



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Jan Šimon

Výrobní proces letecké komponenty s využitím
metodologie Lean Six Sigma

Diplomová práce

Praha 2016



K617..... Ústav logistiky a managementu dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jan Šimon

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – LO – Logistika, technologie a management dopravy

Název tématu (česky): **Výrobní proces letecké komponenty s využitím metodologie Lean Six Sigma**

Název tématu (anglicky): Manufacturing Process of Aircraft Part Using Lean Six Sigma Methodology

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

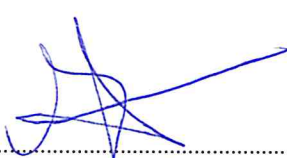
- Metodologie Lean Six Sigma
- Specifikace letecké komponenty
- Analýza výrobního procesu letecké komponenty - definice a zdůvodnění vybraného výrobního procesu, vyhodnocení poskytnutých dat výrobního procesu, identifikace kořenových příčin variace výstupu
- Návrh řešení a jeho implementace
- Vyhodnocení navrženého zlepšení včetně grafického znázornění grafem I-MR Chart



- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucí diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: A. Svozilová: Zlepšování podnikových procesů. Grada Publishing, a.s., Praha 2011.
T. McCarty, L. Daniels, M. Bremer, P. Gupta: The Six Sigma Black Belt Handbook. McGraw-Hill Professional Books, 2004.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Denisa Mocková, Ph.D.**

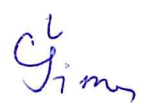
Datum zadání diplomové práce: **30. června 2015**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2016**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Lukáš Týfa, Ph.D.
vedoucí
Ústavu logistiky a managementu dopravy


L. S.

.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Jan Šimon
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 15. června 2016

Poděkování

Mé poděkování směřuje k doc. Ing. Denise Mockové, Ph.D., vedoucí mé diplomové práce, za ochotu, čas a věcné připomínky poskytované v průběhu tvorby předložené práce. V neposlední řadě též děkuji mé rodině a všem blízkým za projevenou trpělivost během mého studia.

Prohlášení

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

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 22.11.2016


.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

VÝROBNÍ PROCES LETECKÉ KOMPONENTY S VYUŽITÍM METODOLOGIE LEAN SIX
SIGMA

diplomová práce

září 2016

Bc. Jan Šimon

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce „Výrobní proces letecké komponenty s využitím metodologie Lean Six Sigma“ je aplikace metodologie Lean Six Sigma na vybraný vnitropodnikový logistický proces, který za současných podmínek nedosahuje požadované výkonnosti. Na základě získaných dat provedu analýzu současného nevyhovujícího stavu a následně navrhnou nové řešení, které bude dlouhodobě splňovat požadavky na zvolený proces.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lean Six Sigma, zlepšování procesů, štíhlá výroba, plánování výroby, turbovrtulový motor

ABSTRACT

The subject of the master's thesis „Manufacturing proces of Aircraft Part Using Lean Six Sigma Methodology“ is application of Lean Six Sigma to a chosen internal logistic process which under current conditions does not achieve desired efficiency. On the basis of data collection an analysis of current inconvenient state will be carried out and subsequently a new solution with lasting satisfying results will be designed.

KEY WORDS

Lean Six Sigma, process improvement, lean manufacturing, production planning, turboprop engine

Obsah

Obsah	4
Seznam používaných zkratek	6
1 Úvod.....	7
2 Lean	9
2.1 Definice pojmu Lean.....	9
2.2 Historie metodologie Lean	9
2.3 Principy metodologie Lean	10
2.4 Zdroje plýtvání v procesech.....	12
2.5 Nástroje pro odstranění plýtvání.....	13
2.6 Nástroje metodologie Lean	13
2.6.1 Mapování toku hodnot.....	14
2.6.2 Teorie omezení.....	14
2.6.3 Systém tahu.....	15
2.6.4 Nástroj 5S	15
3 Six Sigma.....	16
3.1 Definice a cíl metodologie Six Sigma	16
3.2 Základní pojmy metodologie Six Sigma.....	17
3.3 Six Sigma podnik.....	21
3.4 Historické počátky metodologie Six Sigma.....	22
3.5 Six Sigma nástroje.....	24
4 Kombinace Lean a Six Sigma.....	25
5 Popis turbovrtulového motoru.....	27
6 Specifikace letecké komponenty	27
6.1 Výrobní proces statorové lopatky	28
6.1.1 Výrobní postup	29
7 Implementační proces metodologie Lean Six Sigma	36
7.1 Fáze Define	36
7.1.1 Stanovení problému	37
7.2 Fáze Measure	39
7.2.1 Provedení sběru dat	40
7.2.2 Interpretace dat	42
7.3 Fáze Analyze	46
7.3.1 Analýza výrobního procesu statorové lopatky	46

7.3.2	Identifikování kořenových příčin	53
7.3.3	Výběr závažných příčin	58
7.4	Fáze Improve	60
7.4.1	Řešení softwarovým nástrojem.....	61
7.4.2	Vyhodnocení implementované změny.....	67
7.5	Fáze Control.....	72
8	Závěr	74
9	Použité zdroje	76
9.1	Literatura	76
9.2	Internetové zdroje.....	77
	Seznam obrázků	79
	Seznam tabulek	80
	Seznam grafů.....	81

Seznam používaných zkratek

5S	Sort, Set in order, Shine, Standardize, Sustain
LSL	Lower Specification Limit
USL	Upper Specification Limit
ppm	parts per million
DPMO	defects per million opportunities
CEO	Chief executive officer
PDCA	Plan–Do–Check–Act
PDSA	Plan-Do-Study-Act
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve and Control
SIPOC	Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Customers
FIFO	First In, First Out
I-MR Chart	Individual – Moving Range Chart
FTY	First Time Yield
PCE	Process Cycle Efficiency
LCL	Lower Control Limit
UCL	Upper Control Limit

1 Úvod

Cílem mé diplomové práce je zefektivnění výrobního procesu statorových lopatek leteckého motoru. Vzhledem k mé stáži u výrobce leteckých motorů na pozici pomocného plánovače komponent pro letecký motor jsem se dostal do přímého kontaktu s vnitropodnikovou logistikou. Součástí mé stáže byl návrh zlepšení vybraného výrobního procesu, implementace návrhu a vyhodnocení přínosů nově nastaveného procesu. Pro zlepšení daného procesu jsem se rozhodl využít metodologii Lean Six Sigma, důvodem pro volbu nebyly pouze celosvětové úspěchy u globálních podniků, ale i má vlastní zvědavost ohledně využití této metodologie ve výrobní logistice.

Metodologie Lean Six Sigma vznikla propojením principů štíhlé výroby a konceptu Six Sigma, čímž došlo k synergickému efektu. Počátky štíhlé výroby „Leanu“ lze nalézt u společnosti Toyota, které v polovině minulého století hrozilo vyhlášení bankrotu. Automobilové společnosti se ovšem podařilo vyvinout vlastní systém řízení kvality, jehož základy stojí na principech štíhlé výroby. Implementování štíhlé výroby do výrobních procesů zajistilo ve výsledku firmě Toyota celosvětové prvenství v produkci automobilů. V polovině osmdesátých let, přibližně dvacet let po kompletním zavedení principů štíhlé výroby ve společnosti Toyota, dochází ve firmě Motorola ke spuštění vnitropodnikové iniciativy zaměřené na absolutní eliminaci defektů. Motorola využívala ve svém podnikovém systému řízení kvality změnu podnikové kultury a statistické nástroje. Právě díky snaze zredukovat odchylky na výstupu podnikových procesů pojmenovala společnost Motorola svou iniciativu Six Sigma. Vzhledem k tomu, že se štíhlá výroba a Six Sigma vyvíjely v různých obdobích a současně oba přístupy jsou po charakterové stránce odlišné, rozhodl jsem se jim věnovat pozornost v teoretické části jednotlivě.

Diplomová práce obsahuje představení vybraného typu leteckého motoru včetně částí, ve které se nachází komponenta, jejíž výrobní proces vyžaduje zlepšení. Vzhledem k mému logistickému zaměření se v práci zabývám vylepšením výrobního procesu především z logistického pohledu, tudíž nezasahuji do samotných výrobních operací vyžadujících znalostí strojírenské technologie. Dále v práci využívám již vytvořený plán výroby, z toho důvodu v práci nevěnuji pozornost jeho tvorbě, především se soustředím na samotný výrobní proces z pohledu štíhlé výroby.

Analýzu současného stavu provádím na výrobních zakázkách zadaných do výroby v období od července do září v roce 2015. Navržené řešení implementuji do výroby od začátku roku 2016, též během tří měsíců. V průběhu těchto dvou časových úseků by mělo být množství zadaných výrobních zakázek přibližně shodné, tudíž při následném porovnávání budu vyhodnocovat téměř stejně rozsáhlé soubory dat.

Většina projektů Lean Six Sigma se vykonává na základě cyklu DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control), což je pěti fázový postup pro řádné uskutečnění zlepšovateľských projektů. V této práci se též řídím cyklem DMAIC, z toho důvodu praktickou část vypracuji dle jednotlivých fází cyklu včetně jejich hlavního účelu.

Pro zpracování dat se v rámci Lean Six Sigma projektů využívá značné množství statistických nástrojů, většina z nich je obsažena v softwarovém nástroji Minitab. V diplomové práci především využiji statistický nástroj I-MR Chart, pomocí kterého lze vyhodnotit nasbíraná data a získat lepší představu o výstupu výrobního procesu. Využití statistických nástrojů velmi záleží na detailnosti nasbíraných dat, jestliže pro výstup z procesu získáme i množinu vstupů ovlivňující daný výstup, snadněji se následně provede identifikace kořenových příčin nežádoucích hodnot výstupu. Vzhledem k tomu, že poskytnutá vstupní data pro tuto práci neobsahují detailní informace o veškerých vstupech do systému, bude zapotřebí vytvořit expertní skupinu a pomocí řízených diskuzí identifikovat vstupující vlivy mající největší vliv na výstup. Jakmile v praktické části identifikuji kořenové příčiny, zavedu opatření pro snížení jejich negativního vlivu na výstup. Po implementování změny je zapotřebí zlepšený proces nechat po určitou dobu probíhat a sbírat data na výstupu. Pomocí testování hypotéz lze následně potvrdit, zdali se dosáhlo významného zlepšení. Vyhodnocení vlivu zavedeného zlepšení se následně provádí též pomocí I-MR Chart, ve kterém lze současně vyhodnotit jak předchozí stav, tak i stav po implementaci zlepšení.

Praktickou část provádím dle DMAIC postupu, tudíž začínám definováním problému. Prvotní impuls pro změnu přichází ze strany vedení podniku. V první fázi cyklu DMAIC je zapotřebí si uvědomit, z jakého důvodu je vyžadována změna současného procesu. Zároveň se v první fázi též stanoví rozlišovací úroveň a ohraničení výrobního procesu. Následně se určí měřená veličina a kritická mez, která nesmí být překročena. Jakmile jsme obeznámeni s měřenou veličinou a způsobem měření, provede se sběr dat. V dalším kroku se ověří stabilita procesu a množství defektů neboli počet hodnot překračující kritickou mez. Poté pomocí expertní skupiny identifikuji kořenové příčiny a provedu jejich kvantifikaci. Následně se v cyklu DMAIC pokračuje způsobem uvedeným v předchozím odstavci do té doby, než nově nastavený proces produkuje požadované hodnoty na výstupu.

2 Lean

2.1 Definice pojmu Lean

V českém prostředí je Lean známý pod názvem „štíhlá výroba“. Dle odborné literatury [1] lze Lean definovat jako: systematickou metodologii, která odstraňuje složitost a zefektivňuje výrobní procesy tím, že identifikuje a následně eliminuje zdroje plýtvání.

2.2 Historie metodologie Lean

První zmínky využití principů Lean lze spatřit u Henryho Forda, který pro zefektivnění masové výroby automobilů využíval revoluční zásady způsobu řízení výroby. Na přelomu 19. a 20. století se o tyto revolucionářské principy zasadili zejména Frederick Taylor [2], Frank Gilbreth [3] a Henry Gantt [4], který se zapsal do historie jako tvůrce Ganttova diagramu. V tehdejší době masové výroby průmyslníci hleděli hlavně na to, aby vyrobili co největší počet výrobků za co nejkratší čas. Zde je vidět i rozdíl mezi tehdejším vnímáním produktivity práce a jejím současným pojetím, kdy nezohledňujeme již pouze kvantitu, ale i kvalitu, dobu doručení a další faktory důležité pro zákazníka [5].

Největším přínosem Henryho Forda do procesního inženýrství bylo seřazení jednotlivých výrobních operací do jedné jediné výrobní linky, ve které se automobily montovaly ve sledu operací. V těchto začátcích H. Ford nabídl velmi omezený výběr typu automobilu, jeho vybavení či barvy, jelikož tehdejší vysoká produktivita byla založena na faktu, že se stále vyráběl téměř identický výrobek. Na tehdejší dobu tato velmi omezená variabilita umožnila nižší cenu vozidla, dnes již ale víme, že každý zákazník má individuální požadavky, kterým je v prostředí dravé konkurence nutno naslouchat. V průběhu 20. století se v automobilovém průmyslu postupně opustilo od masové výroby a začalo docházet k celosvětovému přizpůsobování přání zákazníka [5].

Taiichi Ohno se ve své roli manažera výrobní linky v japonské firmě Toyota zasloužil o položení základů štíhlé výroby. V polovině 20. století byla firma na pokraji bankrotu, nedostatek finančních prostředků neumožnil investice do moderních technologií a bylo tedy nutné přijít s revolučními nápady jak opět zajistit firmě Toyota dominantní postavení na trhu. Ve výrobních závodech firmy Toyota se neúspěšně snažili přejít od masové výroby k flexibilním cyklům dávek menších typových řad. Každá změna výrobního cyklu sebou nesla příliš vysoké náklady na seřízení strojů a změn na logistickém řetězci, tudíž z dlouhodobého hlediska bylo dosažení požadovaných finančních výsledků zcela nereálné. Taiichi Ohno se během svého pobytu v USA inspiroval dvěma poznatky. K první inspiraci došlo během tradičního závodu formulí Indianapolis 500, ze kterého Taiichi Ohno doslova převzal způsob

sehrané spolupráce techniků na vozidle, které přijelo do depa ze závodního okruhu. Doslova veškeré úkony byly vykonány v uceleném logickém sledu s maximální efektivitou a bez sebemenších prostojů. Druhým poznatek získal během svých nákupů v supermarketech, kdy je zboží na regálu průběžně doplňováno, tudíž se nestane, že by došlo k jeho úplnému vyprodání a zároveň pravidelné objednávky po menších dávkách zajistí stabilitu na logistickém řetězci. Na základě jeho pobytu v USA se mu podařilo zavést ve výrobních závodech Toyoty metody efektivního řízení procesů, díky kterým se stala firma Toyota celosvětovou jedničkou v počtu prodaných automobilů [5].

