak jeví na snímku jako bílý pixel v případě odrazu od kovového povrchu, jako pixel odstínu šedi pak při odrazu od DPS či součástek. Na schopnosti odrazu povrchu má vliv odlesk DPS, součástek a pájky, úhel kamery a zvolená osvětlení DPS. Po pořízení snímků dochází k jejich zpracování pro výpočet algoritmů vedoucích k hodnocení všech kontrol. K hodnocení však může dojít také bez jakýchkoli úprav snímku, je k tomu však třeba dostatečný výpočetní výkon. Základní úpravou snímků je tzv. binarizace, která převede nebarevný snímek na snímek černobílý. Parametrem binarizace je práh přechodu, což je hranice rozdělení různých stupňů šedi na černé a bílé pixely. Pomocí takto zpracovaného obrazu je již možné provádět výpočty a rozhodovat o kvalitě pájení při srovnání s referenční DPS. Práh akceptovatelnosti výsledku je tzv. threshold, který definuje hranici, podle které bude daná kontrola vyhodnocena jako OK, nebo NOK.

Nastavení kontrolních metod je velmi variabilní a je nutné je nastavit co nejlépe, aby nedocházelo k chybám AOI. Kontroly je možné upravovat kromě nastavení parametrů algoritmů také výběrem použité kamery a osvětlení. V případě nesprávného nastavení je možné tyto chyby odladit. Cílem ladění je nastavení parametrů AOI, aby došlo k zachycení všech reálných chyb a nedetekování tzv. pseudochyb – reálné chyby jsou skutečné vady na DPS, zatímco pseudochyby jsou nesprávně detekované vady pájených spojů automatickou optickou inspekcí.

Při procesu AOI jsou detekované chyby řazeny podle četnosti pomocí Paretova diagramu – nejčetnější chyby jsou na prvním místě. Na tyto chyby by se měla osoba, který provádí ladění, zaměřit a v případě nesprávně nastavených kontrol parametry upravit. Po správném odladění by již k detekci daných pseudochyb nemělo docházet, díky čemu se zvedne rychlost procesu kontroly, neboť DPS již nebudou chybně označeny za NOK kusy a snižuje se tak nutnost verifikace operátorem. Míra odladění je měřena pomocí tzv. First Time Pass (FTP), který udává počet DPS z určitého statistického vzorku, u nichž nebyla na AOI detekována žádná chyba.

Pro správnou činnost AOI je třeba po určité době kalibrovat měřící sestavu. Provádí se kalibrace polohy, aby měření bylo přesné a nevznikaly odchylky ve vzdálenostech, a kalibrace stupňů šedi, která je velmi důležitá při zpracování obrazu a následných výpočtech.



Obr. 14 Princip AOI [10]

2.2. Rozdělení AOI

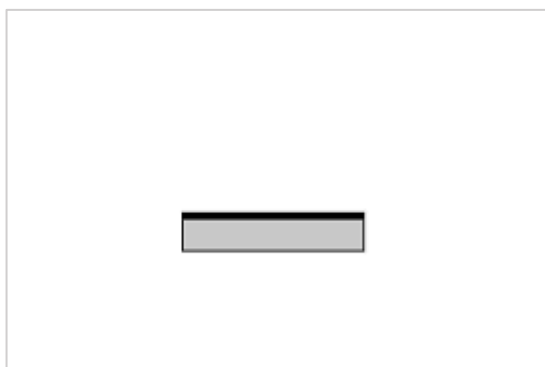
Vývoj AOI se od prvních automatických optických inspekcí posunul výrazně kupředu. Zrychlení procesu AOI, spojené se snížením času kontroly, je při trendu automatizace významným krokem vpřed. Snížení času kontroly nastalo díky zrychlení výpočetního procesu a zrychlení pohybu hlavy AOI. Především však došlo ke zvýšení kvality u kamer snímajících DPS.

V současné době je možné k detekci kvality osazení DPS využití více druhů kamerových systémů. Rozdíly vznikají v kvalitě pořizovaných snímků, jejich barvě (barevné a černobílé) a také možnosti vytvoření z daných snímků 3D model pro zvýšení možností kontroly.

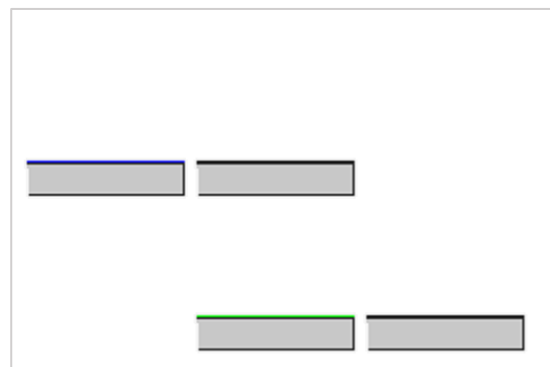
Vyšší kvalita snímků je důležitá pro kontrolu některých míst, kde je potřeba lepší rozlišení ke správnému hodnocení. Kvalita snímku však souvisí s datovou náročností zpracování snímku, což má za důsledek zvýšení času kontroly. Proto bývá nastavení vyššího rozlišení snímků pouze lokální, nikoli na celou DPS.

V případech kontroly těžko přístupných míst a problematických součástek z pohledu detekce AOI je možné využít kombinovaný systém AOI s rentgenovou kontrolou. Výhodou oproti samostatné AXI kontrole je kontinuita výroby a tím i její zrychlení. Detekovaná DPS nejprve podstoupí optickou kontrolu AOI a následně je pomocí dopravníku přesunuta na AXI kontrolu. Pokud je na jedné z kontrol nalezena potenciální vada, je DPS dopravena na verifikační pracoviště pro kontrolu operátorem.

Automatické optické inspekce se dále dělí podle počtu disponujících dopravníků. U AOI s jedním dopravníkem (single track) je DPS dopravena na kontrolní místo, zastavena stopperem a upevněna, aby nedocházelo k pohybu DPS během kontroly, neboť pohyb hlavy AOI způsobuje vibrace. Po dokončení kontroly se přesouvá DPS směrem z AOI a na kontrolu je do AOI dopravena další DPS. Proces AOI se dvěma dopravníky (double track) se liší v tom, že AOI disponuje dvěma statickými dopravníky rovnoběžně vedle sebe a dvěma pohyblivými dopravníky. První DPS je dopravena do AOI na první pohyblivý dopravník, ten dopraví danou DPS na neobsazený statický dopravník. Tam je deska stopperem zastavena a upevněna, čímž je připravena ke kontrole. Při kontrole první DPS mezitím dopraví první pohyblivý dopravník druhou DPS na druhý statický dopravník, kde je DPS opět zastavena stopperem, upevněna a připravena ke kontrole. Po dokončení kontroly první DPS je okamžitě započata kontrola druhé DPS a první DPS je dopravena pomocí druhého pohyblivého dopravníku z AOI. Na její místo je následně dopravena třetí DPS, která bude kontrolována po dokončení kontroly druhé DPS. Využití AOI se dvěma dopravníky výrazně šetří čas a snižuje cycle time, neboť nevznikají prodlevy na dopravu, zastavení a uchycení DPS.



Obr. 15 AOI Single track [6]



Obr. 16 AOI Double track [6]

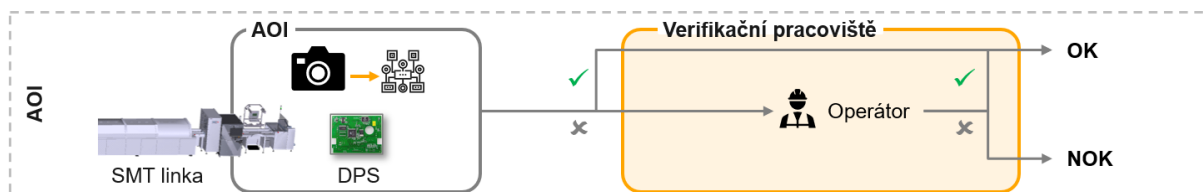
2.3. Verifikace výsledků

Při hodnocení AOI jsou detekovány potenciální vady, které mohou být buď reálné chyby, nebo pseudochyby. Vznik pseudochyb je způsoben nesprávným nastavením hodnotících algoritmů, které vzniká z několika důvodů. Prvním důvodem je přísně nastavená kvalita kontroly vad, tedy hranice hodnoceného parametru mezi OK a NOK kusem. Další problém nastává u samotných DPS a součástek na ně osazovaných, neboť jejich vizuální vzhled se může při zásobování novými kusy časem měnit a ovlivnit tak hodnocení AOI – hodnocení mohou ovlivnit například odstín DPS, odstín součástek, změna značení polarit a jiné. Další příčinou vzniku pseudochyb je opotřebení samotného stroje AOI, díky čemuž neměří přesné hodnoty. Tuto závadu lze však potlačit pomocí kalibrací stroje. Vznik pseudochyb je zapříčiněn bezpochyby také díky chybám lidského faktoru, kdy jsou hodnoty kontrol nastaveny nesprávně.

Kromě špatných označení OK kusů DPS jako NOK kusy obsahující vadu, chybje AOI také v opačném případě. Tento problém je však významně větší, neboť v předchozím stavu bylo možné opravit chybu AOI operátorem, ale v tomto případě DPS označená jako OK kus míří přímo do magazínu s OK kusy. Vznikají tak úniky vadných DPS do další fáze výroby, čímž roste jejich cena a rostou také náklady na opravu, případně šrotování. V horším případě nebude vada DPS detekována ani v dalších fázích výroby a problém nastane až u zákazníka, kdy vznikají obrovské náklady spojené s reklamací. Z toho důvodu je nutné v co nejvyšší míře eliminovat úniky vadných kusů z SMT linky.

Aby nedocházelo k únikům vadných kusů ani ke vzniku pseudochyb, je důležité především nastavit vhodná kritéria hodnocení AOI. Příliš přísná kritéria však způsobují vznik pseudochyb a snížení FTP, naopak benevolentní hodnocení způsobuje úniky vadných kusů. Pro optimální nastavení je tak potřeba nastavit kompromisní hodnocení, které bude co nejvíce eliminovat oba stavy.

Operátor na verifikačním pracovišti, které je na SMT lince umístěno za AOI, verifikuje výsledky hodnocení AOI. V případě, že danou chybu vyhodnotí jako pseudochybu, je deska dopravena do magazínu s OK kusy a může být použita v další fázi výroby. Pokud však operátor rozhodne, že se jedná o reálnou chybu, DPS míří do magazínu s NOK kusy. Operátor také rozhodne, o jakou konkrétní reálnou chybu se jedná. Magazín s NOK kusy je následně dopraven na analytické pracoviště, kde analytičtí pracovníci rozhodují, zda jsou vady na těchto DPS opravitelné. V případě opravení vady jsou DPS dále použity v další fázi výroby. Pokud je však vada neopravitelná nebo je na DPS velký počet vad, které by se nevyplatilo opravovat, jsou takovéto kusy šrotovány.



Obr. 17 Verifikace výsledků operátorem [1]

Ke zefektivnění výroby je možné sloučit více verifikačních pracovišť jednotlivých SMT linek na tzv. multiverifikační pracoviště, kam jsou posílány výstupy z AOI těchto SMT linek. Operátoři na takovémto pracovišti klasifikují potenciální vady vzdáleně a v případě potřeby se mohou jít na danou SMT linku podívat osobně a vyhodnotit konkrétní vadu.

Také u operátorů, stejně jako u AOI, vznikají chyby klasifikace, kdy operátor označí reálnou chybu jako pseudochybu a naopak. Možným řešením eliminace těchto chyb by mohlo být užití umělé inteligence při verifikaci výsledků – projekt Magic AOI.

2.4. Základní typy SMD a detekce jejich vad pomocí AOI

Z pohledu zapouzdření se SMD součástky dělí do mnoha skupin. Jednotlivé skupiny pak zastupují různé typy součástek různých velikostí. Podle typu pouzdra jsou jednotlivým skupinám přiřazeny druhy kontrol parametrů. Některé kontroly jsou pro všechna pouzdra jednotné, další kontroly jsou pak závislé na konkrétním pouzdru, případně konkrétní součástce. Existují však i parametry, které není možné kontrolovat pomocí AOI.

Společné kontroly pro všechny typy zapouzdření:

- detekce osazení součástky;
- posun nebo rotace součástky;
- zapájení součástky;
- množství pájky (přebytek, nedostatek, absence);
- mechanické poškození součástky;
- kuličky pájky v blízkosti pájených spojů.