2.3 Principy metodologie Lean

Lean, neboli též štíhlá výroba nachází využití tam, kde je potřeba zvýšit výkonnost procesů za současného snížení nákladů. V dnešní době je ve výrobních podnicích snaha minimalizovat množství skladových zásob a s tím související i požadavky na prostor, který lze využít efektivněji. Navýšení výkonnosti se často provádí tím, že se celý proces analyzuje, následně se identifikují místa procesu, která mají nejvýznamnější vliv na současnou sníženou výkonnost. V těchto místech se následně navrhuje řešení k navýšení kapacity za současného kladení důrazu na zjednodušování úkonů v rámci celého procesu. Cílem metodologie Lean je zkrácení průběžných dob výroby, neboli časového úseku ohraničeného uvolněním výrobku do výrobního procesu a momentem dokončení poslední operace, po které výrobek již splňuje veškeré očekávané požadavky. Výrobní proces lze rozdělit na činnosti přidávající výrobku na hodnotě, kterými jsou hlavně výrobní operace a na činnosti, které výrobku na hodnotě nepřidávají, či dokonce ubírají, takové činnosti nazýváme plýtváním a snažíme se je z procesu eliminovat.

Principy štíhlé výroby lze shrnout do cyklu o pěti krocích implementace jednotlivých technik metodologie Lean tak, jak ilustruje Obrázek 1.



Obrázek 1: Implementační cyklus technik štíhlé výroby, zdroj [6]

Obrázek 1 lze dle internetového zdroje [6] dále detailněji rozvést v následujících bodech:

- **Přesné identifikování hodnoty z pohledu koncového zákazníka.** Výchozím bodem je uvědomění faktu, že pouze malá část z celkové produkční doby a úsilí představuje hodnotu pro koncového zákazníka. Přesné identifikování hodnoty z pohledu koncového zákazníka pro daný produkt či službu, nám umožní určit a následně eliminovat zdroje plýtvání.
- **Identifikace veškerých kroků hodnotového řetězce a eliminace kroků, které nepřidávají hodnotu výrobku.** Hodnotový řetězec představuje souhrn veškerých podnikových aktivit, které se podílejí na dodání produktu či služby zákazníkovi. Jedná se o kompletní ilustraci celého procesu. V momentě, kdy známe konkrétní požadavky zákazníka, je snadné v dalším kroku určit míru úspěšného dodání výrobku.
- **Vytvoř sled činností přidávajících na hodnotě výrobku v těsné posloupnosti, která zaručí hladký průtok výrobku směrem k zákazníkovi bez časových prodlev.** Skutečnost, že z celkové doby výroby se činnosti přidávající hodnotu podílejí méně než 5 %, je ve výrobní sféře zcela běžná. Odstraňováním plýtvání se zaručí plynulejší tok výrobku směrem k zákazníkovi bez přerušení či zbytečných prodlev.
- **Jakmile je průtok zaveden, umožní zákazníkovi táhnout výrobek ve výrobním procesu dle jeho požadavků.** Výrobek se dostává do výrobního procesu pouze na základě zákaznickovy objednávky. Pro dodržení principu tahu se nevyrábí nic na sklad. Vyrábí se tedy pouze jen to, co lze okamžitě zákazníkovi dodat.
- **Po jasném identifikování požadované hodnoty výrobku, kompletním zmapování hodnotového řetězce, eliminaci plýtvání, vytvoření průtoku a umožnění principu tahu ve výrobním procesu znovu opakuj celý cyklus tak dlouho, dokud není dosaženo dokonalosti za současné eliminace plýtvání.** Vytváření průtoku a zavedení tahu zcela radikálně přetváří podnikové procesy, které se stávají stabilnějšími a předvídatelnějšími. Pro dosažení požadovaného procesu, v němž se vyskytují jen hodnototvorné činnosti, je zapotřební neustále daný cyklus opakovat až do okamžiku eliminace veškerého plýtvání.

jehož obsluhu by zvládli i pracovníci s nižší kvalifikací. V tomto případě výrobní závod plýtvá dovednostmi svých zaměstnanců, protože není schopen alokovat pracovní úkony odpovídající jejich schopnostem.

2.5 Nástroje pro odstranění plýtvání

Mezi hlavní principy štíhlé výroby jednoznačně patří eliminace plýtvání. Základních sedm typů plýtvání bylo již zmíněno v předešlém textu, v době vzniku filosofie štíhlé výroby docházelo k uplatnění principů hlavně ve výrobní sféře, v poslední době ale došlo k rozšíření i do sféry státní správy, administrativy, služeb, atd. Nyní, když jsme se již seznámili se všemi druhy plýtvání, které naši činnost zbytečně zatěžují a mají zásadní vliv na naši konkurenceschopnost, je na čase zmínit nástroje pro jejich odstranění. Dle odborné literatury [8] patří mezi nástroje pro odstranění plýtvání:

- buňková a flexibilní výroba,
- zavedení filosofie kontinuálního zlepšování, též známo jako *kaizen*,
- uspořádání pracoviště dle pravidel 5S,
- systematické vyřazování defektních výrobků v průběhu jejich výroby, neboli *jidoka*,
- zabraňování pochybení, neboli *poka-yoke*,
- flexibilní alokování pracovních sil na jednotlivých pracovištích dle aktuální poptávky.

2.6 Nástroje metodologie Lean

Dle odborné literatury [5] je nezbytně nutné si před zahájením implementace principů metodologie Lean uvědomit, jaké procesní kroky přispívají k přidávání hodnoty výsledného produktu a které kroky v procesu patří mezi ty nepotřebné. Kritérii pro rozhodnutí, do které z těchto dvou skupin daná výrobní operace patří, jsou potřeby a požadavky zákazníka. Z toho důvodu se vyžaduje v systému zachovat ty kroky, za které je zákazník ochoten zaplatit a zároveň vyřadit z procesu takové postupy, které k tvorbě hodnot vůbec nepřispívají. Činnosti lze tedy dle internetového zdroje [9] rozdělit na dvě základní skupiny:

- činnosti, během kterých se na výrobku přidává hodnota (ang. Value-Adding), aby daná činnost mohla být vyhodnocena jako přispívající k tvorbě hodnoty, musí splňovat současně následující kritéria:

- zákazník tuto činnost vyžaduje a je ochoten za ní zaplatit,
- činnosti, které jsou správně vykonané hned napoprvé,
- činnosti, které určitým způsobem přetvoří produkt nebo službu.
- Činnosti, které se na přidávání hodnoty přímo nepodílejí, ty se dále mohou dělit na:
 - činnosti, které nejsou vůbec potřebné, tedy již zmíněné plýtvání,
 - činnosti, které z pohledu zákazníka nemají žádný význam, ale z nějakého důvodu je potřeba je vykonat (např. vnitřní předpisy, požadavky regulačního orgánu).

2.6.1 Mapování toku hodnot

Mapa toku hodnot obsahuje veškeré činnosti a vazby, které jsou nezbytné pro výrobu daného produktu. Vzhledem k tomu, že součástí mapy je i tok vstupního materiálu od dodavatele a sled činností pro doručení výsledného produktu zákazníkovi, získáváme ucelenou vizualizaci pro identifikování zdrojů plýtvání [10].

Tento nástroj využívá velmi hrubé rozlišovací úrovně, díky které získáme obraz celého procesu. Jednotlivé operace jsou zde reprezentovány bloky, tudíž máme možnost získat představu o toku materiálu v rámci celého procesu, nejen pouze pro určité části výroby. Dále nám tento nástroj umožňuje identifikovat nejen plýtvání, ale i jeho lokaci, tudíž lze snáze eliminovat příčiny. Nenahraditelnost mapování toku hodnot spočívá v možnosti okamžitě vidět vzájemné propojení mezi tokem informací a tokem materiálů.

2.6.2 Teorie omezení

Teorie omezení, též známá jako *Theory of Constraints*, se využívá k identifikaci nejvýznamnějších úzkých míst v rámci podnikových procesů, jejichž nápravou lze dosáhnout významného navýšení výkonnosti. Nejvýstižněji lze tuto teorii definovat známým výrokem: „řetěz je pouze tak silný, jak silný je jeho nejslabší článek“. Teorie říká, že každý systém má alespoň jedno omezení, které limituje výkonnost systému. Jednotlivá omezení se mohou vyskytovat ve formě zaměstnanců, zásob, informací, vybavení či dokonce předpisů [11].

V literatuře [12] se jako omezení výrobního podniku uvádí stroje, které mají výrobní kapacitu nižší, než jsou požadavky na daný stroj. V takovém případě, lze odstranit toto úzké místo pořízením dalšího stroje, což ovšem může být finančně velmi náročné, nebo odeslat

rozpracované výrobky k externímu partnerovi, s čímž jsou spojeny další náklady nejen za dopravu. V neposlední řadě je nutno zmínit, že odstraněním úzkého místa sice dojde k navýšení celkové kapacity, ale zároveň hrozí i riziko vytvoření nového úzkého místa v jiné části procesu.

2.6.3 Systém tahu

Systém tahu tvoří jeden z nezákladnějších principů štíhlé výroby využívající se k významnému snížení plýtvání ve formě skladových zásob či nadměrně rozpracované výroby. Jedná se o koncept výroby, kde hlavním spouštěčem produkce výrobků nejsou příkazy ani plány, ale zákaznická potřeba, což znamená, že veškeré podnikové zdroje jsou k výrobě využívány pouze tehdy, když dané výrobky budou okamžitě prodány [5].

Opačný koncept představuje systém tlaku, kdy se výrobky produkují na základě predikce budoucí poptávky. Tyto predikce ovšem obsahují značnou neurčitost, která ve výsledku může vést k tomu, že se vyrobené produkty neprodají a zbytečně finančně zatěžují firmu ve formě zásob.

2.6.4 Nástroj 5S

Název nástroje „5S“ vychází z pěti japonských slov začínajících na písmeno „s“, kterými jsou: *seiri*, *seiton*, *seiso*, *seiketsu* a *shitsuke*. Do českého jazyka lze nejlépe přeložit těchto pět japonských slov jako: *třídění*, *uspořádání věcí*, *úklid*, *standardizace* a *disciplína*. Nástroj 5S se skládá z celkem pěti fází, které vedou k efektivnímu uspořádání pracoviště výroby, čímž se ve výsledku významně eliminuje plýtvání. Jednotlivé kroky nástroje „5S“ mají dle literatury [13] následující posloupnost:

1. **Třídění** (japonsky *seiri*) – jedná se o první krok metody 5S, během kterého odstraňujeme z pracoviště veškeré položky či činnosti, které jsou na daném pracovišti zcela zbytečné. Rozhodování by nemělo být provedeno jednotlivcem, ale týmem odborníků, kteří zajistí, že na pracovišti zůstanou jen nezbytně nutné předměty.
2. **Uspořádání věcí** (jap. *seiton*) – jakmile se na pracovišti nachází pouze žádoucí předměty, umístí se tak, aby se zajistilo jejich snadné nalezení a následné uložení. Pro zvýšení plynulosti výroby je vhodné seřadit jednotlivé

nástroje dle sledu jejich skutečného využití. Každý nástroj by měl mít své jasně určené a označené místo.

3. **Úklid** (jap. *seiso*) - pracoviště by se mělo neustále udržovat v pořádku a čistotě. Uklizené pracoviště zaručí nejen rychlé nalezení požadovaného předmětu, ale i identifikaci potenciálních zdrojů havárií či pracovních úrazů.
4. **Standardizace** (jap. *seiketsu*) – pracovní úkony na daném pracovišti je nutné standardizovat tak, aby veškerý personál, který se vyskytuje a pracuje na daném místě, vždy vykonával danou činnost dle předepsaných pravidel. Udržitelnost stavu dosaženého předchozími třemi kroky se zajistí právě díky standardizaci.
5. **Disciplína** (jap. *shitsuke*) – vytvoření podnikové kultury a vnitřních předpisů, které zaručí, že se proces nevrátí do původního nežádoucího stavu.

3 Six Sigma

3.1 Definice a cíl metodologie Six Sigma

V odborné literatuře [5, 14] lze nalézt několik definic metodologie Six Sigma:

- vysoce technologická metodologie používaná inženýry a statistiky k jemnému doladění výrobků a procesů,
- metodologie Six Sigma je cíl téměř úplného pokrytí všech očekávání zákazníků,
- způsob řízení procesů, kterým se nevykáže více než 3,4 defektů na milion příležitostí,
- jedná se o uskutečňování rozsáhlé firemní kultury s cílem dosahovat lepšího uspokojování zákaznických potřeb, vyšší ziskovosti a konkurence schopnosti.

Nejvýstižnější definice [14] metodologii Six Sigma popisuje:

„Six Sigma je úplný a flexibilní systém dosahování, udržování a maximalizace obchodního úspěchu. Six Sigma je zejména založena na porozumění potřeb a očekávání zákazníků, disciplinovaném používání faktů, dat a statistické analýzy a na základě pečlivého přístupu k řízení, zlepšování a vytváření nových obchodních, výrobních a obslužných procesů.“

Cíl metodologie Six Sigma [14]:

„Cílem řízení výkonnosti podniku na základě metody Six Sigma je systematické snižování či zužování odchylek tak dlouho, dokud se mezi průměrnou hodnotu a mez stanovenou zákazníkem nevměstná šest standardních odchylek (odtud název Six Sigma). U mnoha výrobků, služeb a procesů to znamená značný a velmi cenný stupeň zlepšení, jehož dosud dosáhlo jen malé množství firem.“

3.2 Základní pojmy metodologie Six Sigma

Proces

Nejdůležitějším pojmem při využívání metodologie Six Sigma je proces. Procesem se rozumí jakákoli posloupnost kroků, která vede k určitému výsledku. Zaměstnanci organizací vykonávají určité činnosti, které jsou součástí rozsáhlejšího procesu, jehož výsledkem je produkt či služba daného podniku. Vzhledem k tomu, že zákazník nejvíce vnímá odchylky svého dodavatele, měl by každý podnik dbát na to, aby rozsah odchylek byl v rámci tolerance zákazníka.

Defekt

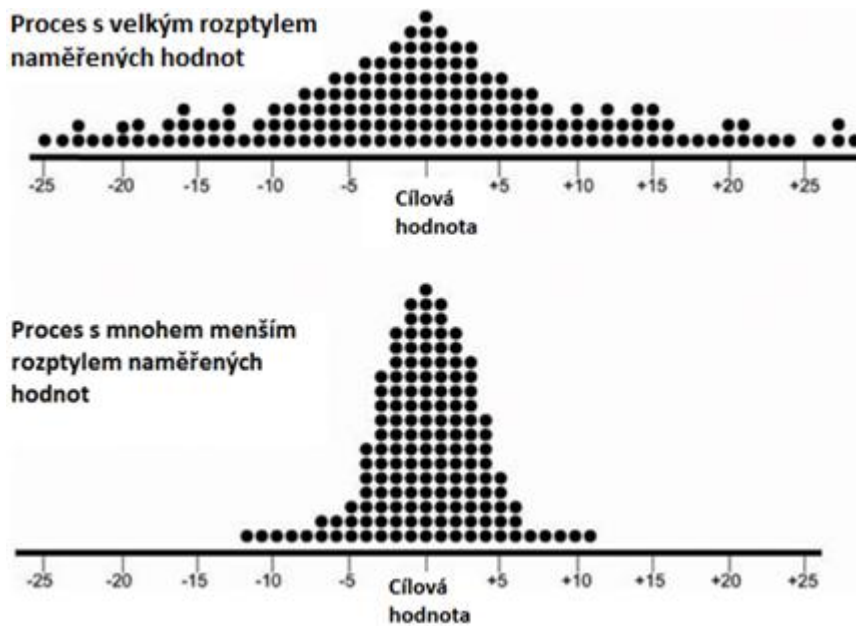
Defektem se rozumí měřitelná charakteristika na výstupu procesu, která překračuje limity přijatelnosti zákazníka.

Mezi další součásti metodologie Six Sigma patří měření výstupu na procesu za účelem určení počtu defektů. Six Sigma umožňuje podnikům eliminovat výskyt defektů, což vede ke zvýšení zisků a získávání větší důvěry zákazníků.

Směrodatná Odchylka

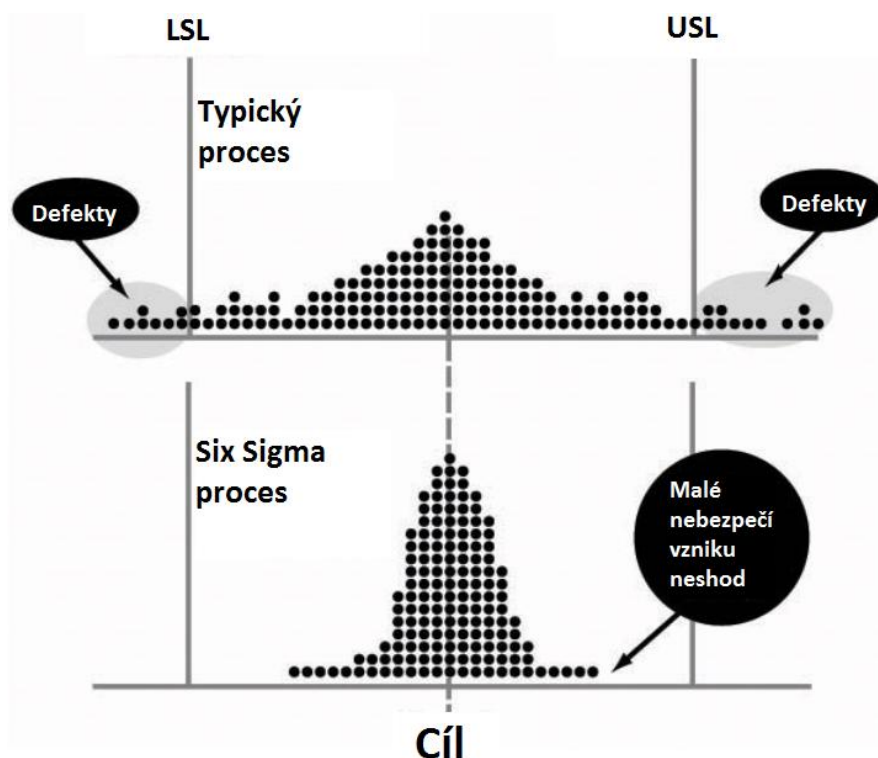
Odchylky představují měřitelný rozdíl mezi skutečně naměřenou hodnotou na výstupu a požadovanou hodnotou výstupu.

Ve statistice se využívá pojem směrodatná odchylka, která vyjadřuje míru odchýlení hodnot od jejich průměru. Směrodatná odchylka se značí malým řeckým písmenem „sigma“, neboli σ a vypočítá se jako odmocnina rozptylu.



Obrázek 2: Znázornění procesů s různým rozptylem hodnot na výstupu, zdroj: [15]

Zákazníkům požadavek se nesoustřeďuje pouze na průměr, ale i na míru variability. Jak je patrné z výše uvedeného Obrázku 2, dva procesy mohou mít stejnou průměrnou hodnotu na výstupu, ale mohou se lišit v míře variability. Z tohoto důvodu zákazník uvádí dolní i horní mez tolerance, neboli *Lower Specification Limit (LSL)* a *Upper Specification Limit (USL)*. Veškeré hodnoty uvnitř intervalu vymezeného LSL a USL jsou zákazníkovi vnímány jako vyhovující, hodnoty vně jako defekty.



Obrázek 3: Variabilita ovlivňuje naši schopnost plnit potřeby zákazníka, zdroj: [15]

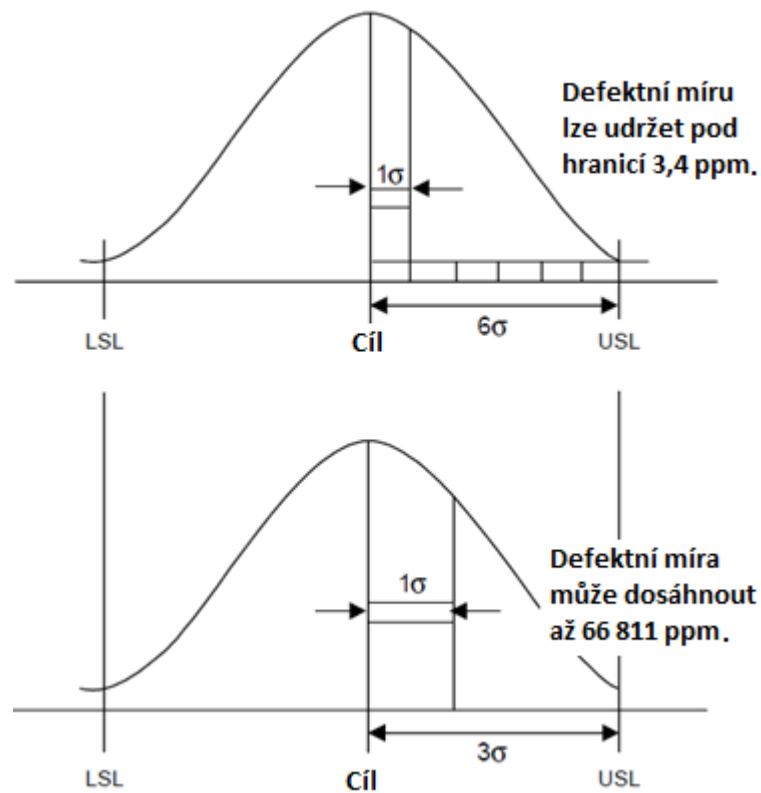
Výše uvedený Obrázek 3 může vyvolávat dojem, že Six Sigma proces nevykazuje žádné defekty, není tomu ve skutečnosti tak, máme pouze málo naměřených hodnot. Ve skutečnosti proces na úrovni 6σ dosahuje výkonnosti 99,99966%, což znamená, že na 1 milion příležitostí připadá 3,4 defektů. V reálném světě se podaří dosáhnout úrovně 6σ jen velmi malému počtu podniků, ve většině případů si společnosti vystačí s úrovní 4σ , tj. přesnost 99,37%.

Míra defektů, ppm a DPMO

Míra defektů, též označována jako p , představuje poměr mezi počtem defektních položek a jejich celkovým vyprodukovaným množstvím. Tato veličina se ve výrobním odvětví využívá již delší dobu. Množství defektních položek připadajících na jeden milion zkontrolovaných kusů se označuje ppm defektní míra, což je zkratka a překlad z anglického výrazu *parts-per-million defect rate*. Zejména v oblasti služeb nelze míru ppm řádně použít, z toho důvodů se napříč všemi odvětvími využívá ukazatel DPMO (anglicky *defects per million opportunities*), neboli počet defektů na milion příležitostí. Též by se dalo říct, že ukazatel DPMO představuje množství defektních událostí nesplňujících zákaznickovy specifikace na jeden milion možných příležitostí [16].

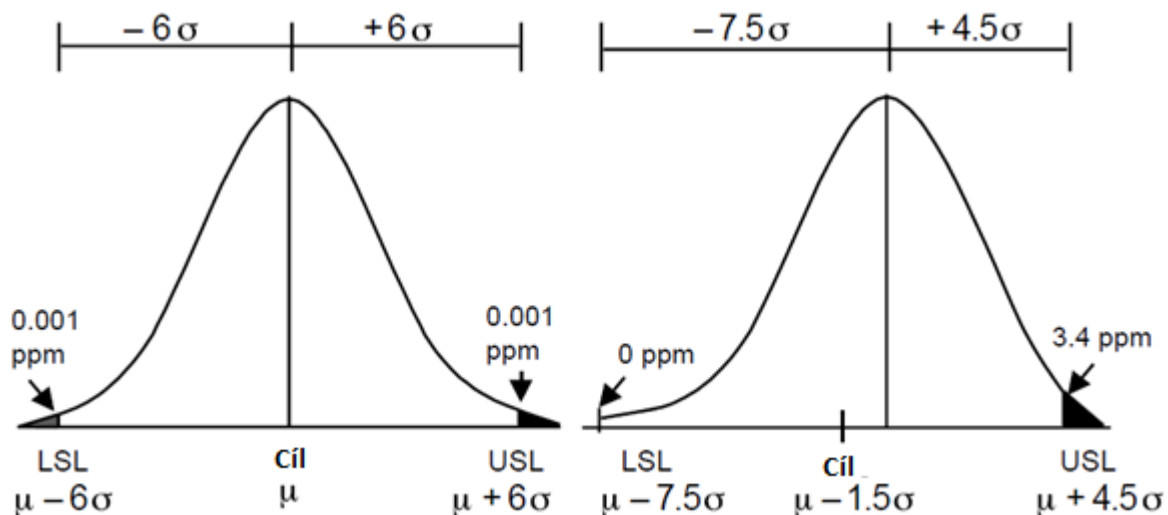
Úroveň kvality sigma

Specifikační limity (LSL a USL) představují tolerance, neboli výkonnostní rozpětí, které zákazník vyžaduje od výrobku či služby. Obrázek 4 ilustruje specifikační limity jako dvě významné vertikální hranice. Na obrázku zkratka LSL představuje dolní specifikační mez, USL horní specifikační mez a „Cíl“ zastupuje výslednou požadovanou hodnotu. Úroveň kvality sigma, též někdy *sigma úroveň*, se rovná vzdálenosti od střední hodnoty výstupu procesu k bližší specifikační mezi.



Obrázek 4: Úrovně kvality 6 σ a 3 σ , zdroj: [16]

Ve skutečnosti vyžadujeme, aby se střední hodnota výstupu procesu rovnala hodnotě požadavku zákazníka. Nicméně, měříme-li danou veličinu po určitou dobu v různých časových okamžicích, vyzorujeme, že se tyto střední hodnoty odlišují. Což znamená, že se průměrná hodnota výstupu procesu v průběhu času neustále pohybuje kolem cílové hodnoty stanovené zákazníkem. Za účelem vypořádání se s těmito typickými maximálními posuny středních hodnot v delším časovém horizontu, přičetla společnost Motorola posunovou hodnotu ve výši $\pm 1,5\sigma$ ke střední hodnotě výstupu. Tento posun střední hodnoty o $1,5\sigma$ se využívá při určování hodnoty úrovně kvality sigma, Obrázek 5.



Obrázek 5: Vliv posunu střední hodnoty výstupu o $1,5\sigma$ na procesu úrovně 6σ , zdroj: [16]

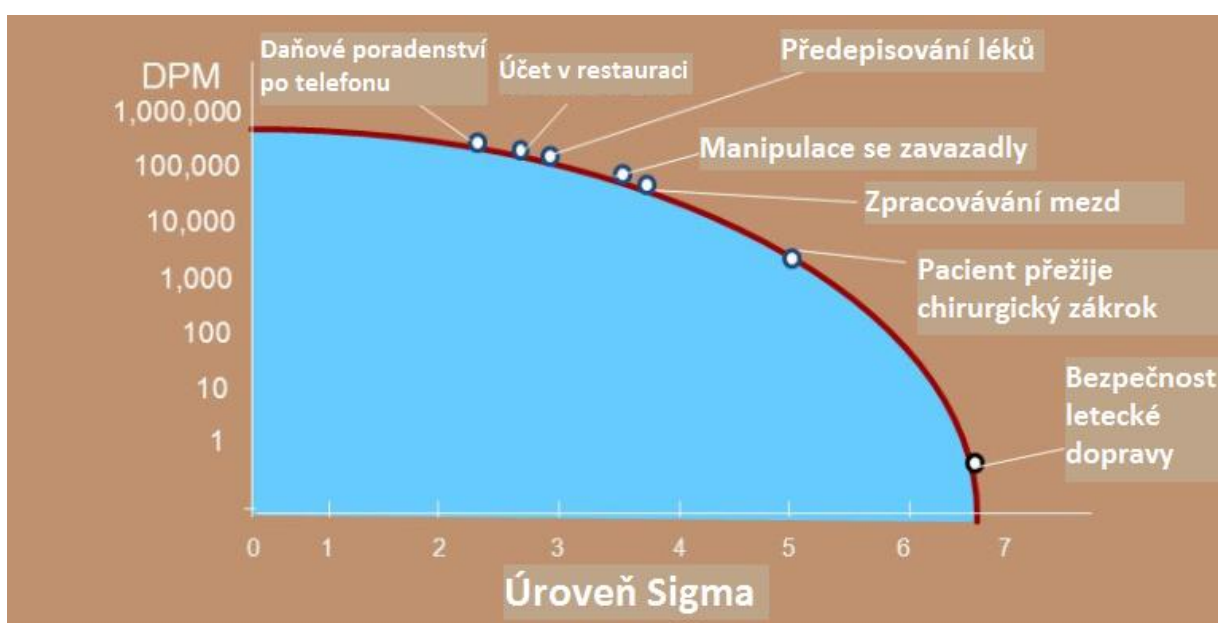
Tabulka 1: Úrovní kvality sigma, výtěžnost a míra defektů, zdroj: [16]

Úroveň kvality sigma	Střední hodnota procesu, fixní		Střední hodnota procesu, posun $1,5\sigma$	
	Výtěžnost procesu v procentech	Míra defektů (ppm)	Výtěžnost procesu v procentech	Míra defektů (ppm)
σ	68.26894	317,311	30.2328	697,672
2σ	95.44998	45,500	69.1230	308,770
3σ	99.73002	2,700	93.3189	66,811
4σ	99.99366	63.4	99.3790	6,210
5σ	99.999943	0.57	99.97674	233
6σ	99.9999998	0.002	99.99966	3.4

3.3 Six Sigma podnik

Podniky využívající nástroje metodologie Six Sigma při každodenní činnosti mohou dosáhnout významného navýšení výkonnosti svých procesů a získávání větší důvěry zákazníků. Některé podniky budují svůj marketing na vnitropodnikovém využívání postupů Six Sigmy, ovšem neznamená to, že ve skutečnosti takové úrovně dosahují. Představa, že podnik využívající Six Sigma dosahuje vždy výtěžnosti svých procesů na 99,99966 %, neboli 3,4 ppm, je trochu zavádějící. Takové úrovně kvality firmy mohou dosáhnout jen u několika svých podnikových procesů. Ve skutečnost se kvalita procesů u průměrného podniku pohybuje kolem úrovně 4σ , čemuž odpovídá výtěžnost procesů 99,379 %.