Detekce osazení součástky kontroluje přítomnost součástky na dané pozici DPS. K chybám neosazení dochází především při přemístění pipetou ze zásobníku na DPS při osazování. Součástka tak není osazena a zároveň může způsobit vady v místě dopadu. Kontrola zapájení detekuje, zda je daná osazená součástka správně zapájená – kontroluje se tvar menisku. Posunutí a rotace součástky mimo plošky však závisí na toleranci hodnocení, neboť mírné vychýlení od pájecích plošek je stále tolerováno. V případě většího vychýlení však může dojít k nesprávné funkčnosti součástky, nebo zkratu v případě malých plošek. Vady vzniklé nesprávným množstvím pájky jsou spojené především s nanášením pájecí pasty. Eliminace těchto chyb je tak možná nastavením parametrů tisku pájecí pasty, případně úpravou šablony (síta). Mechanické poškození součástek vzniká z mnoha důvodů působení mechanických sil.

Parametry, které nelze kontrolovat pomocí AOI:

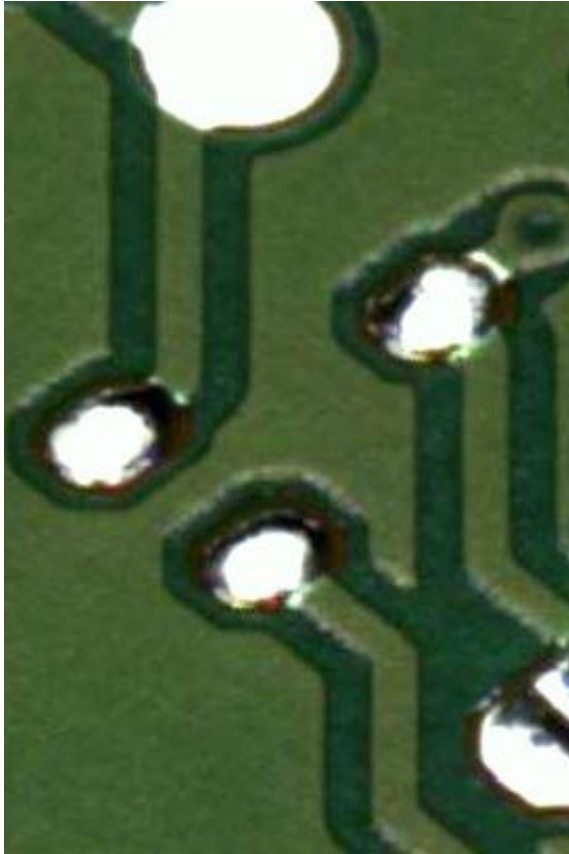
- hodnota/typ součástky;
- kontaminace;
- kuličky pájky na DPS;
- zkratky a nezapájení pod součástkou.

Detekce hodnoty ani typu součástky není možné provést pomocí AOI. Existuje totiž velké množství typů součástek s různými druhy značení. Některé součástky pak vzhledem ke svým rozměrům nejsou značeny vůbec. Kontaminace DPS nežádoucí látkou (nejčastěji kapalné látky z pájecí pece při procesu přetavení) je kontrolovatelná pouze v blízkosti pájených spojů, které podléhají kontrole. Stejně tak přítomnost kuliček pájky na DPS lze kontrolovat pouze v kontrolovaných oblastech DPS. Kuličky pájky jsou vadou, která by v případě úniku z SMT linky mohla způsobit nežádoucí komplikace, neboť se jedná o vodivé předměty, které mohou v případě uvolnění způsobit zkrat. Detekce zkratů a zapájení kontaktů pod součástkou je pomocí AOI nerealizovatelné. Pro detekci těchto vad se využívá AXI s rentgenovým zářením.

Základní typy SMD pouzder:

- *CC/CR* – jedná se o součástky obdélníkového tvaru se dvěma kontakty. Vady vznikající u tohoto pouzdra jsou snadno detekovatelné. Častými vadami jsou tzv. náhrobní kámen (tombstone), tedy zapájení pouze jednoho kontaktu, druhý je zvednutý nad DPS, a postavení součástky na bok (billboard), případně úplné otočení vzhůru nohama;
- *SOD* – také součástky obdélníkového tvaru se dvěma kontakty. Oproti *CC/CR* však bývá jeden z kontaktů označený znaménkem polarit. Z pohledu detekce se jedná o komplikaci, neboť se značení může časem měnit na jiný typ (značení polarit může být pomocí barvy na těle součástky, gravírování značky nebo zkosení hrany u značeného kontaktu);
- *SOT, SOIC, QFP* – součástky tohoto typu bývají obdélníkového nebo čtvercového tvaru s více než dvěma vývody vyvedenými mimo tělo součástky. Na těle součástky bývá označení prvního pinu kvůli správné orientaci. Podobně jako u *SOD* pouzder tak nastává problematika s kontrolou polarit. Kvůli většímu počtu pinů je u těchto komponentů nastavena také kontrola prostorů mezi jednotlivými piny, která detekuje přítomnost zkratů (můstků). Vzhledem k vyvedeným pinům malých roztečí může docházet k ohybům těchto pinů, což může způsobit nedostatečné zapájení, nebo úplné nezapájení pinu. Proto tuto kontrolu je nutné detekovat součástky bočním pohledem kamery;
- *QFN* – jedná se o podobné součástky jako předchozí skupina. Piny tohoto pouzdra však nejsou vyvedeny mimo tělo, ale jsou přímo součástí těla z boční i spodní strany, kvůli kterým je u tohoto typu nutná rentgenová kontrola, neboť vady vzniklé pod tělem součástky samotné AOI neodhalí. U bočních vývodů je pak nutné kontrolovat, zda nedošlo ke zkratu mezi kontakty součástky nebo plošek DPS;
- *TO-xyz* – tento typ pouzdra bývá obdélníkového nebo čtvercového tvaru se dvěma vývody na jedné straně a chladičí ploškou na spodní straně součástky. Díky tvaru není u tohoto typu nutná kontrola značení polarit nebo prvního pinu. Kvůli vyvedeným pinům je však kontrolováno jejich ohnutí. Pro detekci zapájení a přítomnost voidů je třeba použití rentgenové kontroly;
- *COIL L* – mohutné součástky různého tvaru s dvěma piny na těle komponentu z boční i spodní strany. Kvůli kontrole zapájení kontaktů k ploškám na spodní straně je nutné pořízení rentgenového snímku;
- *ECR/ELKO* – součástky ve tvaru válce zapuštěné do plastového nosiče zajišťujícího stabilitu součástky na DPS. Na vrchní straně součástky se nachází označení polarit. Ze spodní strany jsou naproti sobě v plastovém nosiči vyvedeny dva kontakty. Kvůli velikosti součástek bývá problematická kontrola díky zaostření kamery při detekci. Problémem je také značení polarit, neboť se může v případě jiné série součástek měnit barva, nebo dochází k mírnému pootočení válcové části součástky v plastovém nosiči;
- *BGA* – jedná se o součástky převážně čtvercového tvaru, jejichž vývody jsou pouze ze spodní strany těla. Pro tento typ je tak nutná detekce vad pomocí AXI, která zajistí kontrolu zapájení, přítomnost zkratů a voidů a další. Pomocí AOI lze zkontrolovat pouze přítomnost součástky, její posunutí a označení polarit.

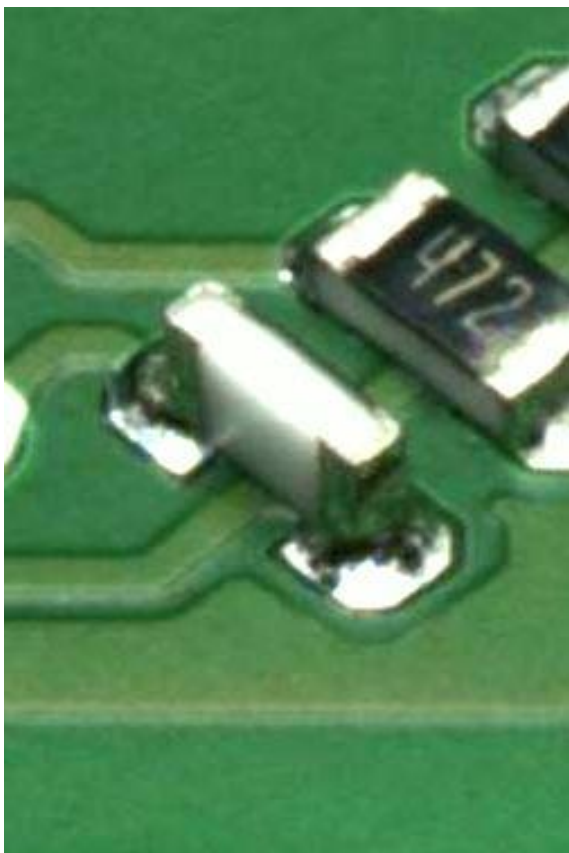
Na Obr. 18 až Obr. 25 jsou uvedeny některé vady pájených spojů objevující se v SMT výrobě.



Obr. 18 Chybějící součástka SOT [6]



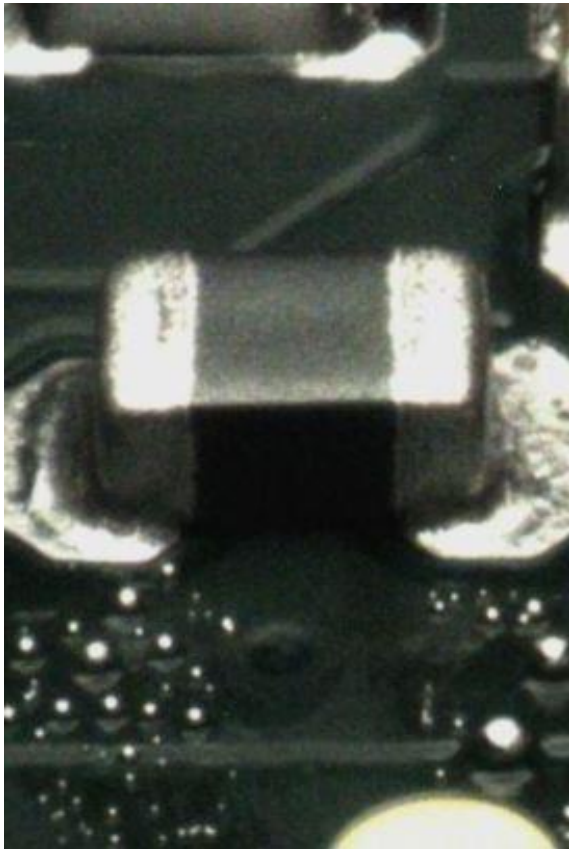
Obr. 19 Posunutá součástka SOD [6]



Obr. 20 Billboard součástky CC/CR [6]



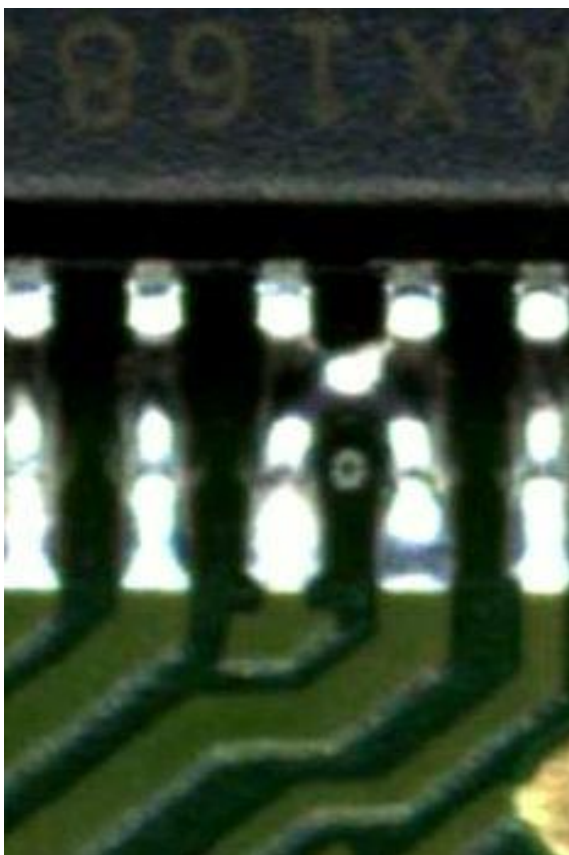
Obr. 21 Tombstone součástky CC/CR [6]



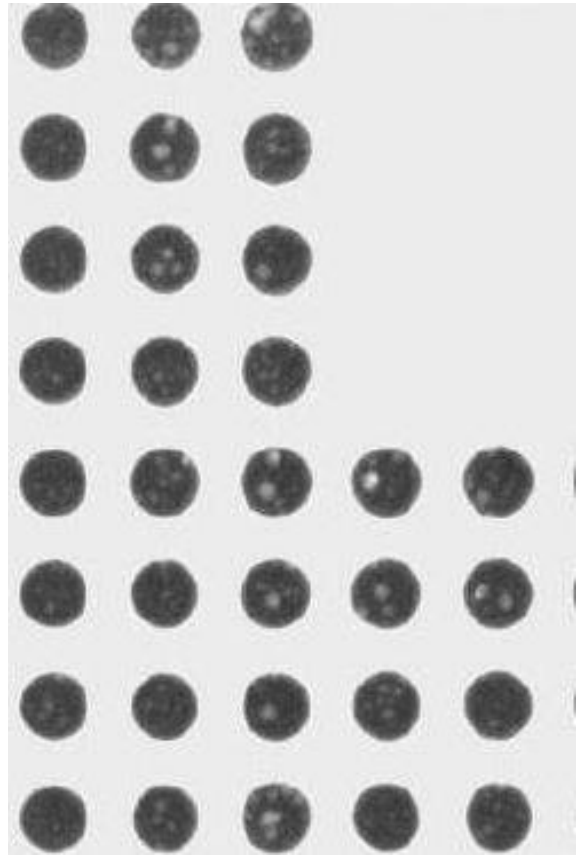
Obr. 22 Kuličky pájky na DPS [6]



Obr. 23 Ohnutý pin součástky QFP [6]



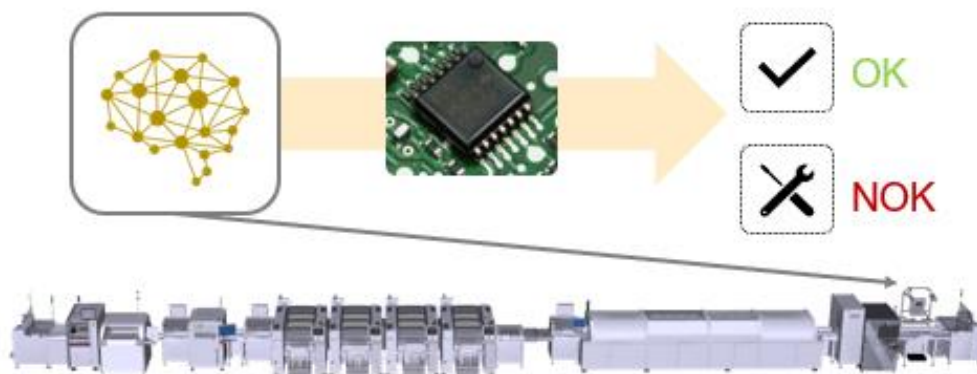
Obr. 24 Zkrat mezi piny součástky SOIC [6]



Obr. 25 Voidy u součástky BGA pomocí AXI [1]

3. Magic AOI

Zařazení umělé inteligence (UI) do procesu osazování desek plošných spojů je dozajisté výborným krokem k automatizaci procesu SMT výroby. Největší prostor ke zlepšení mají na SMT lince bezesporu automatické kontrolní systémy – jedním takovým systémem je projekt Magic AOI, který využívá neuronovou síť k vizuální kontrole potenciálních chyb.



Obr. 26 Aplikace UI na SMT lince [1]

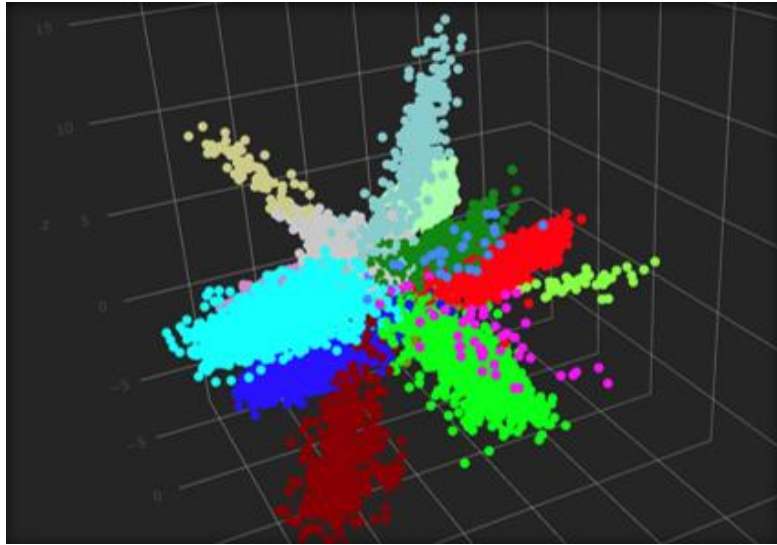
Samotný software s umělou inteligencí pro kontrolu výstupů z automatické optické inspekce je již vytvořen na korporátní úrovni firmy, jedná se tedy o jeho aplikaci v jednom ze závodů. Pro možnost aplikace je nutné důkladné proškolení personálu, učení umělé inteligence správně ohodnocenými daty a následné uvolnění na SMT lince se souhlasem zákazníka, pokud dosahují hodnoty kvalitativního protokolu dostatečné hodnoty.

Aplikaci Magic AOI do plného provozu po souhlasu zákazníka však nedojde k úplnému nahrazení práce operátorů při verifikaci, ale pouze k redukci jejich práce v těch případech, kdy si bude umělá inteligence svými rozhodnutími velmi jistá, že se jedná o pseudochybu – OK kus.

3.1.Princip Magic AOI

Princip Magic AOI je založen na učení umělé inteligence velkým počtem dat, které jsou klasifikovány školenými experty. Ti hodnotí historická data z automatické optické inspekce buď na pseudochyby, nebo reálné chyby. Reálné chyby jsou dále rozděleny do skupin podle konkrétní vady pájení. Těmito ohodnocenými daty je následně umělá inteligence učena, čímž se posilují váhy jednotlivých vláken neuronové sítě. Aby umělá inteligence byla schopna sama klasifikovat dané chyby, je nutné zpracování velkého množství dat.

Na Obr. 27 je 3D grafické zobrazení neuronové sítě, kde barvy zastupují konkrétní skupinu reálných chyb a pseudochyby.

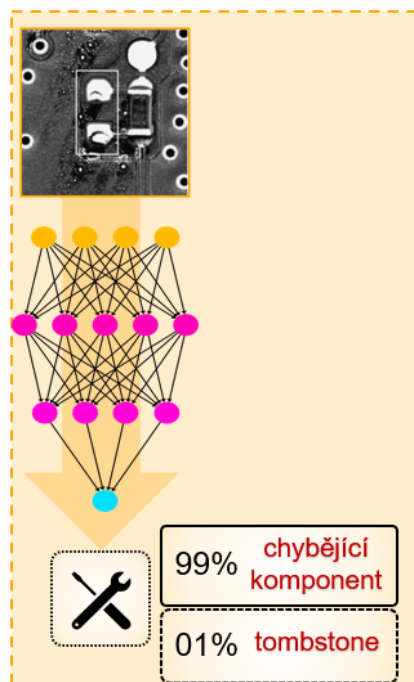


Obr. 27 Grafické zobrazení neuronové sítě [1]

Oproti současné kontrole automatickou optickou inspekcí a následné verifikaci výsledků operátorem, které byly probrány v kapitole 2, přibývá před verifikací výsledků hodnocení umělou inteligencí. Tento krok má za následek redukci výstupů, které musí operátor ohodnotit.

Zatímco u automatické optické inspekce je pevně nastavená mez parametru, která rozděluje kontrolovanou DPS na OK a NOK kus, umělá inteligence pracuje na základě pravděpodobností, které přiřazuje k předdefinovaným skupinám reálných chyb, nebo pseudochybě.

Na Obr. 28 je názorný příklad, kdy umělá inteligence vyhodnotila výstup, že se z 99 % jedná o chybějící komponent a z 1 % o tombstone.



Obr. 28 Verifikace UI [1]

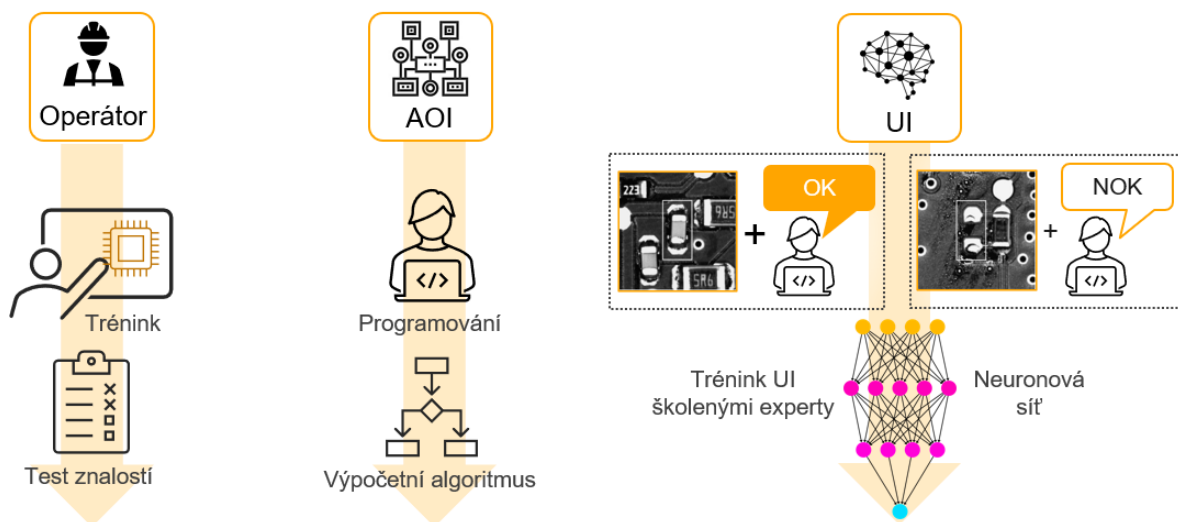
3.2. Učení umělé inteligence

Aby mohli operátoři verifikovat výsledky automatické optické inspekce, je nutné absolvovat trénink kvality pájení podle IPC normy, kde se naučí rozeznávat pseudochyby od reálných chyb. Pro dokončení školení je nutné úspěšné složení závěrečného testu znalostí.

Na rozdíl od práce operátorů je velkou výhodou umělé inteligence absence únavy a ztráty koncentrace. Důležité je také konzistentní hodnocení výsledků, neboť u operátorů dochází ke střídání směn a každý operátor může mít unikátní hodnocení.

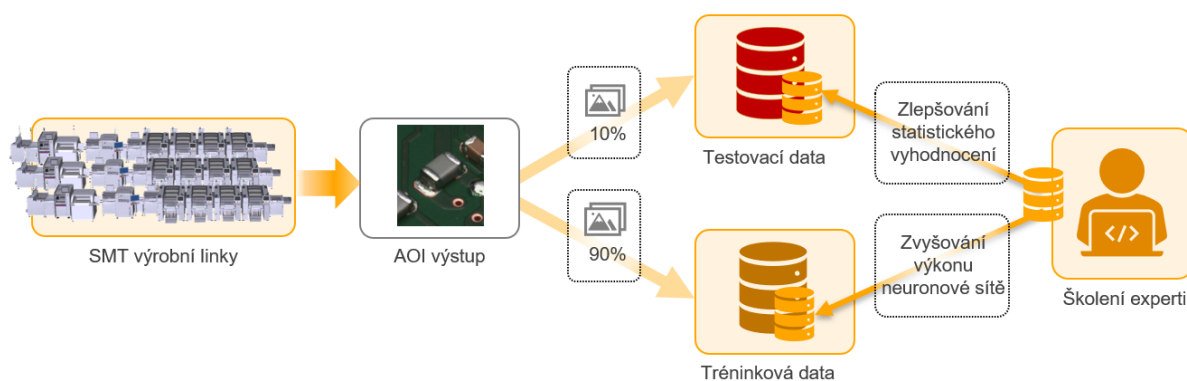
Také experty, kteří budou umělou inteligenci učit, je nutné nejprve důkladně proškolit, k čemuž slouží také trénink kvality pájení podle IPC normy. Experti musí přesně rozeznat pseudochyby od reálných chyb a v případě reálných chyb také správně klasifikovat, do jaké kategorie chyba patří. Tým expertů po proškolení následně může začít hodnotit historická data z automatické optické inspekce, čímž se umělá inteligence postupně učí klasifikovat sama.

Data, která experti hodnotí, byla již klasifikována operátory na SMT lince. Zde však může z různých důvodů docházet k nesprávnému hodnocení. Tým expertů následně tato data kontroluje a v případě nesprávného přiřazení operátorem hodnocení opraví. Expertní klasifikace se k daným datům uloží a umělá inteligence se tak učí správnými daty. Pouzdra součástek jsou rozdělena do skupin podle tvaru, neboť vyhodnocování umělé inteligence je založené na vizuální kontrole. Každá skupina je na sobě nezávislá a její učení probíhá samostatně.