Kolem nás lze nalézt procesy, které fungují téměř bezchybně, mezi takové lze zařadit například mezibankovní operace či obchodování s cennými papíry, takové procesy jsou mnohem výše než 6σ . Dle internetových stránek Mezinárodní asociace leteckých dopravců [17] došlo v průběhu roku 2014 celkem ke 12 smrtelných leteckých nehod při celkovém počtu 38 milionů letů, což odpovídá 0,315 defektů na jeden milion příležitostí, tedy daleko výkonnější než 6σ . Na druhou stranu dle internetového zdroje [18] je pravděpodobnost správného doručení odbaveného zavazadla do cílové destinace na úrovni cca 99%, což představuje úroveň těsně pod 4σ . Výtěžnost procesu doručení zavazadel by bylo možné navýšit, ale za předpokladu navýšení výdajů na zlepšení, což by se přímo projevilo ve vyšších cenách letenek.



Obrázek 6: Úrovně kvality sigma v oblastech běžného života, zdroj: [19]

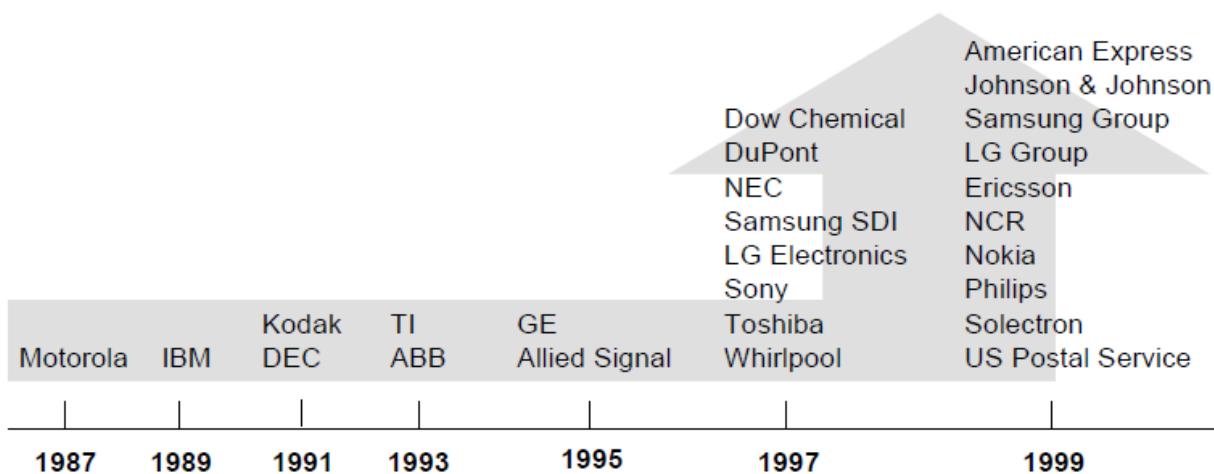
3.4 Historické počátky metodologie Six Sigma

Six Sigma se zrodila mnohem později než Lean, počátky lze nalézt až v sedmdesátých letech minulého století. V té době převzala japonská firma od společnosti Motorola divizi vyrábějící televizory Quasar. Ihned po této akvizici nastaly ve firmě změny vedoucí k japonskému způsobu řízení kvality, se kterým začala společnost Toyota a následně si ho osvojila i většina japonských společností. Pod japonským vedením došlo během krátké doby ke zredukování defektů o více než 95 %, díky tomu si vedení Motoroly uvědomilo, jak nízká kvalita byla za jejich působení. Když Bob Galvin v roce 1981 nastoupil v Motorole na pozici

CEO, vyzval veškeré divize Motoroly k radikálnímu zvýšení kvality všech výrobků v následujících pěti letech [20].

V roce 1984 zaměstnala Motorola Mikela Harryho, držitele doktorátu z Arizona State University, jehož hlavní rolí byla statistická analýza životnosti výrobků. Během svého působení objevil korelaci mezi délkou životnosti výrobku a množstvím dodatečného přepracování ve výrobní fázi výrobku. Dále statisticky prokázal, že výrobky vyrobené s nižší nekonformitou patřily po doručení k zákazníkovi mezi ty nejkvalitnější. Dne 15. ledna 1987 Bob Galvin odstartoval v rámci celé organizace Motorola iniciativu pod názvem „The Six Sigma Quality Program“, která měla za cíl zaručit výkonnost podnikových procesů na úrovni Six Sigma, tedy 3,4 defektů na 1 milion příležitostí. Do tohoto odvážného programu spadaly výrobky, procesy, služby a administrativa [20].

V roce 1988, tedy jeden rok po vyhlášení celopodnikové iniciativy Six Sigma ve společnosti Motorola, obdržela tato společnost Národní ocenění kvality Malcoma Baldridge. Jedná se o zlomový okamžik, jelikož se metodologie Six Sigma dostává do podvědomí dalších korporátních organizací a dochází k postupnému rozmachu, který trvá až do dnešního dne.



Obrázek 7: Vývoj využití metodologie Six Sigma globálními společnostmi, zdroj: [16]

3.5 Six Sigma nástroje

Metodologie Six Sigma obsahuje širokou řadu statistických nástrojů, jejichž uplatnění závisí na charakteru nasbíraných dat. V následující části uvádím statistické nástroje, bez kterých nelze provést základní analýzu získaných dat a posouzení sledovaného procesu. Veškeré statistické nástroje lze nalézt v softwaru Minitab 17, jehož studentskou licenci jsem využil pro zpracování této diplomové práce.

I-MR Chart

Pod názvem IM-R chart se skrývá regulační diagram složený ze dvou grafů. První graf představuje individuální hodnoty (*Individuals*), druhý graf ilustruje klouzavé rozpětí (*Moving Range*). Regulační diagram slouží k posouzení stability systému na základě nasbíraných dat. V případě, že se hodnoty na výstupu procesu nacházejí v oblasti vymezené UCL a LCL, lze statisticky považovat daný proces za stabilní. Překročí-li ovšem jediná hodnota tuto mez, daný systém je nestabilní a je zapotřebí provést nápravné opatření procesu. Dané meze UCL a LCL jsou definované jako trojnásobek směrodatné odchylky naměřených hodnot, tyto meze se vynášejí na obě dvě strany od střední hodnoty, čímž vzniká ohraničená oblast pro posuzování stability procesu. Regulační diagram a způsob jeho interpretování se vyvíjel desítky let, znalosti odborníků a praxe definují nestabilitu procesu následovně:

- alespoň jedna naměřená hodnota se nachází mimo kontrolní meze určené UCL a LCL,
- nebo minimálně devět po sobě jdoucích hodnot se nachází na téže straně od střední hodnoty.

Vyhodnocení regulačního diagramu začíná částí znázorňující variabilitu procesu, jednotlivé hodnoty jsou vypočteny jako absolutní hodnoty rozdílů dvou po sobě jdoucích hodnot. Jestliže dojde ke splnění alespoň jedné podmínky nestability, je nutné zavést zásah do procesu za účelem dosažení stability. V případě splnění podmínek stability v regulačním diagramu pro klouzavé rozpětí, následuje obdobné posouzení regulačního diagramu pro individuální hodnoty dle stejných kritérií.

Test normality

Vzhledem ke skutečnosti, že výše zmíněné regulační diagramy předpokládají normalitu nasbíraných dat, je žádoucí provést test normality. V každém procesu se nachází určitá náhodnost, normalita dat nám též zajistí, že v dlouhodobém horizontu bude tato nahodilost rovnoměrně rozdělena na obě dvě strany od střední hodnoty.

Stanovení normality dat lze provést pomocí několika statistických testů, v této diplomové práci použiji Anderson-Darlingův test normality, který je zakomponován ve statistickém nástroji Minitab 17. Zmíněný statistický software určí pro daný soubor dat p -hodnotu, na základě které akceptujeme nulovou hypotézu deklarující, že soubor dat pochází z normálního rozdělení na hladině významnosti 0,05. Jestliže vypočtená p -hodnota je menší než hladina významnosti, zamítáme nulovou hypotézu.

Analýza výtěžnosti procesu

Výtěžností procesu se rozumí podíl naměřených hodnot splňující požadavky na proces, neboli meze definované LSL a USL. Součástí statistického softwaru Minitab 17 je nástroj „*Capability Analysis*“, pomocí kterého lze vykreslit nasbíraná data histogramem včetně proložené křivky hustoty normálního rozdělení pravděpodobnosti. Zvolený statistický nástroj určí nejenom výtěžnost procesu pro naměřená data, což je výpočet snadno proveditelný i ručně, ale i odhad pro budoucí výtěžnost. Aby bylo možné tento odhad budoucí výtěžnosti považovat za směrodatný, je nezbytně nutné mít hodnoty ze stabilního procesu a normálního rozdělení. Odhad budoucí výtěžnosti procesu se ve statickém nástroji nachází pod názvem „*Expected Overall Performance*“, ovšem nejsou-li data z normálního rozdělení, nelze brát tento údaj za relevantní.

4 Kombinace Lean a Six Sigma

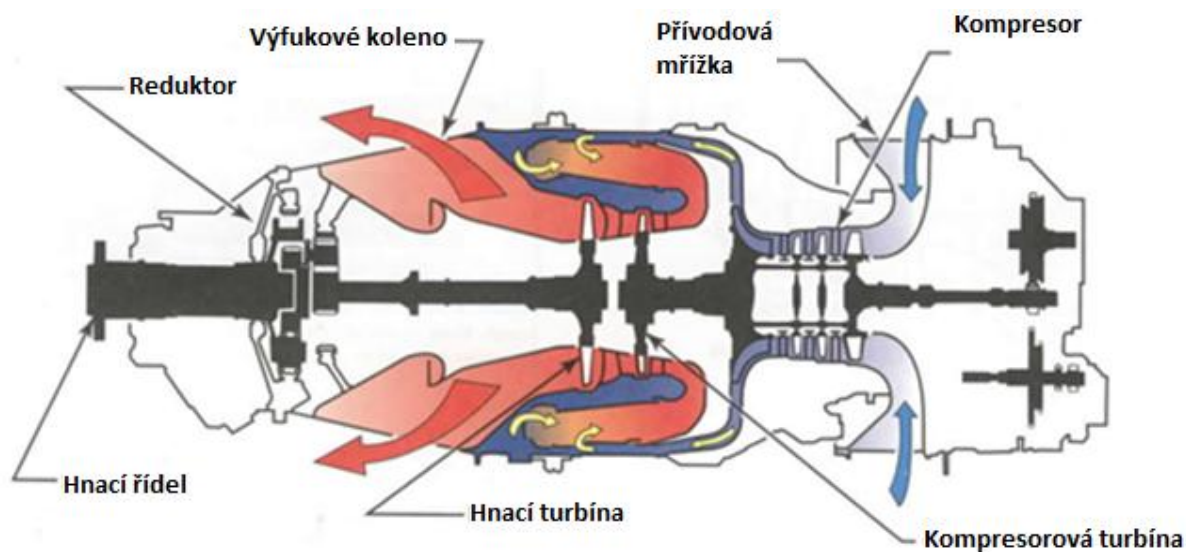
Důvodem, proč v průběhu vývoje přístupů Lean a Six Sigma došlo ke sjednocení, je právě synergický efekt. Při využití metodologie Lean Six Sigma v praxi dostávají členové řešitelského týmu i větší flexibilitu, jelikož dle charakteru zlepšovatelského projektu, na kterém právě pracují, zvolí nejvhodnější kombinaci nabízených nástrojů. V některých případech dojde k využití jenom metodologie Lean, nebo výlučně metodologie Six Sigma.

Tabulka 2: Hlavní znaky a porovnání Lean a Six Sigma, zdroj: [5]

	Lean	Six Sigma
Záměr	Efektivní vytvoření hodnoty, která je definována na základě znalosti požadavku zákazníka.	Efektivní zajištění kvality, která je vymezena kritickými vlastnostmi předmětu podle definice zákazníka.
Cesta	Odstranění plýtvání.	Snížení variability.
Předmět zkoumání	Horizontální pohled na zkoumání a souhrn procesních toků.	Vertikální pohled na vyhledávání a eliminaci problémových míst v procesech.
Hlavní předpoklady	<ul style="list-style-type: none"> • Odstranění plýtvání ovlivní celkovou výkonnost procesu. • Opakovaná malá zlepšení přinášejí jistější úspěchy a méně rizik než jedna rozsáhlá změna. 	<ul style="list-style-type: none"> • Odstranění variability procesu zvýší celkovou kvalitu jeho výstupů. • Poznání vycházející z faktů je obrovskou hodnotou.
Nejvýraznější přínos	Zkrácení doby trvání procesu.	Zvýšená uniformita výstupů procesu.
Další přínosy	<ul style="list-style-type: none"> • Omezení plýtvání, • Zrychlený průchod, • Snížení provozních zásob, • Řízení prostřednictvím měření procesů, • Zvýšená kvalita zajištěná prostřednictvím zlepšování toku činností. 	<ul style="list-style-type: none"> • Omezení variability výstupů, • Stabilita kvality výstupů, • Snížení provozních zásob, • Řízení prostřednictvím měření chybovosti, • Zvýšená kvalita zajištěná prostřednictvím ostraňováním rušivých vlivů.
Organizace cyklu projektu	Cyklický/iterativní PDCA/PDSA, <i>Naplánuj-Udělej-Zkontroluj-Zasáhni.</i>	Přímý DMAIC <i>Definuj-Měř-Analyzuj-Zlepši-Kontroluj.</i>
Organizace týmů	Integrované zlepšovateľské týmy.	Integrované zlepšovateľské týmy s doporučenou strukturou rolí.
Klíčové metody	<ul style="list-style-type: none"> • Mapování a měření procesních toků, • Optimalizace procesních toků. 	<ul style="list-style-type: none"> • Měření výskytů a četností, • Analýzy příčin a důsledků.

5 Popis turbovrtulového motoru

Vzduch se do turbovrtulového motoru nasává přes přívodovou mřížku, jejímž hlavním účelem je zabránění proniknutí hrubých nečistot do útrobu motoru. Následně se vzduch postupně stlačuje v axiálním kompresoru, který má více stupňů a zaručí se tím proudění stlačeného vzduchu paralelně s osou rotace motoru. Na axiální kompresor navazuje radiální kompresor zajišťující transformaci z axiálního proudění na radiální proudění stlačeného vzduchu za současného zvýšení rychlosti proudění chladného vzduchu. V další fázi se dostává stlačený studený vzduch do spalovací komory, kde dochází k difuzi vzduchu s palivem pomocí palivové trysky. Jakmile je vzduch promíchán s palivem dochází k zapálení směsi pomocí zapalovací svíčky. Zažehnutím směsi dochází ke vzniku značného množství tepelné energie a horkých plynů, které následně roztáčí turbínu prvního stupně, též označovanou jako kompresorovou turbínu, jelikož jejím výhradním účelem je pohánění kompresorové části motoru. Dále postupující horký vzduch má stále dostatek energie na to, aby roztočil hnací turbínu, která následně pohání hnací řídél motoru přes planetový reduktor.



Obrázek 8: Ilustrace turbovrtulového motoru, zdroj: [21]

6 Specifikace letecké komponenty

Pro aplikaci metodologie Lean Six Sigma jsem si vybral výrobní proces statorové lopatky. Statorová lopatka se nachází v axiálním kompresoru, tedy části motoru, kde dochází ke stlačování proudu nasátého vzduchu paralelně s osou rotace motoru. Axiální kompresor se skládá z několika stupňů. Každý stupeň axiálního kompresoru je tvořen rotorem a statorem. Úkolem rotující části každého stupně je urychlení proudění vzduchu, čímž

dochází k nárůstu celkového tlaku. Statorová část následně transformuje rotační kinetickou energii na statický tlak, další účel statoru představuje i nasměrování proudu vzduchu do dalšího stupně axiálního kompresoru, kde dochází k opětovnému stlačení vzduchu.

K výrobě statoru je zapotřebí nejprve vyrobit čtyři komponenty, kterými jsou:

- statorová lopatka,
- vnitřní plášť statoru,
- vnější plášť statoru,
- pouzdro statoru.

Jakmile se ve skladových zásobách nachází současně všechny čtyři výše uvedené komponenty, může se začít s výrobou statorů. Vzhledem k tomu, že výrobní proces statorových lopatek vykazuje nepřijatelné odchylky, rozhodl jsem se na tento proces aplikovat zlepšovateľskou metodologii Lean Six Sigma.



Obrázek 9: Ilustrační obrázek statorové lopatky turbovrtulového motoru, zdroj: [22]

6.1 Výrobní proces statorové lopatky

Vyrobená statorová lopatka je výsledkem sledu operací, které se provádějí v přesně dané posloupnosti takovým způsobem, aby ze vstupního tyčového materiálu vznikla letecká komponenta splňující nejpřísnější normy. Samotné výrobě předchází výrobní plán, ten se sestavuje na základě poptávky po leteckém motoru, predikcí prodeje a skladových zásob. V diplomové práci již pracuji s hotovým výrobním plánem a soustřeďuji se již pouze na samotný výrobní proces, který vyžaduje značné zlepšení.

Zlepšením se v tomto případě rozumí zkrácení průběžné doby výroby, tedy časového úseku mezi uvolněním výrobní zakázky do výroby a finálním zaskladněním dané komponenty na sklad. Zkrácením průběžné doby výroby lze významně dosáhnout značných finančních úspor tím, že není nutno mít tak velkou rozpracovanost výrobních příkazů na danou

komponentu. Internetový zdroj [23] obsahuje Littleho vztah, pomocí kterého lze prokázat, že s dlouhou dobou výroby rostou i náklady na rozpracovanost. Jestliže $E[F]$ označíme jako střední počet požadavků ve frontě, λ jako intenzitu vstupního toku a $E[W]$ jako střední dobu čekání ve frontě, Littleho vztah z uvedeného zdroje je dán vztahem:

$$E[F] = \lambda \cdot E[W] \quad (1)$$

Pomocí výše uvedeného vzorce lze snadno určit počet rozpracovaných zakázek ve výrobním procesu, a to jako součin intenzity uvolňování zakázek do výroby a střední hodnoty průběžné doby výroby. Uvolňujeme-li každý týden do výroby 2 zakázky a střední doba výroby jedné zakázky činí 6 týdnů, vyjde nám střední hodnota rozpracovaných zakázek 12. Podaří-li se nám daný výrobní proces vylepšit, neboli zkrátit průběžnou dobu výroby například o 50 %, jsme schopni mít střední rozpracovanost pouze 6 zakázek. Na každou rozpracovanou zakázku ve výrobě se ve skutečnosti vážou nemalé náklady ve formě materiálu a práce. Snížen průběžné doby výroby vede k nižším požadavkům na skladové zásoby vstupního materiálu, efektivnímu využívání práce dělníků, nižší potřebě přepravních bedýnek, nižšímu záboru plochy ve výrobě a nižším skladovým zásobám hotového výrobku. Dále ze zmíněného vztahu vyplývá, že snížením počtu rozpracovaných zakázek ve výrobním procesu lze urychlit jejich dokončení. Poslední praktické využití daného vztahu spočívá v určení střední doby vyhotovení dané zakázky v týdnech, jestliže známe počet rozpracovaných zakázek a množství zakázek, které se průměrně dokončí za jeden týden.

6.1.1 Výrobní postup

Samotné výrobě statorové lopatky předchází celá řada činností, od prvotní objednávky motoru, na základě které se následně upravuje výrobní plán komponent pro letecký motor až po nákup vstupního materiálu. Na proces výroby letecké komponenty se tedy váže široké množství dalších administrativních, obchodních či certifikačních procesů, jejichž působení v této práci nebudu dále zmiňovat, jelikož se samotným výrobním procesem a jeho zlepšováním to přímo nesouvisí. Výrobní proces v této práci ohraničím skladovými zásobami vstupního materiálu, v tomto případě se jedná o tyč s obdélníkovým průřezem, vytvořeným plánem pro výrobu komponent, pracovními hodinami na jednotlivých pracovištích ve výrobě, zaměstnanci výrobní části podniku a následnou montáží motoru, kterou již v této práci nebudu dále rozvádět. Z důvodu případných technologických změn se mezi číselným označením jednotlivých výrobních operací ponechává prostor pro doplnění dalších operací, v následně uvedeném postupu lze v budoucnu vložit mezi operace až čtyři nové operace.

Operace 00 – Uvolnění výrobní zakázky

Prvotním krokem každé výrobní zakázky je její vytvoření a současně přiřazení unikátního označení, například ve tvaru **15-BL0047**. Výrobní zakázka se zakládá na určitou montážní sestavu a konkrétní množství, v tomto případě se jedná o zakázku na 40 kusů lopatek. Výrobní zakázka se skládá z:

- odběrného listu,
- výrobní průvodky,
- výkresové dokumentace.

Na základě odběrného listu je možné uskutečnit vydání vstupního hutního materiálu, ze kterého se následně daná letecká komponenta vyrobí. Výrobní průvodka představuje dokument obsahující veškeré nezbytné údaje o dané výrobní zakázce, jejím nejdůležitějším obsahem je seznam všech výrobních operací včetně jejich detailního technologického postupu výroby. Výkresová dokumentace obsahuje technické výkresy, na základě kterých operátor výroby provádí výrobní operace z výrobní průvodky.

Samotnému uvolnění výrobní zakázky do stavu uvolnění předchází založení výrobní zakázky pod unikátním označením a kontrolou stavu skladových zásob hutního materiálu. V případě, že se na skladě nachází jeho dostatečné množství, lze provést jeho rezervaci a přesun zakázky do stavu „Uvolněno“. Následně se provede vytištění odběrného listu, výrobní průvodky a výkresové dokumentace. Tyto tři dokumenty dále dispečer výroby doručí do skladu hutního materiálu, kde se provede následující operace.

Operace 01 – Řezání

Jakmile dorazí veškeré dokumenty výrobní zakázky do skladu hutního materiálu, může se začít s vyskladněním a následným řezáním vstupního materiálu. V případě statorové lopatky se používá čtyřhranná tyč, která se pásovou pilou řeže na přířezy o délce 95 mm. Celkově se v rámci jedné zakázky nařeže 40 přířezů, které následně daný operátor zbavuje kovových otřepů. Po začištění se všech 40 přířezů umísťuje do přepravky, díky které se zamezí poškození dílů během přepravy mezi dalšími výrobními operacemi.

V momentě fyzického vydání materiálu do výrobní zakázky zůstává odběrný list v archivu skladu hutního materiálu a výrobní průvodka spolu s výkresovou dokumentací doprovází vydaný materiál všemi výrobními operacemi.

Operace 05 – Ohrubování

Během operace 05 dochází k ohrubování přířezu neboli odfrézování předepsané vrstvy materiálu. V případě statorových lopatek se z přířezu pomocí CNC frézy odfrézuje 3 mm

materiálu z největší plochy přířezu a poloviny plochy všech čtyř bočních stran obdélníkového přířezu. Součástí je i částečné zúžení obou konců přířezů pro uchycení do přípravku v následujících operacích.

Operace 10 – Ohrubování

Operace 10 se provádí na stejném stroji jako operace 05. Cílem této výrobní operace je ohrubování zbylých ploch přířezu, tak aby výsledný polotovár byl dokonale začištěn a dosahoval předepsaných rozměrů. Na konci této výrobní operace má též přířez kompletně provedené zúžení konců pro upevnění do přípravku.

Operace 15 – Žihání

V průběhu této operace se odstraní vnitřní pnutí, které by mohlo při dalším mechanickým zpracování způsobovat nežádoucí změnu rozměrů daného kovového dílu. Na rozdíl od předešlých operací se zde zpracovává všech 40 přířezů najednou. Nejdříve v peci dochází k ohřevu na teplotu 850 °C při rychlosti 30 °C za minutu. Jakmile se dosáhne dané teploty, dochází k výdrži po dobu 25 minut. Následně se provádí další ohřev na teplotu 1200 °C při rychlosti 20 °C za minutu, na teplotě 1200 °C se provádí výdrž po dobu 15 minut. Celý proces se zakončuje prudkým ochlazením na teplotu místnosti. Poté obsluha pece uloží vyžíhané přířezy do přepravní bedýnky.

Operace 20 – Vrtání a fréza

Cílem operace 20 je připravit jednotlivé přířezy pro následné frézování, během kterého dostanou přířezy tvar lopatek. Nejdříve je ovšem nutné během operace 20 vyvrtat na obou koncích přířezu upevňovací důlčičky proti sobě a po stranách přířezu též vyfrézovat upevňovací drážky.

Operace 25 – CNC fréza

Sled přechozích operací představoval práce, během kterých přířez nezměnil význačně svůj tvar, došlo k ohrubování, tepelnému zpracování, tvorbě důlků a drážek. Operace 25 slouží k vytvoření listu lopatky, jehož přesně vyfrézované přechodové poloměry a kuželové plochy zajistí požadované proudění vzduchu ve statoru axiálního kompresoru. Po zachycení do přípravku díky vytvořeným důlkům a drážkám nejprve dochází k hrubování a následně k frézování, po kterém má již list lopatky požadovaný tvar. Během této operace je z přířezu odejmuto nejvíce materiálu, je tvořen pouze listem lopatky, na jehož obou koncích se nachází původní obrobený přířez s důlky a drážkou.

Operace 30 – Zámečnick

Na pracovišti zámečnicků dochází ke sražení hran nejen na ostří lopatkového listu, ale i přechodové části mezi listem a zbylé části původního přířezu. Před uložením do přepravní bedýnky se polotovar dodatečně ofouká suchým stlačeným vzduchem.

Operace 35 – Mytí

Během této operace se provádí odmaštění polotovaru. Hlavní důvod pro operaci 35 představuje následná technická kontrola, v průběhu které musí být všechny polotovary kompletně vyčištěny, aby se daly snadněji identifikovat veškeré nežádoucí povrchové vady.

Operace 40 – Kontrola kvality

Kontrolují se nejen povrchové vady ve formě trhlinek, vrypů či otláčenin, ale i profil listu lopatky. Namátkově se provádí kontrola přechodových poloměrů a kuželových ploch u každé desáté lopatky.

Operace 45 – Řezání drátem

Po úspěšně provedené kontrole následuje drátové řezání, které citlivě oddělí zbytky ohrubovaného přířezu od listu lopatky. Výsledkem je samotná lopatka vážící cca 20 gramů, ovšem původní přířez z tyče vážil cca 450 gramů.

Operace 50 – Zámečnick

Zámečnick již v průběhu této operace sráží hrany dle technické dokumentace, na jednu lopatku stačí cca 5 minut včetně ofoukání suchým stlačeným vzduchem a uložení do přepravní bedýnky.

Operace 55 – Kontrola kvality

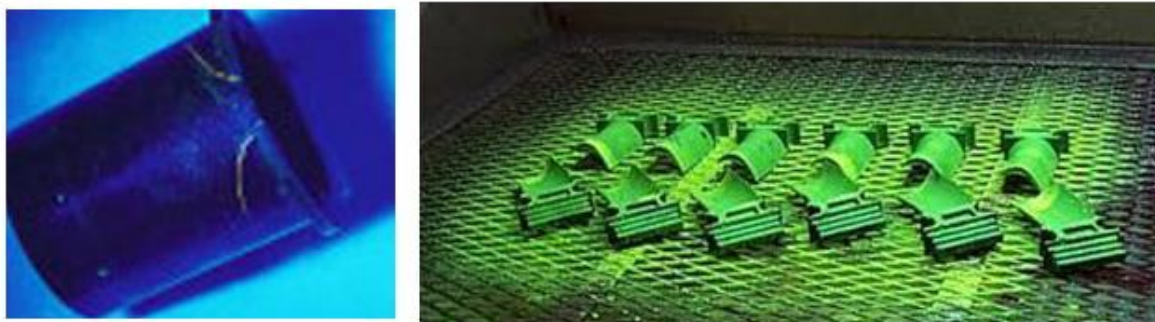
Pracovníci oddělení kontroly kvality ověřují u každé páté lopatky správné provedení drátového řezání a sražení hran.

Operace 60 – Mytí

Vzhledem k nutnosti provedení následující barevně luminiscenční defektoskopie se vyžaduje nejprve provést odmaštění lopatek dle stanoveného předpisu. V případě, že by se neprovedlo řádné umytí, mohly by zbylé nečistoty na povrchu zabránit proniknutí fluorescenčního penetrantu do povrchových vad, čímž by se zabránilo jejich identifikaci.