Obr. 29 Učení operátorů, AOI a UI [1]

Určení kvality Magic AOI je možné pomocí testování hodnocení určitého vzorku dat. Veškerá historická data jsou tak rozdělena do dvou skupin – tréninková data a testovací data. Zastoupení tréninkových dat je 90 % a zbylých 10 % dat je použito k testování. Tyto dvě skupiny jsou od sebe separovány, aby protokol o kvalitě použití umělé inteligence byl nezkreslený. Žádná testovací data tedy nejsou použita při tréninku neuronové sítě. Testovací data jsou experty hodnocena nikoli kvůli zvyšování kvality neuronové sítě, ale z důvodu možnosti vygenerování protokolu kvality hodnocení umělou inteligencí. Podíl tréninkových a testovacích dat platí pro každou kategorii hodnocení, tedy pseudochyby a jednotlivých skupin reálných chyb.



Obr. 30 Rozdělení tréninkových a testovacích dat [1]

3.3. Uvolnění Magic AOI na linku

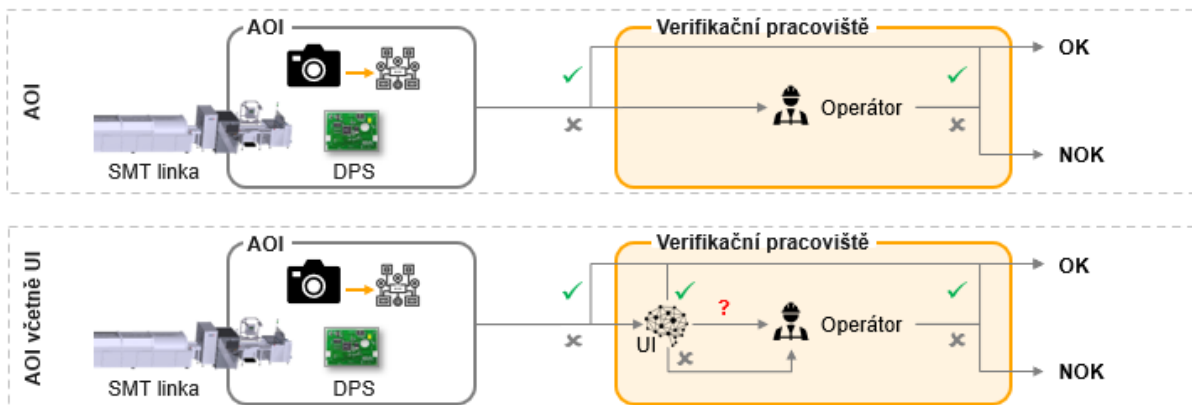
Úplné uvolnění Magic AOI na SMT linku je podmíněno dosažením určité kvality hodnocení, neboť aplikace umělé inteligence před verifikačním pracovištěm by v případě nedostatečné kvality mohlo způsobit únik velkého množství DPS s reálnými chybami, k jejichž zjištění by došlo až v další fázi výroby nebo až u zákazníka.

Splnění kvalitativních podmínek, které jsou součástí interní strategie firmy, je prezentováno v rámci kvalitativního protokolu. Ten ověřuje chyby hodnocení umělé inteligence z důvodu ohodnocení reálné chyby (NOK kus) jako pseudochyby (OK) kus, což má za následek již zmíněný únik vadné DPS do další fáze výroby, nebo v opačném případě ohodnocení pseudochyby jako reálné chyby. Odstranění této chyby umělé inteligence by zvýšilo automatizaci výroby, neboť by daná DPS nemusela být verifikována operátorem. Podmínky protokolu kvality je nutné splnit pro všechny skupiny dat rozdělených podle pouzder. Pokud by některé ze skupin nedosahovaly dostatečné kvality, nemůžou být uvolněny do výroby a je nutné u těchto skupin zvýšit kvalitu učením dalšími daty.

Pro skupiny pouzder, jejichž kvalitativní protokol splňuje požadavky kvality, je třeba získat souhlas zákazníka o uvolnění do výroby. Souhlas zákazníka s užíváním umělé inteligence při výrobě jeho produktů je požadován z důvodu zásahu do procesu výroby. V případě souhlasu pak může být kontrola skupiny, které splnily kvalitativní protokol, spuštěna ve výrobě.

3.4. Hodnocení chyb umělou inteligencí

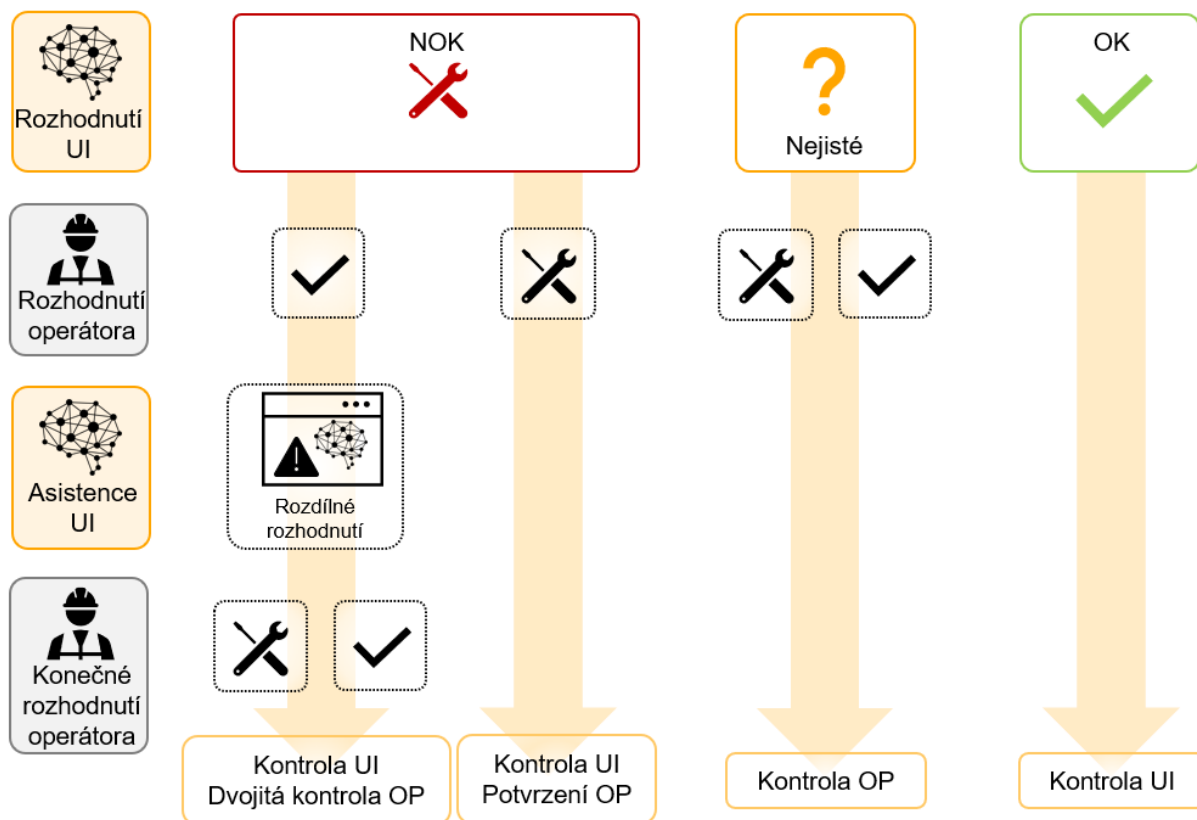
Na Obr. 31 je porovnání dosavadní kontroly automatickou optickou inspekcí s následnou verifikací operátorem a kontroly po aplikaci Magic AOI. Změna se po aplikaci projeví pouze u kusů, které byly AOI vyhodnoceny jako NOK kusy. OK kusy jsou dopravníkem přesunuty do magazínů a pokračují do další fáze výroby. NOK kusy jsou po aplikaci Magic AOI pomocí umělé inteligence klasifikovány do třech skupin, kdy rozhoduje míra pravděpodobnosti přiřazení. V případech, kdy si je umělá inteligence jistá, že se jedná o pseudochybu, označí danou DPS jako OK kus a pomocí dopravníku je umístěna do magazínu s OK kusy. Pokud je vysoká pravděpodobnost, že je detekovaná vada reálnou chybou a jde tedy o NOK kus, případně si umělá inteligence není svým rozhodnutím dostatečně jistá, musí být DPS ohodnocena operátorem na verifikačním pracovišti.



Obr. 31 Inspekce kvality pájení před a po aplikaci Magic AOI [1]

Verifikace při aplikaci Magic AOI je následující:

- Magic AOI ohodnotí potenciální vadu jako pseudochybu. DPS je označena jako OK kus a je přesunuta do magazínu s OK kusy, proběhla tedy pouze kontrola umělou inteligencí, operátor do procesu nestupuje;
- Magic AOI nedokáže s dostatečnou pravděpodobností rozhodnout, zda se jedná o OK, nebo NOK kus. DPS pak musí být podrobena kontrole operátora na verifikačním pracovišti, který musí potenciální vadu klasifikovat. V tomto případě tedy rozhoduje pouze operátor;
- Magic AOI ohodnotí potenciální vadu jako reálnou chybu. DPS je přesunuta na verifikační pracoviště, kde dochází k hodnocení vady operátorem. Pokud operátor ohodnotí DPS jako reálnou chybu shodně jako Magic AOI, je deska označena jako NOK kus a je dopravena do magazínu s NOK kusy. Byla tedy provedena kontrola umělou inteligencí s následným potvrzením operátora. Pokud však operátor vyhodnotí, že se jedná o pseudochybu, umělá inteligence operátora upozorní, že jsou jejich vzájemná rozhodnutí rozdílná. Operátor tak musí danou vadu znovu klasifikovat a své původní rozhodnutí tak může opravit. Toto hodnocení je již konečné a podle něj je DPS dopravena buď do OK, nebo NOK magazínu. V tomto případě tak dochází ke kontrole umělou inteligencí a dvojité kontrole operátorem.



Obr. 32 Verifikace při aplikaci Magic AOI [1]

Po aplikaci Magic AOI na SMT linky je nutné udržovat kvalitu hodnocení umělé inteligence. Průběžně tak dochází k dalšímu učení neuronové sítě, což by se mělo projevit v parametrech protokolu kvality. Kontinuálně také probíhá sledování výkonu neuronové sítě, kdy je předáváno 1 % ze všech výstupů z automatické optické inspekce operátorovi. Díky tomu je možné sledovat odchylky v rozhodování mezi operátorem a Magic AOI. Pokud dosahují odchylky vyšších hodnot, je opět nutné vypracovat protokol kvality.

4. Ekonomické hodnocení

Ekonomické hodnocení aplikace Magic AOI, tedy aplikace umělé inteligence při verifikaci výsledků kontroly automatické optické inspekce, je provedena oproti současnému stavu výroby. Do modelového výpočtu tak vstupují pouze parametry, které mají přímý vliv na změnu nákladů na výrobu v případě aplikace projektu.

4.1. Metody hodnocení ekonomické efektivity projektu

Hodnocení ekonomické efektivity projektu bude provedeno pomocí třech kritérií. Prvním je čistá současná hodnota, druhým vnitřní výnosové procento a posledním doba návratnosti investice. Všechna kritéria využívají pro výpočet hotovostní toky, které budou v modelovém příkladu zastoupeny ročními finančními úsporami oproti současnému stavu výroby.

4.1.1. Čistá současná hodnota – NPV

Výpočet čisté současné hodnoty je založen na součtu všech diskontovaných hotovostních toků souvisejících s hodnoceným projektem za dobu jeho životnosti.

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_z} DCF_t = \sum_{t=0}^{T_z} \frac{CF_t}{(1+r)^t} = -INV + \sum_{t=1}^{T_z} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

<i>NPV</i>	.....	<i>čistá současná hodnota (CZK)</i>
<i>t</i>	.....	<i>daný rok</i>
<i>T_z</i>	.....	<i>doba životnosti (rok)</i>
<i>DCF_t</i>	.....	<i>diskontovaný hotovostní tok v roce t (CZK)</i>
<i>CF_t</i>	.....	<i>hotovostní tok v roce t (CZK)</i>
<i>r</i>	.....	<i>míra diskontu</i>
<i>INV</i>	.....	<i>hotovostní tok v roce 0, počáteční investice (CZK)</i>

Výsledné hodnocení projektu podle kritéria NPV je následující:

- je-li hodnota NPV záporná, nevyplatí se do projektu investovat, neboť současné zhodnocení peněz je z ekonomického hlediska výhodnější;
- je-li hodnota NPV rovna nule, je ekonomický efekt investice do projektu shodný jako současné zhodnocení peněz a výnosnost projektu je tak právě v hodnotě diskontní míry;
- je-li hodnota NPV kladná, vyplatí se do projektu investovat, neboť výnosnost projektu je vyšší než současné zhodnocení peněz v hodnotě diskontní míry.

V případě hodnocení více investičních projektů, které by na sobě byly vzájemně nezávislé, by kromě požadavku kladné hodnoty NPV rozhodovala také výše hodnoty NPV, kdy by byl vybrán projekt s nejvyšší hodnotou NPV, neboť kritériem čisté současné hodnoty je maximalizačním kritériem hodnocení investic.

4.1.2. Vnitřní výnosové procento – IRR

Vnitřní výnosové procento je relativní výnos projektu za dobu jeho životnosti. Zároveň se jedná o míru, při které je čistá současná hodnota rovna nule.

$$\sum_{t=0}^{T_z} \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} = -INV + \sum_{t=1}^{T_z} \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} = 0 \quad (2)$$

t	.....	<i>daný rok</i>
T_z	.....	<i>doba životnosti (rok)</i>
CF_t	.....	<i>hotovostní tok v roce t (CZK)</i>
IRR	.....	<i>vnitřní výnosové procento</i>
INV	.....	<i>hotovostní tok v roce 0, počáteční investice (CZK)</i>

Výsledné hodnocení projektu podle kritéria IRR je následující:

- je-li IRR menší než diskontní míra, nevyplatí se do projektu investovat, neboť současné zhodnocení peněz je z ekonomického hlediska výhodnější;
- je-li IRR rovna diskontní míře, je ekonomický efekt investice do projektu shodný jako současné zhodnocení peněz;
- je-li IRR vyšší než diskontní míra, vyplatí se do projektu investovat, neboť relativní výnos projektu je vyšší než současné zhodnocení peněz.

V případě hodnocení více investičních projektů, které by na sobě byly vzájemně nezávislé, by kromě požadavku vyšší hodnoty IRR, než by byla diskontní míra, rozhodovala také výše hodnoty IRR, kdy by byl vybrán projekt s nejvyšším IRR, neboť kritérium vnitřního výnosového procenta je maximalizačním kritériem hodnocení investic.

4.1.3. Doba návratnosti – PP

Doba návratnosti se rozlišuje na dva druhy podle toho, zda zohledňuje časovou cenu peněz (diskontovaná doba návratnosti), nebo nikoli (prostá doba návratnosti).

Prostá doba návratnosti odpovídá časovému období (nejčastěji roku), kdy se kumulované hotovostní toky (KCF) rovnají investičním výdajům projektu. V případě diskontované doby návratnosti se pak jedná o dobu, kdy se investičním výdajům projektu rovnají kumulované diskontované hotovostní toky (KDCF), které jsou diskontovány diskontní mírou. Doba návratnosti je minimalizačním kritériem.

4.2. Ekonomické vstupy

4.2.1. Kurz EUR/CZK

Licence k užívání Magic AOI byla pořízena ze zahraničí v rámci korporace. Její cena byla v evropské měně (EUR) a bylo nutné převést ji do měny české (CZK), ve které je počítán modelový výpočet. Průměrný roční kurz k 19. listopadu 2021 dosahoval hodnoty 25,754 CZK/EUR. [11]

4.2.2. Doba životnosti projektu

K ekonomickému hodnocení projektu je nutné definovat dobu životnosti tohoto projektu. Vzhledem k době životnosti a době odepisování SMT výrobní linky, která je přímo spjatá s aplikací Magic AOI, bude doba životnosti projektu uvažovaná ve stejné hodnotě jako u SMT výrobní linky, tedy deseti let.

4.2.3. Inflace

V modelovém výpočtu je také nutné zahrnout změnu cenové hladiny peněz v podobě míry inflace. Ta bude v průběhu životnosti procesu ovlivňovat veškeré vstupy kromě nákladů na operátory a inženýry, jejichž změna je dána kolektivní smlouvou. Konkrétně se změna ceny peněz projeví především na růstu cen za energie, materiál a další položky, které vstupují do výrobního procesu SMT linky.

Od roku 2010 je dlouhodobý cíl celkové inflace České národní banky 2 %. S přihlédnutím k inflaci za poslední rok, kdy dosahovala téměř trojnásobku dlouhodobého cíle, a k predikcím ČNB na následující kvartály, bude v modelovém výpočtu počítáno s roční mírou inflace 2,7 %. [12]

4.2.4. Růst mezd

Změna hodnoty peněz ovlivňuje také cenu práce. Proto bude v modelovém výpočtu uvažována meziroční valorizace hrubých mezd, která se odvíjí od sjednaných podmínek v kolektivní smlouvě. Míra valorizace se odráží od míry inflace a v modelovém výpočtu bude počítáno s hodnotou 2,5 %.

4.2.5. Diskont

Vzhledem k tomu, že v modelovém výpočtu se počítá s budoucími nominálními hotovostními toky, kdy na jednotlivé položky působí buď míra inflace, nebo valorizace mezd, je třeba počítat také s nominální diskontní mírou. Pokud by navíc hotovostní toky byly ovlivněny daňovými odpisy, bylo by nutné zahrnout také vliv daně z příjmů. V modelovém výpočtu však k tomuto vlivu nedochází, proto je výpočet nominální diskontní míry podle vzorce (3).

$$r_n = (1 + r_r) * (1 + \alpha) - 1 \quad (3)$$

r_n	.....	<i>nominální míra diskontu</i>
r_r	.....	<i>reálná míra diskontu</i>
α	.....	<i>míra inflace</i>

Výpočet diskontní míry podle způsobu financování firmy můžeme rozdělit třemi způsoby. Pokud je firma financována pouze z vlastního kapitálu, vypočítá se její diskont z modelu oceňování kapitálových aktiv (CAPM): $r = r_f + \beta_L * ERP$. Naopak pokud se jedná o firmu financovanou pouze z cizího kapitálu, diskontní mírou je úroková míra poskytnutého úvěru snížená o efekt tzv. daňového štítu: $r = r_d * (1 - T)$. Většina firem je však financována částečně z vlastního i cizího kapitálu. V takovém případě se diskontní míra vypočítá z váženého průměru nákladů kapitálu – Weighted Average Cost of Capital (WACC).

$$WACC = r_e * \frac{E}{D + E} + r_d * \frac{D}{D + E} * (1 - T) \quad (4)$$

<i>WACC</i>	.....	<i>vážený průměr nákladů kapitálu (Weighted Average Cost of Capital)</i>
<i>E</i>	.....	<i>vlastní kapitál (Equity) (CZK)</i>
<i>r_e</i>	.....	<i>náklady vlastního kapitálu</i>
<i>D</i>	.....	<i>cizí kapitál (Debt) (CZK)</i>
<i>r_d</i>	.....	<i>náklady cizího kapitálu</i>
<i>T</i>	.....	<i>daňová sazba</i>

Náklady vlastního kapitálu se počítají z modelu oceňování kapitálových aktiv – Capital Asset Pricing Model (CAPM). V CAPM modelu se uvažuje pouze systematické riziko trhu, nesystematické riziko lze díky diverzifikaci portfolia zanedbat.

$$r_e = r_f + [\beta_L * (r_m - r_f)] = r_f + \beta_L * ERP \quad (5)$$

<i>r_f</i>	.....	<i>míra bezrizikového výnosu</i>
<i>β_L</i>	.....	<i>beta koeficient zadlužené firmy</i>
<i>r_m</i>	.....	<i>míra tržního výnosu</i>
<i>ERP</i>	.....	<i>riziková prémie (Equity Risk Premium)</i>

Koeficient beta zadlužené firmy je vztažený k určité zadluženosti firmy, tedy poměru cizího a vlastního kapitálu (debt-to-equity ratio), a proto je nutné hodnotu tohoto koeficientu vypočítat pro konkrétní případ. Výpočet koeficientu beta zadlužené firmy vychází z koeficientu beta firmy nezadlužené, která je vztažena k určité zeměpisné oblasti a odvětví.

$$\beta_L = \beta_U * \left[1 + \frac{D}{E} * (1 - T) \right] \quad (6)$$

<i>β_U</i>	<i>beta koeficient nezadlužené firmy</i>
----------------------	-------	------------------------------------------

4.2.6. Vážený průměr nákladů kapitálu – WACC

4.2.6.1. Vlastní kapitál

Hodnota vlastního kapitálu závodu Continental Automotive Czech Republic s.r.o. je veřejně dostupná informace z účetní uzávěrky za rok 2020. Z výkazu rozvahy (bilance) k 31. prosinci 2020 nabýval vlastní kapitál hodnoty 15 250 871 tis. CZK. [13]

4.2.6.2. Cizí kapitál

Součástí rozvahy je také položka hodnoty cizího kapitálu, která pro závod Continental Automotive s.r.o. k 31. prosinci 2020 byla 15 399 989 tis. CZK. [13]

4.2.6.3. Náklady vlastního kapitálu

Náklady vlastního (akciového) kapitálu jsou očekávanou výnosností vlastního kapitálu. Míra tohoto parametru se vypočítá z CAPM modelu podle vzorce (5). K výpočtu jsou potřeba známy také další parametry jako bezrizikový výnos, koeficient beta zadlužené firmy a riziková prémie (ERP), což je rozdíl míry tržního a bezrizikového výnosu. Po dosazení těchto hodnot do CAPM modelu je míra nákladů vlastního kapitálu 10,33 %.

$$r_e = r_f + \beta_L * ERP = 0,0155 + 1,65 * 0,0531$$

$$r_e = 10,33 \%$$

4.2.6.4. Náklady cizího kapitálu

Míra nákladů cizího kapitálu je určena jako průměrný roční úrok bankovních úvěrů nefinančním podnikům nad 30 milionů CZK. Tato hodnota nabývá k září 2021 1,56 %. [14]

4.2.6.5. Sazba daně z příjmů

Při výpočtu WACC je také potřeba zohlednit daňovou úsporu, která má vliv na náklady cizího kapitálu, neboť jsou úroky pro firmu nákladem a snižují tedy výsledek hospodaření. Tím snižují také daňové zatížení podniku – tento efekt se označuje daňový štít. Sazba daně z příjmů právnických osob činí v roce 2021 19 %.

4.2.6.6. Bezrizikový výnos

Míra bezrizikové výnosu je určena jako průměrný roční úrok dlouhodobých státních dluhopisů, tedy s dobou splatnosti více než 10 let. Státní dluhopisy 10R - ČR nabývají k září 2021 ročního výnosu 1,55 %. [15]

4.2.6.7. Riziková prémie – ERP

Z dat profesora Damodarana, který se zabývá ekonomickými daty, vyplývá celková riziková prémie, tedy riziková prémie se zohledněním daně země a ratingu dluhopisů, pro Českou republiku k 8. lednu 2021 5,31 %. [16]

4.2.6.8. Beta koeficienty zadlužené a nezadlužené

Koeficient beta nezadlužené firmy (beta unlevered) vyjadřuje riziko firmy, jejíž zadlužení je nulové. Hodnoty koeficientů beta nezadlužené firmy jsou podle dat profesora Damodarana řazeny podle kontinentů a odvětví. Pro Evropský trh a odvětví Electronics (General) činí k lednu 2021 koeficient beta nezadlužené firmy 0,91. [17]

Z této hodnoty je možné vypočítat podle vzorce (6) koeficient beta zadlužené firmy (beta levered) podle její konkrétní zadluženosti. Beta koeficient zadlužené firmy při poměru vlastního a cizího kapitálu roku 2020 nabývá hodnoty 1,65.

$$\beta_L = \beta_U * \left[1 + \frac{D}{E} * (1 - T) \right] = 0,91 * \left[1 + \frac{15\,399\,989}{15\,250\,871} * (1 - 0,19) \right]$$

$$\beta_L = 1,65$$

4.2.6.9. Výpočet diskontní míry

Nyní jsou známy veškeré hodnoty potřebné k výpočtu WACC. Po dosazení do vzorce (4) nabývá WACC hodnoty 5,78 %.

$$WACC = r_e * \frac{E}{D + E} + r_d * \frac{D}{D + E} * (1 - T)$$

$$WACC = 0,1033 * \frac{15\,250\,871}{15\,399\,989 + 15\,250\,871} + 0,0156 * \frac{15\,399\,989}{15\,399\,989 + 15\,250\,871} * (1 - 0,19)$$

$$WACC = 5,78 \%$$

Výsledná míra WACC představuje z pohledu modelového výpočtu reálnou diskontní míru. Vzhledem k počítání s nominálními hotovostními toky je třeba zohlednit vliv inflace pomocí vztahu z rovnice (3). Nominální míra diskontu vstupující do modelového výpočtu po zahrnutí míry inflace nabývá hodnoty 8,6361 %.

$$r_n = (1 + r_r) * (1 + \alpha) - 1 = (1 + 0,0578) * (1 + 0,027) - 1$$

$$r_n = 8,6361 \%$$

4.3. Hodnocení ekonomické efektivity projektu aplikace Magic AOI

Magic AOI bude aplikována na tři výrobní SMT linky, ke kterým bude vztažen modelový výpočet. Aby mohl být projekt Magic AOI aplikován, bylo nutné pořízení licence a serveru, na kterém by mohla umělá inteligence pracovat. Před uvolněním do výroby, které je podmíněno souhlasem zákazníka, je třeba dosáhnout určité kvality klasifikace výsledků.