Operace 65 – Kontrola kvality

Předposlední kontrola v celém výrobním procesu spočívá v identifikaci povrchových vad metodou barevně luminiscenční defektoskopie. Nejprve se na vyčištěné lopatky nanese fluorescenční penetrant, který se nechá po stanovený okamžik působit, aby mohl proniknout do možných povrchových vad. Hadříkem se následně penetrant setře a pomocí ultrafialového záření v kombinaci s aktivátorem lze identifikovat přítomný penetrant v povrchových prasklinách lopatky.



Obrázek 10: Ilustrace barevně luminiscenční defektoskopie na lopatce, zdroj: [24]

Operace 70 – Mytí

Poslední mytí v celém výrobním procesu slouží k odstranění fluorescenčního penetrantu a aktivátoru. Vzhledem k tomu, že předchozí kontrola obsahuje úkony spjaté pouze s nalezením povrchových vad, nachází se v celém výrobním procesu ještě jedna kontrolní operace, která slouží k finálnímu ověření všech rozměrů.

Operace 75 – Kontrola kvality

Po důkladném omytí lopatek se provádí ověření rozměrů dle technické dokumentace. Součástí této operace je i vytvoření dokumentace obsahující protokoly vypracované během veškerých kontrol kvality.

Operace 80 – Zaskladnění komponenty

Zaskladněním se rozumí operace, během které pracovníci skladu převezmou komponenty po finální kontrole a následně umístí na určené místo ve skladu. Celý proces zaskladňování probíhá jak fyzicky, tak i v informačním systému, tudíž se lopatky po jejich zaskladnění jeví v systému jako disponibilní. Jakmile pracovník uskladní lopatky, přesouvá danou výrobní zakázku do stavu „Dokončeno“, čímž celý výrobní proces končí a lopatky je možno použít pro kompletaci vyšší sestavy, tedy statoru.

Tabulka 3: Pracovní doba na jednotlivých pracovištích včetně norem práce pro operace,
zdroj: autor

Operace	Název operace	Počet pracovních dní v týdnu	Pracovní hodiny	Seřizovací čas [min]	Časová norma [kus/min]	Celkový čas [h]
0	Uvolnění	5	08:00 - 16:00	10	0	0,17
1	Dělení materiálu	5	08:00 - 16:00	10	2	1,50
5	CNC frézování	7	00:00 - 23:59	30	7	5,17
10	CNC frézování	7	00:00 - 23:59	45	9	6,75
15	Tepelné zpracování	5	00:00 - 23:59	120	0	2,00
20	CNC vrtání a frézování	7	00:00 - 23:59	50	8	6,17
25	CNC frézování	7	00:00 - 23:59	70	35	24,50
30	Zámečnick	5	08:00 - 16:00	10	4	2,83
35	Mytí	5	08:00 - 16:00	15	0	0,25
40	Kontrola kvality	7	00:00 - 23:59	10	6	4,17
45	Řezání drátem	7	00:00 - 23:59	45	18	12,75
50	Zámečnick	5	08:00 - 16:00	10	5	3,50
55	Kontrola kvality	7	00:00 - 23:59	10	3	2,17
60	Mytí	5	08:00 - 16:00	15	0	0,25
65	Kontrola kvality	7	00:00 - 23:59	45	3	2,75
70	Mytí	5	08:00 - 16:00	15	0	0,25
75	Kontrola kvality	7	00:00 - 23:59	20	3	2,33
80	Zaskladnění	5	08:00 - 16:00	10	0	0,17

Tabulka 3 slouží jako vstupní údaj pro tvorbu plánů výroby. Některé operace v uvedené Tabulce 3 nemají žádnou časovou normu na kus, protože se během dané operace zpracovávají všechny kusy najednou. K tomu dochází zejména při tepelném zpracování, kdy se veškeré kusy umísťují do jedné vsázky, která se následně jako celek vyžihá v peci. Podobně je tomu i u mytí, neboli odmašťování, které se provádí v pračce. V těchto případech se seřizovací čas rovná době potřebné na kompletní provedení dané výrobní operace.

Seřizovací čas a časová norma na kus hrají významnou roli ve štíhlé výrobě. Z důvodu efektivního využití časových zdrojů by se vždy měly tyto dva časy brát v úvahu při plánování sledu práce pro jednotlivá pracoviště. Ve výrobě má každá hodina práce vysokou hodnotu, tudíž pokud hodinu seřizujeme stroj pro pouze jednu zakázku, po které následuje zcela odlišná výrobní zakázka vyžadující rozdílné seřízení výrobního stroje, dochází ke značnému plýtvání. Z toho důvodu se v ideálním případě vyžaduje pro operace s delšími seřizovacími časy vyhotovit hned po sobě více než jednu výrobní zakázku na stejnou položku, například lopatku. V reálné výrobě ovšem lze velmi obtížně dosáhnout takové efektivity, jelikož se ve výrobě vyskytuje velké množství různých výrobních zakázek, jejichž priorit se mění

v čase, následkem čehož dochází k roztržení seskupení výrobních zakázek o stejné komponentě. Výsledkem této fragmentace je nahodilé rozmístění rozpracovaných zakázek ve výrobě, která vede k neefektivnímu využívání seřizovacích časů.

V předchozím odstavci jsem uvedl, že výrobní zakázky na stejnou komponentu by se měly ve výrobním procesu pohybovat ve shlucích, aby se případně mohlo vyhotovit na výrobní operaci více výrobních zakázek současně, například při mytí či tepelném zpracování, nebo hned po sobě, například CNC frézování. Teorie štíhlé výroby říká, že jakékoli čekání se rovná plýtvání, jelikož se na daném výrobku nepřidává žádná práce a současně čekající rozpracovaný výrobek na sebe váže finanční prostředky, které by se při efektivnějším plánování daly využít vhodněji. V případě, že by výrobní zakázky putovaly výrobním procesem ve shlucích, například ve trojici, a dorazily by k výrobní operaci 25, čekala by třetí zakázka na operaci 25 téměř 48 hodin za předpokladu, že daný stroj nemá ke zpracování jiné zakázky, čímž by se čekání prodloužilo. Zde jsem chtěl poukázat na to, že pro vyšší efektivitu výroby je vhodné, když na časově náročné operace trvající desítky hodin přichází výrobní zakázky v určitých odstupech, čímž se značně zredukuje čekání zakázky na vstupním místě výrobního stroje.

Výrobní zakázky tvoří součást komplexního systému, v němž se nachází značné množství vzájemně odporujících požadavků. Zmínil jsem shlukování výrobních příkazů, kdy se snažíme v průběhu výrobního procesu držet sjednoceně více výrobních zakázek, aby se mohly na určitých výrobních operacích provést současně, čímž se značně ušetří čas i peníze. Na druhou stranu, dorazí-li tento shluk zakázek na operaci trvající desítky hodin a zároveň neexistuje možnost provést zakázky souběžně, dochází ve výrobním systému ke ztrátám. Přítomnost ostatních výrobních požadavků a omezení vede k tomu, že dosažení optimálního sestavení výrobního plánu, který by bylo možné splnit, představuje těžko proveditelné řešení. Vždy existuje více způsobů řízení výrobních zakázek, ale rozhodnutí o tom nejvhodnějším závisí na konfiguraci kritérií.

7 Implementační proces metodologie Lean Six Sigma

K zajištění úspěšné implementace metodologie Lean Six Sigma se dle literatury [25] využívá cyklus DMAIC, jehož název je odvozen z počátečních písmen anglických slov Define, Measure, Analyze, Improve and Control (tj. Definovat, Měřit, Analyzovat, Zlepšit a Řídit). Proces DMAIC lze chápat jako pětikrokový postup, při jehož správném použití lze dosáhnout významného zlepšení výkonnosti procesů. V následující části práce uvádím pro každý krok cyklu DMAIC stručný teoretický popis dané fáze včetně její aplikace na výrobní proces satorové lopatky.

7.1 Fáze Define

V první fázi označované jako Define dochází k identifikaci procesu nebo výsledného výrobku, který je potřeba zlepšit v rámci zlepšovateľského projektu. V této fázi hraje zásadní roli jasné ohraničení problému a vytyčení cíle. Rozhodně by se neměla zanedbávat ani rozlišovací úroveň projektu, která zajistí, že se v průběhu zlepšovateľského procesu DMAIC bude řešitelský tým zabývat pouze relevantními údaji nikoli detaily, které by mohly vést k nežádoucímu odvedení pozornosti od skutečně požadovaného cíle. Než se v podniku spustí zlepšovateľský projekt, měli by vedoucí pracovníci zvolit pro zlepšení takový proces, jehož vylepšení představuje skutečný přínos pro podnik, například ve formě navýšení ziskovosti a současně nevyžaduje příliš velké náklady spojené se samotnou implementací zlepšení.

Ve fázi Define též velmi záleží na určení řešitelského týmu, z velké části tvoří řešitelský tým současní zaměstnanci podniku, kteří jsou dočasně alokováni na zlepšovateľský projekt. Vedoucí projektu by rovněž měl jednoznačně každému zaměstnanci určit míru začlenění tak, aby každý zaměstnanec stíhal vykonávat v průběhu projektu i svou každodenní pracovní náplň své pozice. I přes skutečnost, že řešitelský tým je velmi často tvořen výhradně zaměstnanci podniku, není na škodu do týmu začlenit i externího člena, díky kterému se zabrání nežádoucímu odchylování se od vytyčeného cíle v průběhu celého zlepšovateľského projektu.

7.1.1 Stanovení problému

Nepostradatelnou součástí fáze Define představuje **stanovení problému**, které je v plné kompetenci vrcholového vedení podniku. Umožňuje dalším zaměstnancům pochopit, kde konkrétně se problém nachází, do jaké míry negativně ovlivňuje uspokojení zákazníka, charakteristiku současné situace a navrhuje, do jaké míry by mohl být proces zlepšen.

Pro zvolený podnikový proces je stanovení problému následující:

Opožděné dodávky komponent pro kompletaci statoru negativně ovlivňují montáž axiálního kompresoru, čímž se následně opoždí i montáž celého leteckého motoru. Problémy při kompletaci statoru mohou ohrozit termín dodání motoru zákazníkovi, v nejhorším případě ztrátu zákazníka.

Tabulka 4: Statistické zpracování průběžných dob komponent statoru v letech 2010 až 2015, zdroj: autor

Komponenta statoru	Počet kusů ve výrobním příkazu	Aritmetický průměr	Medián	Směrodatná odchylka
Statorová lopatka	40 kusů	87 dní	71 dní	47 dní
Vnitřní plášť	10 kusů	42 dní	38 dní	13 dní
Vnější plášť	10 kusů	49 dní	46 dní	14 dní
Pouzdro	10 kusů	39 dní	36 dní	6 dní

Výše uvedená Tabulka 4 obsahuje průběžné doby výroby jednotlivých komponent. Zpracování bylo provedeno na základě výrobních příkazů v letech 2010 až 2015. Každý výrobní příkaz se zadává do výroby na určitý počet komponent stejného druhu, též známo jako výrobní dávka. Vzhledem k tomu, že v průběhu výroby mohou vzniknout v dávce i zmetkové kusy, je vhodné dávku o pár kusů navýšit. Standardní velikosti jednotlivých výrobních dávek jsou předepsány v Tabulce 4.

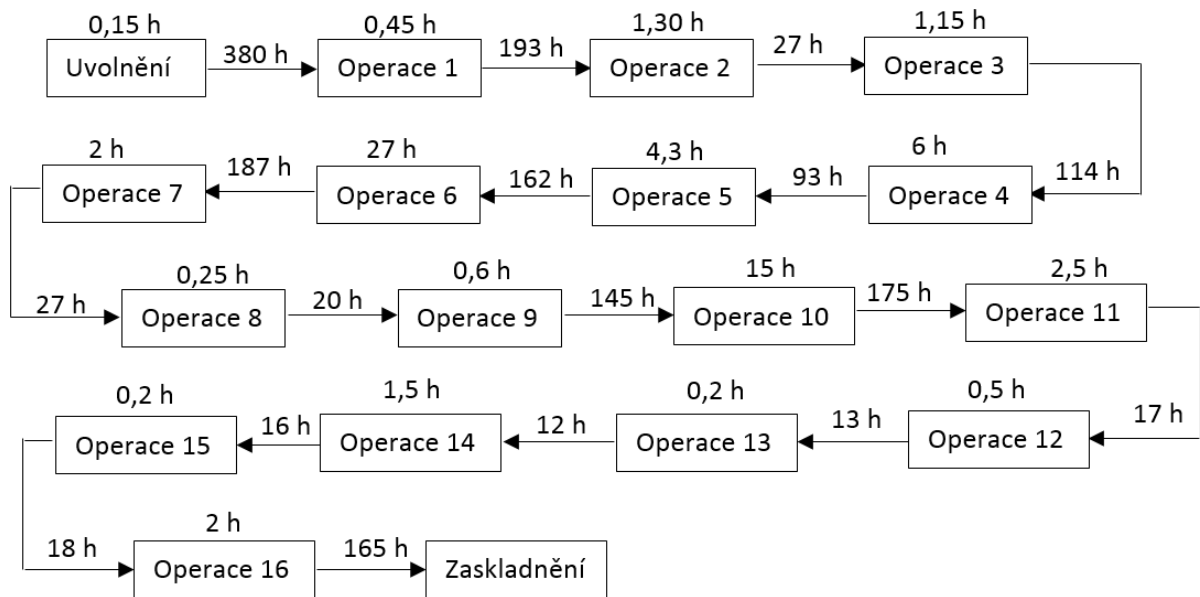
Opožděné dodávky komponent mají za důsledek pozdržení kompletace statoru, z toho důvodu je nezbytné prvotně analyzovat průběžné doby výroby všech čtyř komponent tvořících výsledný stator. Dle Tabulky 4 lze vyvodit, že díky dlouhé průběžné době výroby a vysoké směrodatné odchylce představují statorové lopatky komponentu, jejíž výrobní proces je zapotřebí zlepšit.

Pro prvotní seznámení se s výrobním procesem a jeho vztahem k okolí slouží SIPOC diagram, který zachycuje nejdůležitější prvky procesu, jeho hranice, charakteristické fáze a kroky. Umožňuje znázornění nejen samotného procesu, ale i vstupů, výstupů, dodavatelů a zákazníků. Název tohoto diagramu je odvozen z anglických slov *Suppliers, Inputs, Process, Outputs* a *Customers*. Jinými slovy se jedná o komplexní zmapování zvoleného procesu z vyšší rozlišovací úrovně.