Po dosažení dostatečné kvality a získání souhlasu od zákazníka bude mít zavedení Magic AOI vliv na redukci práce operátorů při verifikaci výstupů za automatickou optickou inspekci, na změnu úniku zmetků a na prostroje způsobené plným bufferem na konci SMT linky.

4.3.1. Licence

Pořízení licence na užívání produktu Magic AOI proběhlo v rámci korporace. Doba užívání je na dobu neurčitou, nejsou s ní spojené žádné provozní platby a je možné ji využít na neomezené množství SMT linek. Cena licence včetně úložiště a operačního systému byla 5 000 EUR, po přepočtení podle ročního průměru kurzu tak byla cena 128 770 CZK.

4.3.2. Virtuální server

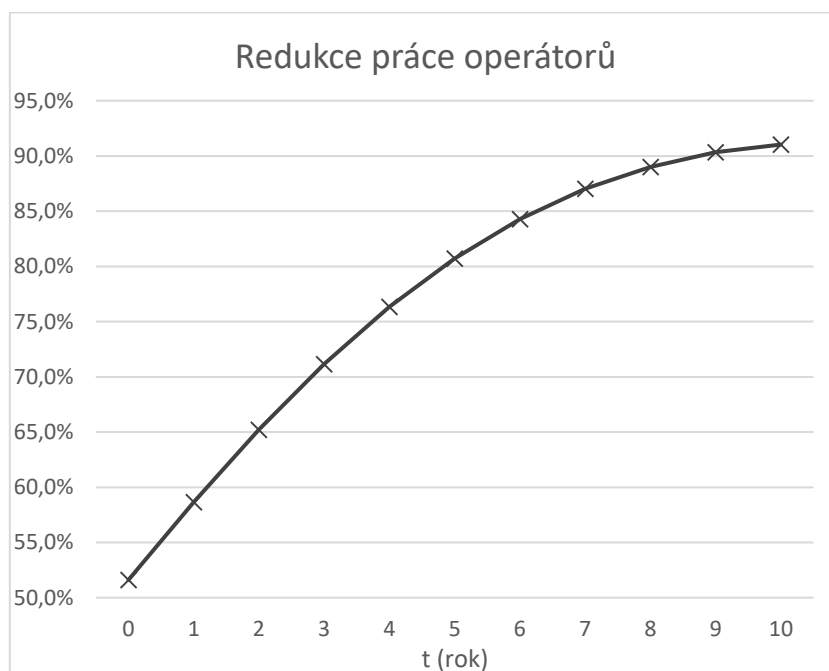
Pro funkční aplikaci Magic AOI bylo nutné pořízení serveru určitých parametrů. K těmto potřebám slouží virtuální privátní server (VPS), který pokryje požadavky na fungování na všech třech pilotních linkách. Cena užívání VPS daných parametrů je 1 500 CZK bez DPH za měsíc a v modelovém výpočtu vzroste tato cena meziročně o míru inflace. [18]

4.3.3. Redukce práce operátorů

Největších úspor zavedením Magic AOI je dosaženo díky zvýšení automatizace a s ní spojené redukci práce operátorů. V současné době dosahuje hodnota jistoty rozhodnutí umělé inteligence 51,6 %. Jedná se o stav, kdy si je umělá inteligence svým rozhodnutím velmi jistá a redukuje tím práci operátorů při verifikaci. Postupem času se očekává nárůst až na 91,0 % v desátém roce projektu.

Operátoři stráví práci při verifikaci výsledků z automatické optické inspekce na jedné lince 2 hodiny denně. Při nepřetržitém provozu se zahrnutím odstavek výroby je za rok 350 pracovních dní. Celkem tedy operátoři stráví verifikací výsledků na jedné lince 700 hodin ročně. Při aktuální redukci ve výši 51,6 % by roční úspora času práce operátorů na třech linkách byla 1 083 hodin.

Úspora peněz za práci operátorů souvisí s hodinovou cenou operátora, která zahrnuje průměrnou hrubou mzdou operátora, náklady na zdravotní a sociální pojištění, které jsou v roce 2021 v součtu 33,8 %, náklady na školení, zapracování a benefity. Cena práce operátora tak činí 394 CZK za hodinu a v prvním roce projektu budou dosahovat úspory 492 963 CZK. V modelovém výpočtu je zahrnut v každém roce také vliv valorizace hrubé mzdy, jejíž míra se řídí podle kolektivní smlouvy.



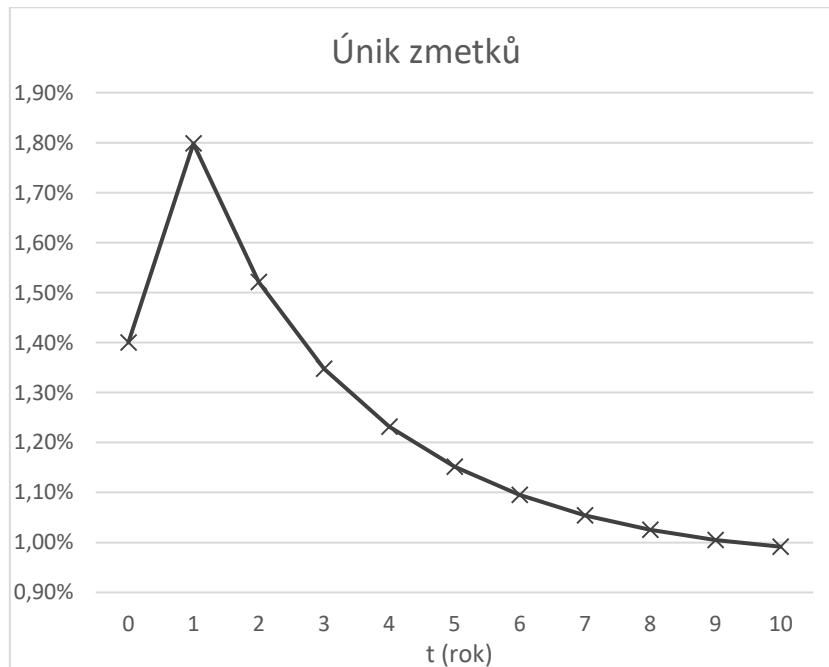
Obr. 33 Redukce práce operátorů

4.3.4. Únik zmetků

Zavedení Magic AOI do procesu výroby nebude mít z technologického hlediska žádný vliv na její změnu. Neovlivní tak zmetkovitost výroby, tedy výrobu vadných a neopravitelných kusů, ale bude mít vliv na únik nezachycených zmetků. Úniky v současném stavu výroby vznikají kvůli nesprávně nastaveným parametrům automatické optické inspekce, chybou operátora při verifikaci výsledků a také v případech, kdy automatická optická inspekce není schopna chybu detekovat. To je způsobeno například tehdy, kdy jsou součástky umístěny v nedostupných místech, které kamery nemohou zachytit, nebo například v případě osazení správného komponentu ale s nesprávnou hodnotou. Pak není možné od sebe oba komponenty vizuálně odlišit. Zmetky jsou tak odhaleny až v dalších fázích výroby – například při kontrole elektrických vlastností nebo kontroly funkčnosti kompletního produktu, kdy jsou hodnoty zmetků výrazně vyšší než při zachycení na SMT lince. V horším případě je zmetek odhalen až u zákazníka, po čemž následuje reklamáce produktu spojená s velmi vysokými náklady.

Aktuálně dosahuje umělá inteligence horší kvality úniku zmetků než současná výroba, ale s postupným zdokonalováním se očekává výrazné zvýšení kvality oproti současnému stavu. Únik zmetků způsobených automatickou optickou inspekcí nyní dosahuje ročního průměru 0,87 % ze všech uniklých i zachycených zmetků. Kvůli nesprávné klasifikaci operátorů pak 0,53 %. V současné výrobě je tedy celkový únik zmetků z celkového počtu uniklých i zachycených zmetků 1,40 %. V prvním roce, po zavedení Magic AOI, která aktuálně dosahuje úniku 1,95 %, bude celkový únik z celkového počtu uniklých i zachycených zmetků 1,80 %, neboť chybovost Magic AOI ovlivní pouze redukované výsledky, zbylé hodnocení zajišťuje stále operátor. Vzhledem k očekávanému zvýšení kvality Magic AOI z pohledu úniku zmetků by mohly dosahovat celkové úniky v desátém roce projektu pouze 0,99 %.

Průměrná hodnota uniklých zmetků ze tří pilotních linek za rok při současné výrobě nabývá hodnoty 1 092 000 CZK. Meziroční růst hodnoty zmetků je v modelovém výpočtu v míře inflace.

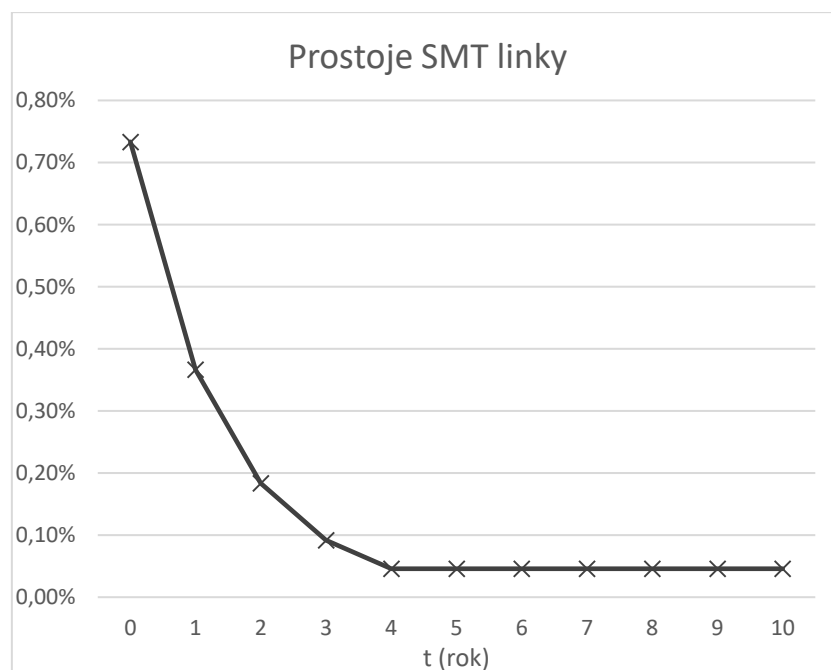


Obr. 34 Únik zmetků

4.3.5. Prostoje SMT linky

Pokud automatická optická inspekce odhalí více potenciálně vadných DPS v krátkém časovém horizontu, zaplňuje se postupně buffer, dokud operátor chyby neohodnotí. Jestliže dojde k zaplnění bufferu, vznikají prostoje linky a dochází až k zastavení výroby. Po aplikaci Magic AOI však dojde snížením počtu potenciálně vadných DPS k redukcí těchto prostojů, časem téměř k nulové hodnotě.

Při současné výrobě tvoří průměrné roční prostoje SMT linky způsobené plným bufferem za automatickou optickou inspekci 0,73 % z celkových prostojů vznikajících během procesu výroby. V případě nepřetržitého provozu se zahrnutím odstávek výroby odpovídá tato hodnota 298 minutám za rok. Minutový tarif prostoje je 4,97 CZK, přičemž do této částky jsou započítány fixní náklady, variabilní náklady provozu bez výroby a ušlý zisk. V modelovém výpočtu roste tato cena meziročně o míru inflace. Náklady na prostoje tří linek způsobené plným bufferem za automatickou optickou inspekci jsou tak při současné výrobě 4 443 CZK. Tato hodnota roste v modelu meziročně o míru inflace.



Obr. 35 Prostoje SMT linky způsobené plným bufferem

4.3.6. Práce inženýrů

Pro učení Magic AOI jsou využívána historická data z automatické optické inspekce, která byla hodnocena operátory na lince. Při hodnocení však vznikají jak chyby klasifikace, zda se jedná o reálnou chybu, nebo pseudochybu, tak přiřazení reálné chyby do konkrétních skupin. Proto je potřeba data přiřadit správně, aby docházelo k učení umělé inteligence správnými daty. Tuto práci provádí procesní inženýři, kteří prošli školením kvality pájení. Před aplikací Magic AOI na výrobní linku je nutné dosáhnout určité kvality hodnocení umělou inteligencí a klasifikovat tedy mnoho dat. Časová náročnost tohoto procesu je asi 700 hodin. Cena práce inženýra, která zahrnuje průměrnou hrubou mzdu procesního inženýra, náklady na zdravotní a sociální pojištění, které jsou v roce 2021 v součtu 33,8 %, náklady na školení, zapracování a benefity, je 521 CZK za hodinu. V modelovém výpočtu jsou tak v nultém roce náklady na práci inženýrů spojené se zaváděním Magic AOI 364 683 CZK. Po aplikaci do procesu výroby je pak nutné kontrolovat spolehlivost umělé inteligence a zvyšovat její kvalitu. Na této činnosti pak inženýři pracují 250 hodin ročně. V modelovém výpočtu je zahrnut v každém roce také vliv valorizace hrubé mzdy, jejíž míra se řídí podle kolektivní smlouvy.

4.3.7. Modelový výpočet

Rok	SV	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Licence	-	128 770	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Server	-	18 000	18 486	18 985	19 498	20 024	20 565	21 120	21 690	22 276	22 877	23 495
WLR	-	51,6%	58,6%	65,2%	71,2%	76,3%	80,7%	84,3%	87,0%	89,0%	90,3%	91,0%
WLR	-	-	492 963	557 225	618 023	674 167	724 849	769 622	808 358	841 189	868 436	890 558
Inženýři při UI	-	364 683	132 444	134 699	137 010	139 380	141 808	144 297	146 848	149 463	152 144	154 891
Únik zmetků	1,40%	1,40%	1,80%	1,52%	1,35%	1,23%	1,15%	1,09%	1,05%	1,03%	1,00%	0,99%
Únik zmetků	1 092 000	1 092 000	1 440 457	1 251 551	1 138 318	1 068 746	1 026 328	1 002 095	990 905	989 642	996 298	1 009 499
Prostoje linky	0,73%	0,73%	0,37%	0,18%	0,09%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%
Prostoje linky	4 442	4 442	2 221	1 110	185	93	93	93	93	93	93	93
Celkem	1 096 442	1 607 895	1 100 645	849 121	676 988	554 075	463 945	397 983	351 177	320 285	302 975	297 420
CF	-	511 453	4 203	247 321	419 454	542 367	632 497	698 459	745 264	776 157	793 466	799 022
KCF	-	511 453	515 656	268 335	151 119	693 486	1 325 983	2 024 442	2 769 707	3 545 864	4 339 330	5 138 352
DCF	-	511 453	3 869	209 562	327 161	389 401	418 011	424 909	417 341	400 089	376 497	348 993
KDCF	-	511 453	515 322	305 760	21 401	410 802	828 813	1 253 722	1 671 063	2 071 152	2 447 649	2 796 642

Poznámka: částky jsou uvedeny v CZK; SV – současná výroba, WLR – workload reduction (redukcce práce operátorů).

Obr. 36 Modelový výpočet

Investicí do projektu jsou zvýšené náklady v nultém roce spojené se zaváděním Magic AOI do procesu SMT výroby oproti nákladům při současném stavu. Při současné výrobě dosahují náklady, na které bude mít vliv zavedení umělé inteligence, výše 1 096 442 CZK. Po spuštění projektu by náklady vzrostly na hodnotu 1 607 895 CZK. Investiční výdaje tedy činí 511 453 CZK.

Oproti současné výrobě vznikají náklady na pořízení licence k užívání Magic AOI, užití virtuálního serveru a práci inženýrů při učení umělé inteligence. Zbylé vstupní veličiny zůstávají neměnné, neboť k aplikaci Magic AOI na výrobní linku dochází až v prvním roce projektu, kdy se již mění veškeré vstupní veličiny a dochází také k ovlivnění jejich velikostí vlivem inflace a valorizace hrubých mezd.

4.3.1. Vyhodnocení ekonomické efektivity projektu Magic AOI

K ekonomickému hodnocení projektu Magic AOI byla použita tři rozhodovací kritéria – čistá současná hodnota, vnitřní výnosové procento a doba návratnosti investice.

Čistá současná hodnota investice odpovídá při daných vstupních veličinách a předpokladech hodnotě 2 796 642 CZK. Jedná se o kladnou hodnotu dosahující více než pětinašobku investičních výdajů, a proto by doporučení bylo danou investicí realizovat.

Míra vnitřního výnosového procenta investice nabývá 54,98 %. Tato hodnota výrazně převyšuje diskontní míru, proto by i podle tohoto kritéria bylo doporučeno do projektu Magic AOI investovat.

Návratnost investice podle kritéria prosté i diskontované doby návratnosti dosáhla tří let od doby zahájení projektu. Kumulované úspory i kumulované diskontované úspory by tak po třech letech přesáhly hodnotu investičních nákladů.

NPV	2 796 642 CZK
IRR	54,98 %
PP	3 roky
PP _d	3 roky

Obr. 37 Tabulka ekonomického vyhodnocení

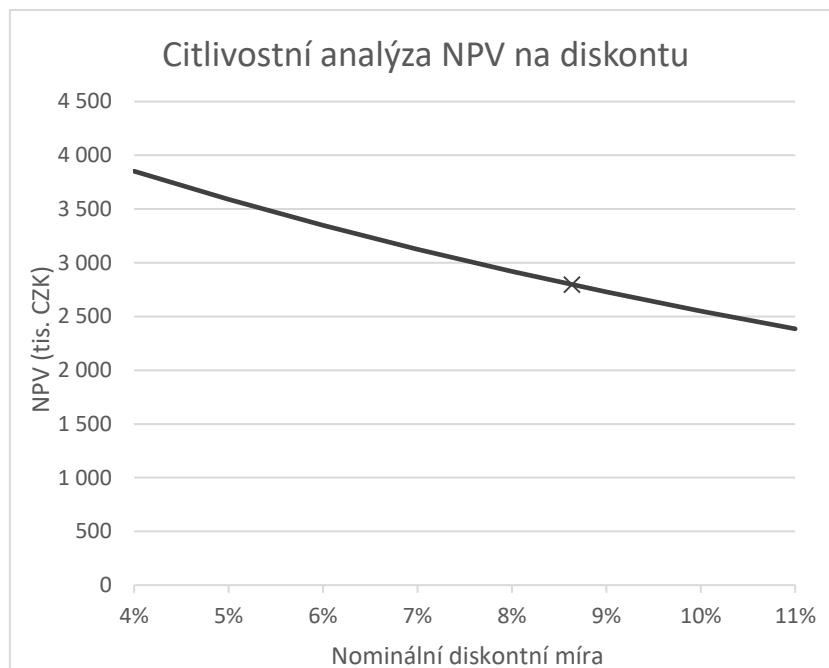
4.4. Citlivostní analýzy

Čistá současná hodnota byla vypočtena při různých predikcích, které nastanou během doby životnosti projektu. Ty se však během této doby mohou měnit a ovlivnit tím velikost NPV a v konečném výsledku také rozhodnutí, zda danou investicí realizovat. Proto je nutné provést citlivostní analýzy veličin, jejichž hodnota by se po dobu životnosti mohla lišit oproti hodnotě ve výpočetním modelu. Citlivost čisté současné hodnoty bude provedena na parametrech diskontu a inflace.

4.4.1. Citlivostní analýza čisté současné hodnoty na diskontu

Hodnota diskontní míry může být ovlivněna řadou faktorů, což může mít za následek změnu čisté současné hodnoty. Při výpočtu diskontní míry pomocí váženého průměru nákladů kapitálu (WACC) je použita řada vstupních veličin, které se mohou časem měnit. Také inflace je velmi dynamickou proměnnou a ovlivňuje nominální diskontní míru.

Z citlivostní analýzy čisté současné hodnoty na diskontu je patrné, že ani výraznější změna nominální diskontní míry neovlivní konečné doporučení do daného projektu investovat.

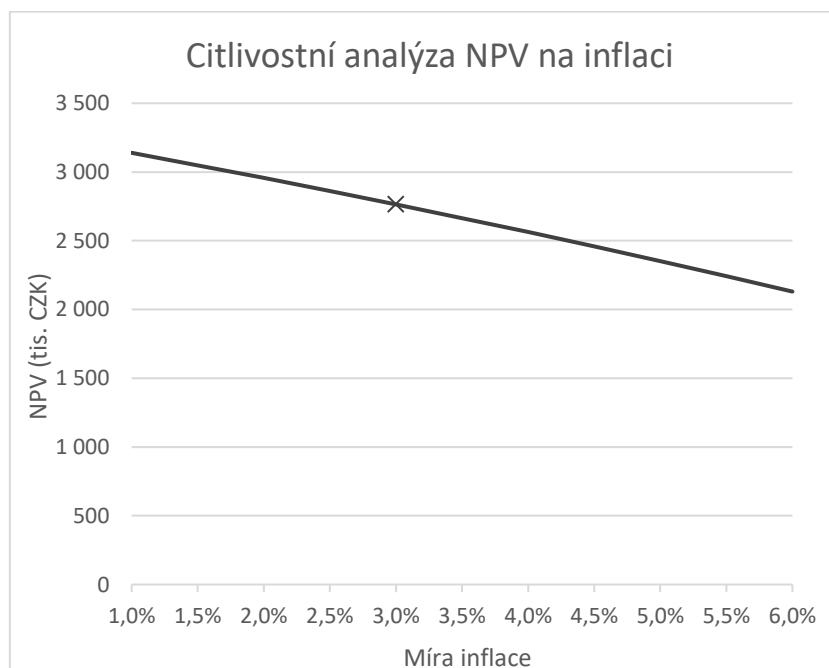


Obr. 38 Citlivostní analýza čisté současné hodnoty na diskontu

4.4.2. Citlivostní analýza inflace čisté současné hodnoty na inflaci

Jak již bylo zmíněno, inflace je velmi dynamickou proměnnou, která je obzvláště v současné době ovlivněna pandemickou situací. Zároveň Česká národní banka udržuje snahu dodržení dlouhodobého cíle ve výši dvou procent, ke kterému může využít různé ekonomické postupy. Inflace tak během životnosti projektu bude měnit svoji hodnotu, čímž by mohla hodnotu NPV ovlivnit.

Z citlivostní analýzy čisté současné hodnoty na inflaci je však patrné, že k výraznému ovlivnění hodnoty čisté současné hodnoty nedojde, a proto se ani rozhodnutí o doporučení investice nezmění.



Obr. 39 Citlivostní analýza čisté současné hodnoty na inflaci

5. Rozšíření aplikace Magic AOI

Prokázáním ekonomické efektivity projektu Magic AOI může vyvstávat otázka aplikace tohoto nástroje využívajícího umělou inteligenci také na další kontrolní procesy ve výrobě, které využívají vizuální inspekci. Samozřejmostí je rozšíření také na další SMT kromě tří pilotních, ke kterým byl výpočetní model vztažen. Vysokých úspor by bylo možné docílit, pokud by umělá inteligence mohla přímo ovlivnit parametry nastavení automatické optické inspekce. Možností zefektivnění Magic AOI by mohlo být také spojení databází naučených dat v rámci korporace, čímž by docházelo k výrazně rychlejšímu učení a růstu kvality umělé inteligence.

5.1. Rozšíření na další SMT linky

Na těchto linkách mohou být oproti třem pilotním linkám rozdílné hodnoty zmetkovitosti a prostojů, ale velkou výhodou tohoto rozšíření je, že licence na užívání není vztažena na počet SMT linek. Také práce inženýrů na projektu Magic AOI není spojena s počtem linek, takže by zde vznikly pouze vícenásobky spojené se zavedením na danou linku. Dozajisté by však bylo nutné rozšíření parametrů virtuálního serveru, případně pak pořízení dalších serverů, které by zajistily správné fungování systému.

5.2. Rozšíření na další optické kontrolní systémy

Systém Magic AOI by byl možný aplikovat také na další procesy ve výrobě, kde probíhá vizuální kontrola. K potenciální aplikaci na tyto procesy je však nutný dostatek dat, kterými by se umělá inteligence učila rozhodovat. V úvahu zde přichází především optická kontrola kvality pájení součástek s průchozí montáží (THT) a rentgenová kontrola (AXI). Na rozdíl od rozšíření na další SMT linky by zde však bylo nutné hodnotit velké množství nových dat, což by se projevilo náklady na práci procesních inženýrů. Vzhledem k počtu THT linek a rentgenů ve výrobě a času operátorů strávených kontrolou výstupů jejich kontrolních systémů by však ekonomická efektivnost byla výrazně nižší než u aplikace na SMT linky. U THT linek navíc nastupuje trend ústupu od této technologie díky přechodu k Pin-in-Paste technologii.

5.3. Komunikace Magic AOI s automatickou optickou inspekcí

V modelovém výpočtu bylo počítáno s konstantními úniky zmetků způsobených automatickou optickou inspekcí. Také ladění automatické optické inspekce procesními inženýry nebylo aplikací Magic AOI ovlivněno, neboť tato činnost předchází kroku hodnocení umělou inteligencí. Vzniká zde tak prostor pro další možnost rozšíření působení Magic AOI, pokud by vznikla zpětná vazba od Magic AOI směrem k automatické optické inspekcí a následné možnosti upravení parametrů kontroly. To by mělo za následek redukci práce procesních inženýrů, procesních techniků pracujících v nepřetržitém provozu a nahrazují tak práci procesních inženýrů v případě nedostupnosti. Výrazné úspory by nastaly také redukcí úniku zmetků při správně nastavených parametrech a také snížení prostojů kvůli plným bufferům před automatickou optickou inspekcí, které jsou výrazně vyšší než prostoje způsobené plnými buffery před verifikačním pracovištěm, se kterými bylo počítáno ve výpočetním modelu.