Tabulka 5: SIPOC diagram pro výrobu letecké komponenty tvořící stator, zdroj: autor

Dodavatelé	Vstupy	Proces	Výstupy	Zákazníci
<ul style="list-style-type: none"> • Dodavatelé materiálu • Operátoři strojů • Dispečeri • Plánovači • Nákupčí 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiál • Stroje • Plán výroby • Přípravky • Přepravky • Informační systém 	<ul style="list-style-type: none"> • Jednotlivé operace od uvolnění do výroby až po zaskladnění vyrobené komponenty 	<ul style="list-style-type: none"> • Připravené komponenta k montáži • Odpadní materiál 	<ul style="list-style-type: none"> • Pracovníci montáže

Výše uvedená Tabulka 5 představuje SIPOC diagram, který řešitelskému týmu umožňuje prvotní seznámení s procesem a jeho okolím. Dále diagram nabádá řešitelský tým k dalšímu hlubšímu zkoumání a pochopení. Výhodou diagramu je, že neukazuje pouze daný proces, ale i jeho propojení s dodavateli a koncovými zákazníky, čímž umožňuje řešitelskému týmu pochopit proces a jeho vazby na okolí. Na druhou stranu samotný proces je zde popsán velice z hrubé rozlišovací úrovně, tudíž se nám nedostávají kvantitativní údaje o chování sledovaného procesu. V tomto případě nám diagram neposkytne údaje o celkovém trvání výrobního procesu, dobách strávených čekáním na výrobní operaci či čekání na finální zaskladnění. Pro detailnější pochopení procesu a významu činností, které se v procesu uskutečňují, je vhodné dále použít následující obrázek obsahující délky operací a časy prodlev.



Obrázek 11: Délky operací a časy prodlev pro zvolený proces vytvořený na základě dat z roku 2014, zdroj: autor

Na výše uvedeném Obrázku 11 je znázorněn průběh průměrného výrobního příkazu na lopatky. Obdélníky v obrázku představují činnosti, neboli úkony, během kterých se na výrobku přidává hodnota. Jednotlivé činnosti jsou propojeny šipkami reprezentující přemístění zakázky od předchozího pracoviště k následujícímu, kromě přemístěvací doby se zde počítá i s čekáním na další operaci.

Nad každým obdélníkem a šipkou jsou časy, které odpovídají průměrným dobám trvání jednotlivých činností a čekání ve frontě. Dle Obrázku 11 trvá uvolnění zakázky do výroby průměrně 0,15 h, než se ovšem provede další výrobní operace, čeká zakázka průměrně 380 h. Čekání jsou způsobené vysokým počtem rozpracovanosti ostatních komponent. Je zcela běžné, že více než 95 % času průběžné doby výroby je tvořeno čekáním na další výrobní operaci.

Velkým přínosem Obrázku 11 je rychlé určení míst, kde dochází k defektům či plýtvání, což následně umožňuje řešitelskému týmu lépe alokovat úsilí při zlepšování procesu.

7.2 Fáze Measure

Fáze *Measure* slouží k pochopení nejen současného stavu procesu, ale hlavně též k výstupům z procesu. V této fázi dochází ke sběru dat, na základě kterých se dále vyvozují závěry ohledně výkonnosti daného procesu. Za účelem snadného porozumění se nasbírá

data vhodně zpracují ve statistickém softwaru, který díky vizuálnímu výstupu snadno umožní hlubší pochopení chování procesu.

Pro správné provedení fáze *Measure* je nezbytně nutné jednoznačně nadefinovat, jaká veličina se bude měřit a jakým způsobem bude měření prováděno. Následně se pomocí vhodného nástroje provede vizualizace nasbíraných dat, která se dále porovnají s požadovanou cílovou hodnotou, díky které se určí míra defektů.

Přesné nadefinování způsobu měření sledované veličiny, v tomto případě průběžné doby výroby statorové lopatky, zaručí při provádění měření různými pracovníky vždy kvalitně provedené měření. V praxi je totiž zcela běžné, že pokud více lidí měří ve stejném časovém úseku jednu danou veličinu, nemusí vždy všichni naměřit stejnou hodnotu. Z tohoto důvodu je nutné jednoznačně určit počátek a konec průběžné doby výroby lopatky. Pro některé pracovníky končí výrobní proces dokončením poslední výrobní operace, což ve skutečnosti není zcela pravda, protože výrobek se stále nachází ve výrobě a dle podnikového systému stále není disponibilní pro montáž. Z toho důvodu je lepší nadefinovat konec výrobního procesu zaskladněním, jelikož přítomnost výrobku na skladě je pro pracovníky montáže signál disponibility.

Tabulka 6: Nadefinování sledované veličiny, zdroj: autor

Výstup procesu	Zakázka vyrobených lopatek je zaskladněna.
Charakteristika sledované veličiny	Průběžná doba výroby zakázky na lopatky.
Kvantifikace sledované veličiny	Průběžná doba výroby se měří ve dnech na základě dat z podnikového systému. Začátek je stanoven stavem „Uvolněno“ a konec stavem „Dokončeno“. Výsledná průběžná doba se vypočte odečtením kalendářního data stavu „Uvolněno“ od data stavu „Dokončeno“.
Definice defektu	Průběžná doba trvá déle než 60 dní.

7.2.1 Provedení sběru dat

V momentě úspěšného nadefinování sledované veličiny a způsobu jejího měření již nic nebrání ve sběru vlastních dat. V praxi se potvrzuje skutečnost, že čím detailnější chceme naměřená data, tím nákladnější je měření. Ideální případ měření sledované veličiny probíhá tak, že kromě samotného měření sbíráme i údaje o veškerých faktorech, které na danou měřenou veličinu mají vliv. Takto naměřená vstupní data nám v dalších krocích lépe umožní kvantifikovat faktory mající největší vliv na nežádoucí naměřené hodnoty, čímž se i snadněji

zavádějí nápravy procesu. Vzhledem k omezeným zdrojům velmi často dochází k tomu, že naměřená data neobsahují detailnější informace, tudíž je nezbytné se v kroku analýzy obrátit na skupiny expertů, kteří danému procesu rozumí do hloubky a mohou tak poskytnout další přínosné informace.

V případě této diplomové práce se mi podařilo získat informace o průběhu jednotlivých výrobních zakázek na statorové lopatky. Poskytnutá data obsahují časové informace nejen o uvolnění a dokončení jednotlivých zakázek, ale i časy dokončení jednotlivých výrobních operací. Vzhledem k tomu, že informační soubor obsahuje i informace z průběhu zakázky, usnadní mi to v analytické části zlepšovateľského procesu nalezení prostoru pro zlepšení.

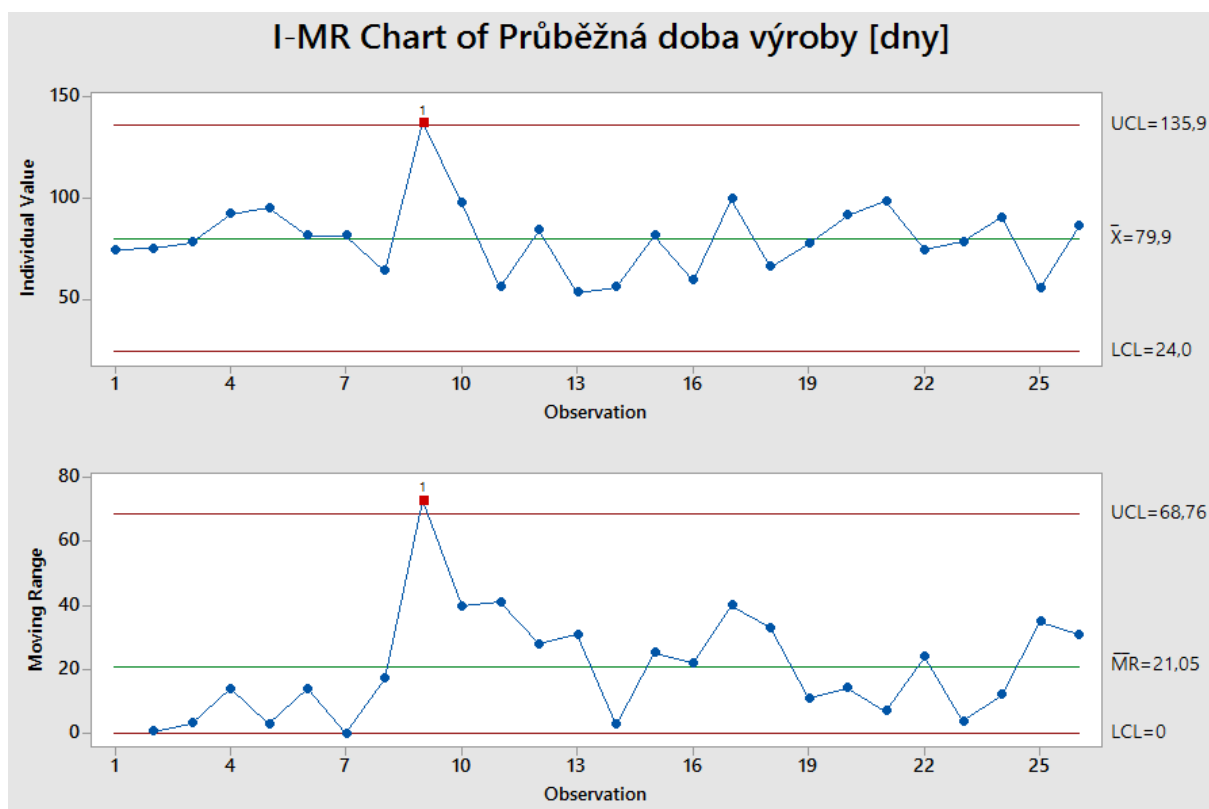
Tabulka 7: Zpracovaná data o výrobních příkazech uvolněných od července do září roku 2015, zdroj: autor

Výrobní zakázka	Datum uvolnění	Datum zaskladnění	Průběžná doba výroby [dny]
15-BL0047	2.7.15 9:14	14.9.15 15:36	74,27
15-BL0048	2.7.15 9:19	15.9.15 8:28	74,96
15-BL0049	2.7.15 9:23	18.9.15 9:47	78,02
15-BL0050	2.7.15 9:26	2.10.15 8:36	91,97
15-BL0051	2.7.15 9:30	5.10.15 8:38	94,96
15-BL0052	2.7.15 9:36	21.9.15 11:07	81,06
15-BL0053	2.7.15 9:43	21.9.15 11:06	81,06
15-BL0054	2.7.15 9:45	4.9.15 8:16	63,94
15-BL0055	2.7.15 9:49	16.11.15 8:28	136,94
15-BL0056	2.7.15 9:53	7.10.15 12:53	97,12
15-BL0057	3.8.15 10:53	28.9.15 8:58	55,92
15-BL0058	3.8.15 10:54	26.10.15 11:48	84,04
15-BL0059	3.8.15 10:57	25.9.15 12:52	53,08
15-BL0060	3.8.15 10:59	28.9.15 8:39	55,90
15-BL0061	3.8.15 11:02	23.10.15 13:06	81,09
15-BL0062	3.8.15 11:03	1.10.15 11:52	59,03
15-BL0063	3.8.15 11:05	10.11.15 15:30	99,18
15-BL0064	3.8.15 11:07	8.10.15 10:42	65,98
15-BL0065	1.9.15 8:10	17.11.15 10:47	77,11
15-BL0066	1.9.15 8:12	1.12.15 14:54	91,28
15-BL0067	1.9.15 8:14	8.12.15 13:31	98,22
15-BL0068	1.9.15 8:17	14.11.15 15:15	74,29
15-BL0069	1.9.15 8:18	18.11.15 10:57	78,11
15-BL0070	1.9.15 8:20	30.11.15 10:43	90,10
15-BL0071	1.9.15 8:21	26.10.15 10:06	55,07
15-BL0072	1.9.15 8:25	26.11.15 8:15	85,99

Z Tabulky 7 je patrný plán zadávání lopatek do výroby, původně bylo pro měsíce červenec až září naplánováno uvolňování do výroby osm výrobních zakázek za měsíc. Vzhledem k tomu, že se z důvodu nedostatku vstupního materiálu nepodařily uvolnit veškeré zakázky dle plánu, nahromadily se zakázky na červenec. Disponibilita vstupního materiálu v dalších měsících již nepředstavovala omezení pro uvolňování zakázek.

7.2.2 Interpretace dat

Grafická vizualizace naměřených dat poskytne ucelenější představu o výstupu sledovaného procesu. Před samotnou vizualizací je nejprve nezbytné seřadit naměřená data od nejstaršího k nejnovějšímu, čímž se umožní v následném grafickém znázornění vyzorovat případné trendy či shluky. Nadstavbou je tzv. IM-R regulační diagram, díky kterému lze rozhodnout o stabilitě procesu.



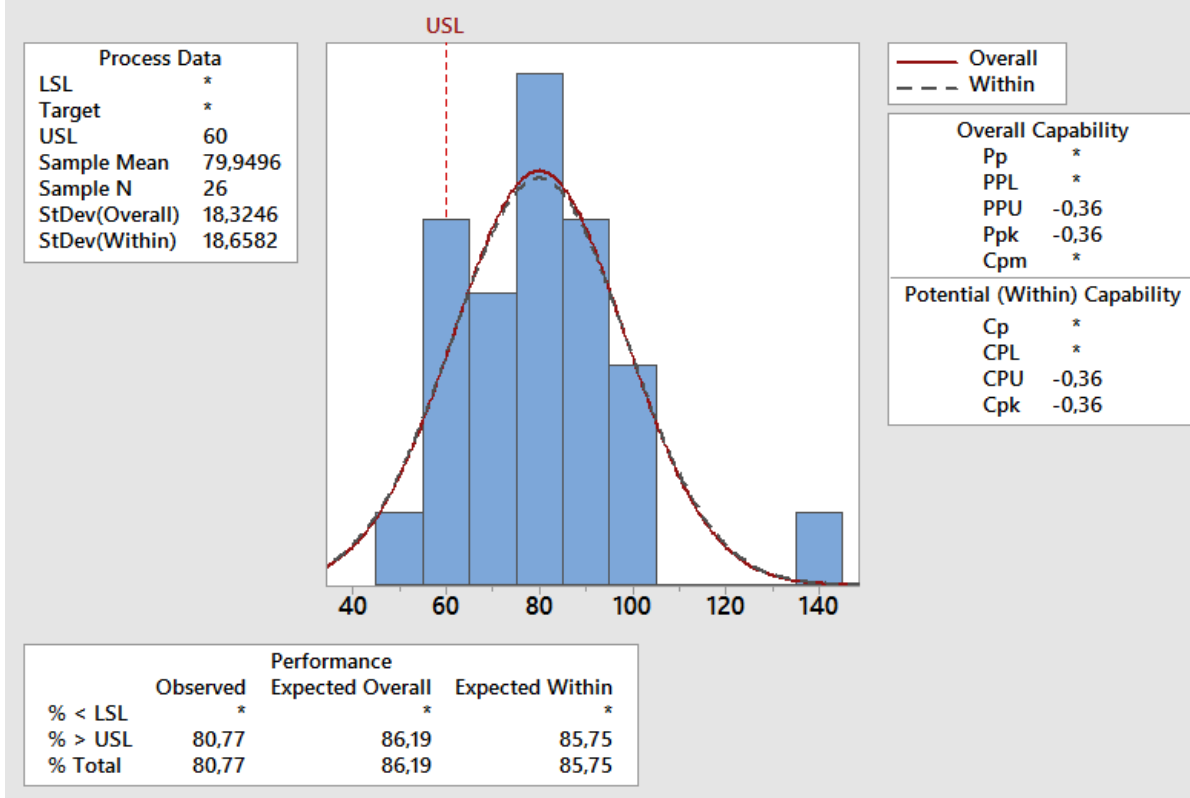
Obrázek 12: Regulační diagram IM-R Chart pro průběžné doby výroby lopatek uvolněných za období červenec až září 2015, zdroj: autor

V reálném světě není nic konstantního, tudíž není překvapením přítomnost běžných náhodných odchylek. Pro vyhodnocení stability procesu se vytváří regulační diagram I-MR skládající se ze dvou částí, diagramu I (*individual*) a diagramu MR (*moving range*). Diagram I se umísťuje do horní části a tvoří jej linie představující střední hodnotu z naměřených dat, dále tvoří součást diagramu kontrolní hranice UCL a LCL, které se stanoví pomocí třech směrodatných odchylek. Do diagramu I se vynáší seřazená naměřená data a v případě polohy naměřené hodnoty vně hranice hodnotíme proces jako nestabilní.