Závěr

V diplomové práci bylo vyhodnoceno možné zvýšení automatizace výroby desek plošných spojů na SMT linkách pomocí užití umělé inteligence. Prostor ke zvýšení automatizace je však na celé SMT lince, která byla popsána v první části práce.

Automatizace v této práci je zaměřena na proces automatické optické inspekce na třech vybraných linkách, které na lince zajišťují optickou kontrolu pájených spojů. Aplikace umělé inteligence bude použita při vyhodnocování potenciálních chyb detekovaných automatickou optickou inspekcí, aby došlo k redukci počtu hodnocení operátorem. Práce operátora verifikací tak bude výrazně snížena, ale nikoli eliminována. Zavedení umělé inteligence bude mít vliv také na počet chybně klasifikovaných desek plošných spojů. Díky těmto chybám dochází k únikům vadných kusů z SMT linky a také k nesprávné detekci – pseudochybám. Díky redukci práce operátora tak budou redukovány chyby vznikající nesprávnou verifikací operátorem. Bezchybné však není ani hodnocení umělou inteligencí, jejíž kvalita se však s postupným učením bude výrazně zvyšovat.

Pomocí ekonomického modelového výpočtu byla aplikace umělé inteligence podrobena výpočtu ekonomické efektivity daného projektu. K hodnocení byla využita tři ekonomická kritéria – čistá současná hodnota, vnitřní výnosové procento a doba návratnosti investice. Aby byl modelový výpočet použitelný, bylo nutné určení několika vstupních předpokladů a vstupních hodnot potřebných k výpočtu kritérií. V ekonomickém modelovém výpočtu tak byly zohledněny růst cenové hladiny a valorizace hrubých mezd zaměstnanců. Diskontní míra byla vypočtena pomocí váženého průměru nákladů kapitálu a pomocí inflace byla vypočtena míra nominálního diskontu ve výši 8,6361 %.

Investiční náklady do projektu zahrnovaly především zvýšení nákladů na práci procesních inženýrů, kteří jsou pověřeni učením umělé inteligence a dostatečnou kvalitou hodnocení. Do nákladů na investici je zařazeno také pořízení licence na užívání produktu v daném závodě korporace a pronájem virtuálních serverů pro použití umělé inteligence. Celkové investiční náklady aplikace Magic AOI dosahují 511 453 CZK.

Při provozu po spuštění projektu zůstávají náklady spojené s pronájmem serveru a prací procesních inženýrů, kteří stále zvyšují kvalitu rozhodování umělé inteligence, čímž zvyšují redukci práce operátorů při verifikaci. Dále se díky tomu snižují úniky vadných kusů desek plošných spojů a také prostoje SMT linky kvůli plnému bufferu před verifikačním pracovištěm. Tyto změny budou mít kladný vliv na výpočetní model, neboť dochází k úsporám nákladů na operátory, úsporám spojených s úniky vadných kusů z SMT linky a úsporám za její prostoje.

Čistá současná hodnota dosáhla při daném ekonomickém modelu výše 2 796 642 CZK. Jedná se o kladnou hodnotu dosahující přibližně pětinasobku investičních nákladů, a proto je podle kritéria NPV doporučeno daný projekt realizovat, neboť za dobu životnosti by projekt vygeneroval peněžní toky o současné hodnotě téměř 2,8 milionů CZK nad rámec dosavadního zhodnocení peněz ve výši diskontní míry. Velikost vnitřního výnosového procenta projektu míry 54,98 %, což výrazně převyšuje nominální diskontní míru, takže také podle kritéria IRR by bylo doporučeno daný projekt realizovat. Podle kritéria prosté doby návratnosti dosáhnou kumulované hotovostní toky velikosti investičních nákladů po třech letech provozu projektu. Stejně doby návratnosti investice je dosaženo při uvažování diskontování hotovostních toků.

Sestavení citlivostních analýz modelového výpočtu z pohledu citlivosti čisté současné hodnoty na diskontní a inflační míře odhalilo, že ani dynamické chování těchto dvou veličin by na konečném rozhodnutí, zda projekt realizovat, nic nezměnilo.

Zdroje

- [1] *Obrázky z materiálů firmy.* .
- [2] M. Abel, *SMT: technologie povrchové montáže*. Pardubice: Platan, 2000.
- [3] “Automatické dávkování s nejvyšší stabilitou.” <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:31233/automaticke-davkovani-s-nejvyssi-stabilitou> (accessed Oct. 26, 2021).
- [4] “BULLETIN ANOTACÍ BULLETIN OF ABSTRACTS,” Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: www.cadware.cz.
- [5] “3D kontrola tisku pájecí pasty.” <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:2157/3d-kontrola-tisku-pajeci-pasty> (accessed Dec. 17, 2021).
- [6] *Snímky pořízené ve firmě.* .
- [7] “Přetavení infračerveným zářením | SMTcentrum - služby v oblasti pájení.” <https://www.smtcentrum.cz/pajeni-pretavenim/pretaveni-infracervenym-zarenim/> (accessed Dec. 17, 2021).
- [8] X. Huang, S. Zhu, X. Huang, B. Su, C. Ou, and W. Zhou, “Detection of plated through hole defects in printed circuit board with X-ray,” *undefined*, pp. 1296–1301, Sep. 2015, doi: 10.1109/ICEPT.2015.7236817.
- [9] “Selektivní pájení a jeho metody.” <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:5951/selektivni-pajeni-a-jeho-metody> (accessed Dec. 17, 2021).
- [10] R. Soukup, “A methodology for optimization of false call rate in automated optical inspection post reflow,” *undefined*, pp. 263–267, 2010, doi: 10.1109/ISSE.2010.5547304.
- [11] “Aktuální prognóza ČNB - Česká národní banka.” <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/> (accessed Dec. 12, 2021).
- [12] “Graf EUR / Kč, ČNB, grafy kurzů měn | Kurzy.cz.” <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/kurzy.asp?A=G&V=3&m1=CZK&m2=EUR&od=20.11.2020&do=19.11.2021&T=0> (accessed Dec. 12, 2021).
- [13] “Veřejný rejstřík a Sběrka listin - Ministerstvo spravedlnosti České republiky.” <https://or.justice.cz/ias/content/download?id=164b74dc593f4b0a8bf20a71e9a0919e> (accessed Oct. 26, 2021).
- [14] “ARAD - Systém časových řad - Česká národní banka.” https://www.cnb.cz/cnb/STAT.ARADY_PKG.VYSTUP?p_period=1&p_sort=2&p_des=50&p_sestuid=58843&p_uka=14&p_strid=AAABAA&p_od=202008&p_do=202108&p_lang=CS&p_format=0&p_decsep=%2C (accessed Oct. 07, 2021).
- [15] “Výnos dluhopisu 10R - ČR (Úrokové sazby finančních trhů [%]) - ekonomika ČNB | Kurzy.cz.” <https://www.kurzy.cz/cnb/ekonomika/vynos-dluhopisu-10r-cr/> (accessed Oct. 08, 2021).
- [16] A. Damodaran, “Country Default Spreads and Risk Premiums.” https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html (accessed Oct. 08, 2021).

- [17] A. Damodaran, “betaEurope.” <https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/pc/datasets/betaEurope.xls> (accessed Oct. 08, 2021).
- [18] “Ceník virtuálních serverů | Spolehlivé servery.” <https://www.spolehlive-servery.cz/virtualni-servery/cenik/> (accessed Dec. 12, 2021).

Seznam obrázků

Obr. 1 SMT linka [1].....	10
Obr. 2 Šablonový tisk [2].....	12
Obr. 3 Sítotisk [2].....	13
Obr. 4 Automatický dispenzer [3].....	13
Obr. 5 Podíl vzniku vad vlivem nesprávného nanášení pájecí pasty [4].....	14
Obr. 6 Růst nákladů spojených s vadou a pokles vzniku vad na SMT lince [4].....	14
Obr. 7 Úspěšná kontrola SPI [6].....	15
Obr. 8 Chyba nanesení pájecí pasty detekovaná SPI [6].....	15
Obr. 9 Pásový zásobník [2].....	17
Obr. 10 Tyčový zásobník [2].....	17
Obr. 11 Pájecí pec s ohřevem horkým plynem [2].....	18
Obr. 12 AXI kontrola [8].....	19
Obr. 13 Selektivní pájení vlnou [9].....	20
Obr. 14 Princip AOI [10].....	21
Obr. 15 AOI Single track [6].....	22
Obr. 16 AOI Double track [6].....	22
Obr. 17 Verifikace výsledků operátorem [1].....	23
Obr. 18 Chybějící součástka SOT [6].....	26
Obr. 19 Posunutá součástka SOD [6].....	26
Obr. 20 Bill board součástky CC/CR [6].....	26
Obr. 21 Tombstone součástky CC/CR [6].....	26
Obr. 22 Kuličky pájky na DPS [6].....	27
Obr. 23 Ohnutý pin součástky QFP [6].....	27
Obr. 24 Zkrat mezi piny součástky SOIC [6].....	27
Obr. 25 Voidy u součástky BGA pomocí AXI [1].....	27
Obr. 26 Aplikace UI na SMT linku [1].....	28
Obr. 27 Grafické zobrazení neuronové sítě [1].....	29
Obr. 28 Verifikace UI [1].....	29
Obr. 29 Učení operátorů, AOI a UI [1].....	30
Obr. 30 Rozdělení tréninkových a testovacích dat [1].....	31
Obr. 31 Inspekce kvality pájení před a po aplikaci Magic AOI [1].....	32
Obr. 32 Verifikace při aplikaci Magic AOI [1].....	33
Obr. 33 Redukce práce operátorů.....	40
Obr. 34 Únik zmetků.....	41
Obr. 35 Prostoje SMT linky způsobené plným bufferem.....	42
Obr. 36 Modelový výpočet.....	43
Obr. 37 Tabulka ekonomického vyhodnocení.....	44
Obr. 38 Citlivostní analýza čisté současné hodnoty na diskontu.....	45
Obr. 39 Citlivostní analýza čisté současné hodnoty na inflaci.....	45

Seznam použitých zkratk a symbolů

AOI	Automated Optical Inspection – automatická optická inspekce
AXI	Automated X-ray Inspection – automatická rentgenová inspekce
BGA	Typ SMD pouzdra
CAPM	Capital Asset Pricing Model – model oceňování kapitálových aktiv
CC/CR	Typ SMD pouzdra
CF	Cash Flow – peněžní toky
COIL L	Typ SMD pouzdra
CZK	Koruna česká
D	Debt – cizí kapitál
D/E	Debt-to-equity ratio – poměr zadluženosti
DCF	Discounted Cash Flow – diskontovaný peněžní tok
DPH	Daň z přidané hodnoty
DPS	Deska plošných spojů
E	Equity – vlastní kapitál
ECR/ELKO	Typ SMD pouzdra
ERP	Equity Risk Premium – riziková prémie
EUR	Euro
FTP	First Time Pass
ICT	In-Circuit Test – elektrická kontrola jehlovým polem
INV	Investice
IRR	Internal Rate of Return – vnitřní výnosové procento
KCF	Kumulovaný peněžní tok
KDCF	Kumulovaný diskontovaný peněžní tok
Magic AOI	Projekt verifikace výsledků AOI s užitím umělé inteligence
NPV	Net Present Value – čistá současná hodnota
PIP	Pin-in-Paste – metoda osazování THT součástek
PP	Payback Period – doba návratnosti
QFN	Typ SMD pouzdra
QFP	Typ SMD pouzdra
r	Diskont
r_d	Náklady cizího kapitálu
r_e	Náklady vlastního kapitálu
r_f	Bezrizikový výnos
r_m	Míra tržního výnosu
r_n	Nominální diskont
r_r	Reálný diskont
RTG	Rentgen
SMD	Surface Mount Device – technologie povrchové montáže
SMT	Surface Mount Technology – součástky pro povrchovou montáž
SOIC	Typ SMD pouzdra
SOD	Typ SMD pouzdra
SOT	Typ SMD pouzdra
SPI	Solder Paste Inspection – inspekce pájecí pasty
SV	Současná výroba
t	Daný rok
T	Sazba daně z příjmů
THT	Through Hole Technology – technologie průchozí montáže
TO-xyz	Typ SMD pouzdra
T_z	Doba životnosti
UI	Umělá inteligence
WACC	Weighted Average Cost of Capital – Vážený průměr nákladů kapitálu
WLR	Workload Reduction
α	Míra inflace
β_L	Levered beta – koeficient beta zadlužené firmy
β_U	Unlevered beta – koeficient beta nezadlužené firmy