Ve spodní části se nachází diagram MR, který slouží k posouzení procesního kolísání. Do diagramu MR se vždy vynáší absolutní hodnota rozdílu dvou po sobě jdoucích hodnot. Následně se v diagramu vykresluje linie znázorňující střední hodnotu tohoto klouzavého rozpětí včetně spodní a horní kontrolní hranice pomocí třech směrodatných odchylek. V případě, že absolutní hodnota rozdílu dvou po sobě jdoucích hodnot leží vně kontrolních limitů, hodnotíme daný proces jako nestabilní.

Vzhledem k tomu, že se ve sledovaném procesu nachází hodnota překračující UCL, považuji tento proces za nestabilní. Konkrétně se jedná o devátou naměřenou hodnotu průběžné doby výroby dosahující hodnoty 136,94 dní, což o více než jeden den přesahuje UCL. I když se jedná o velmi malý přesah, nelze ho z dlouhodobého hlediska tolerovat, tudíž musím provést zásah do procesu, jehož výsledkem nebude pouze redukce variability procesu, ale i snížení střední hodnoty průběžné doby výroby statorových lopatek.

Process Capability Report for Průběžná doba výroby [dny]



Obrázek 13: Procesní způsobilost pro průběžné doby výroby lopatek zakázek uvolněných mezi červencem a zářím 2015, zdroj: autor

Software Minitab umožňuje snadno provést statistické zpracování naměřených dat. Nejprve jsem použil diagram IM-R pro zjištění stability procesu. Následně se běžně provádí zpracování procesní způsobilosti, která též poskytuje informace o míře výskytu defektů na výstupu procesu.

V počátku fáze Measure jsem nadefinoval defekt, jakožto dobu výroby lopatek překračující 60 dní. Vzhledem k tomu, že bylo naměřeno ve sledovaném intervalu celkově 26 hodnot, z nichž pouze 5 hodnot dosahuje hodnoty nižší než 60 dní, můžeme vypočítat ukazatel FTY dle následujícího vzorce:

$$FTY = \frac{\text{počet konformních výrobních zakázek vystupujících z procesu}}{\text{celkový počet výrobních zakázek vstupujících do procesu}} \quad (2)$$

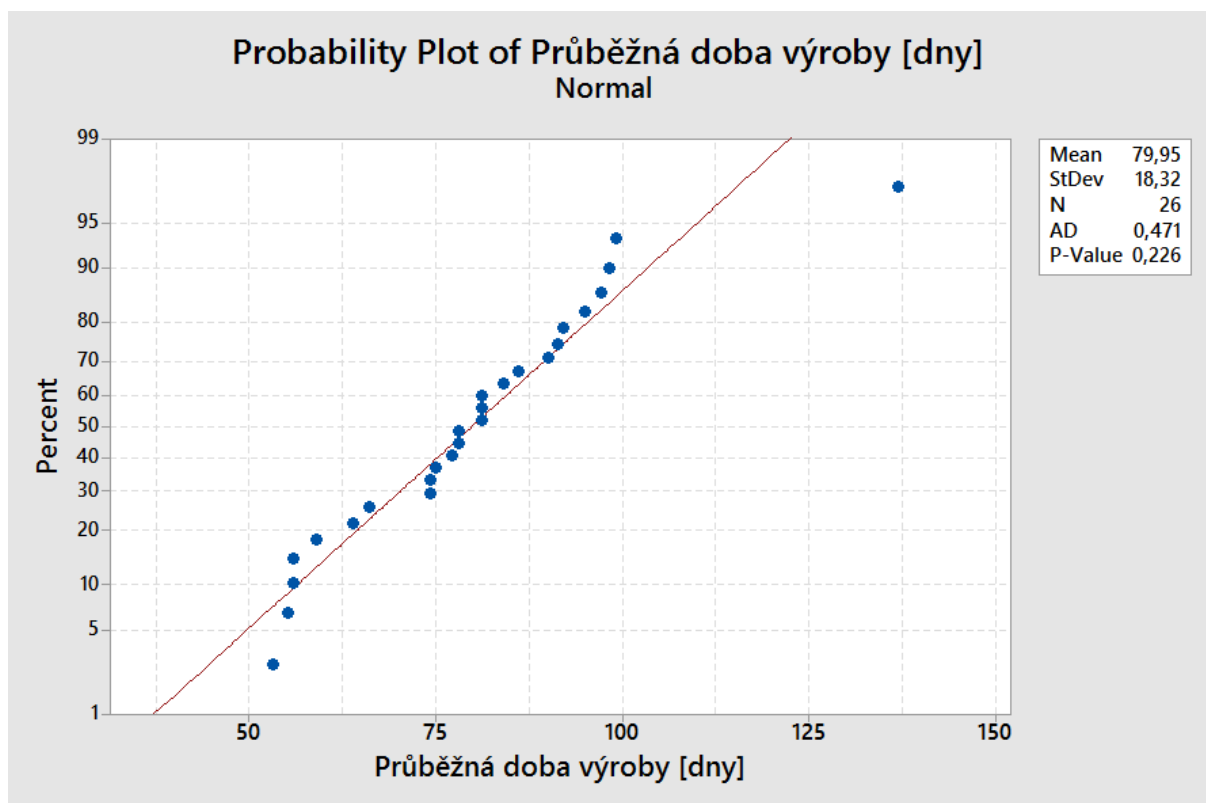
$$FTY = \frac{5}{26} = 19,23 \%$$

Výše zmíněný ukazatel FTY vyjadřuje poměr mezi počtem jednotek splňujících požadovaná kritéria pro dokončené jednotky vystupujících z procesu k celkovému počtu jednotek na výstupu procesu. Vypočtenou hodnotu lze vnímat jako 80,77% přítomnost defektů

ve sledovaném vzorku dat. Na Obrázku 13 se nachází i histogram naměřených průběžných dat, který je proložen křivkou hustoty normálního rozdělení pravděpodobnosti.

Testování normality naměřených dat

Pro ověření normality naměřených dat jsem zvolil Anderson-Darlingův test normality, který při p -hodnotě nižší nebo rovno 0,05 zamítá nulovou hypotézu normality dat.



Obrázek 14: Testování normality naměřených dat pomocí Anderson-Darlingova testu, zdroj: autor

P -hodnota Anderson-Darlingova testu se rovná 0,226, tudíž akceptuji nulovou hypotézu normality dat. V momentě předpokladu normality naměřených dat lze z Obrázku 13 předpovědět i očekávanou dlouhodobou míru defektů, v daném případě by se navýšila až na 86,19 %. Jelikož ovšem proces není stabilní, nelze tuto hodnotu považovat za relevantní.

Na základě výše provedené analýzy naměřených dat lze konstatovat, že daný proces je nestabilní. Zároveň daný proces produkuje pouze 19,23 % výrobních příkazů, které mají průběžnou dobu výroby nižší než 60 dní. Za účelem dosažení stabilního procesu a snížení výskytu defektů je nezbytně nutné provést zásahy do současného systému, jehož výsledkem bude významné snížení počtu defektů a nežádoucí variability.

7.3 Fáze Analyze

V předchozí fázi cyklu DMAIC proběhl sběr a vyhodnocení dat, následně se ve fázi Analyze provádí rozbor dat za účelem identifikování příčin způsobujících nežádoucí dlouhé doby výroby lopatek. K odhalení kořenových příčin dlouhých průběžných dob je zapotřebí mít co nejpodrobnější data, která umožní řešitelskému týmu expertů hlubší pochopení dějů v procesu.

Na základě nasbíraných dat provádí řešitelský tým jejich analýzu s cílem identifikovat hlavní příčiny tvorby dlouhých dob výroby lopatek. Na proces výroby působí velké množství faktorů, z nichž většina má zanedbatelný vliv na výslednou délku výroby. Cíl řešitelského týmu ve fázi Analyze spočívá ve vytvoření seznamu všech možných vstupů do procesu, které mohou mít zásadnější vliv na délku výroby komponenty. Následně se na základě nasbíraných dat provádí analýza za účelem identifikování kořenových příčin, neboli vstupů, které mohou významně prodloužit dobu výroby. Jakmile řešitelský tým z celého souboru faktorů vybere několik nejzásadnějších vstupů, provádí se jejich porovnání ve smyslu určení poměru mezi složitostí implementace nápravných opatření a možným výsledným vlivem na dobu výroby. Jinými slovy se řešitelský tým snaží vybrat takový faktor vstupující do procesu, jehož náprava bude velmi snadná a současně se danou nápravou podaří významně zkrátit dobu výroby komponenty.

V praxi se velmi zřídka podaří identifikovat veškeré vstupy do procesu, nejdůležitější ovšem zůstává nalézt alespoň několik vstupů majících významnější vliv na délku průběžných dob výroby. V další fázi se pro vybraný vstup provádí nápravné opatření, jehož záměrem je snaha o eliminaci vlivu vybraného vstupu na délku doby výroby. Po implementaci nápravného opatření proběhne nový sběr dat, na základě kterého se vyhodnotí zlepšení výrobního procesu.

7.3.1 Analýza výrobního procesu statorové lopatky

Získaná data obsahují konkrétní časové údaje uvolnění zakázky do výroby, dokončení jednotlivých výrobních operací a zaskladnění vyrobených lopatek. Bohužel se nepodařilo získat další detailnější údaje k jednotlivým výrobním zakázkám, což by značně usnadnilo identifikování kořenových příčin delších průběžných dob výroby. Možnosti analýzy jsou tedy velmi omezené a k identifikování kořenových příčin bude zapotřebí expertní skupiny. Na

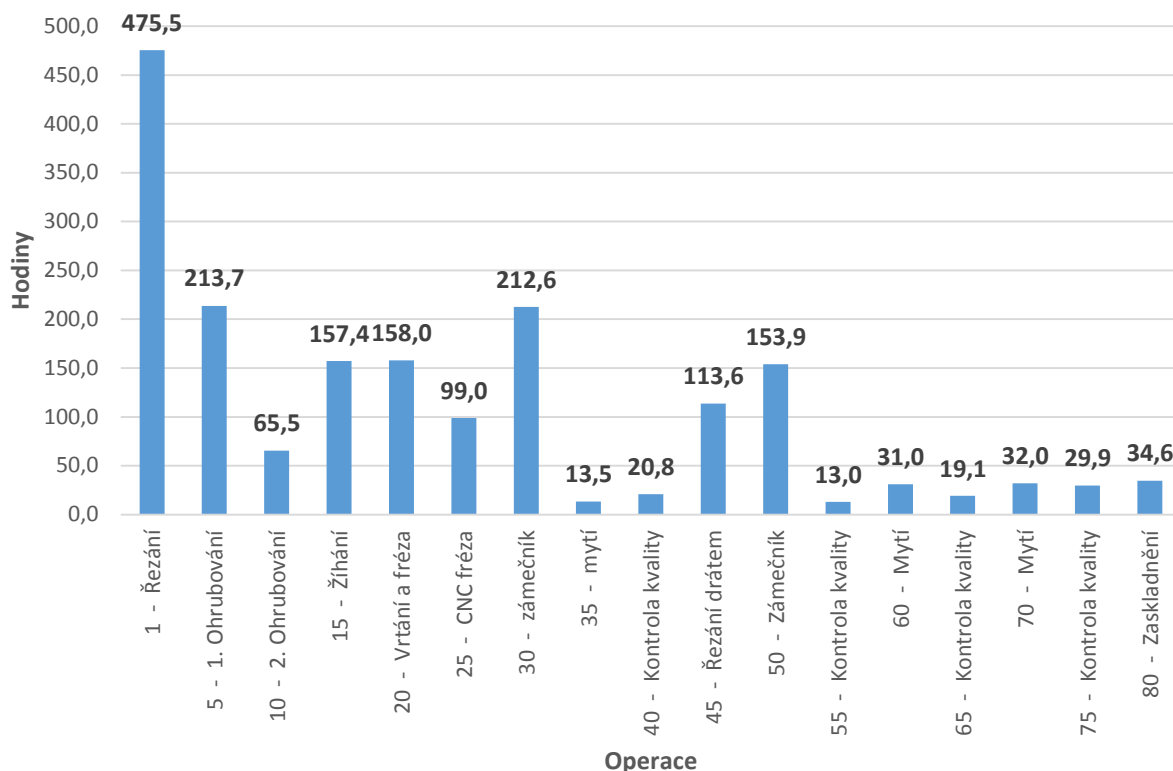
základě získaných dat lze vytvořit grafické znázornění průměrných dob čekání na následující operaci. Čas strávený čekáním na následující výrobní operaci je především složen z:

- čekání na výstupním místě předchozí operace,
- přesunu výrobní zakázky z výstupního místa na vstupní místo následující operace,
- čekání na vstupním místě následující výrobní operace.

Vzhledem k tomu, že dispečer výroby, jehož pracovní náplň tvoří přesun výrobních zakázek z výstupních míst jednotlivých výrobních strojů na vstupní místa následující výrobní operace dle výrobního postupu, obchází veškerá výstupní místa dvakrát denně. Zpravidla na začátku a konci denní směny, tudíž vždy přibližně v 8:30 a 15:30. Z čehož vyplývá, že teoretická maximální doba setrvání zakázky na výstupním místě může dosahovat hodnoty až 17 hodin. Samotný přesun výrobní zakázky k následujícímu pracovišti trvá několik minut. Je-li tudíž mezi dokončením předchozí operace a začátkem následující výrobní operace několika desítek hodin, představuje pracoviště, na kterém se daná následující operace vykonává úzké místo. Přítomnost úzkých míst ve výrobě znamená značný problém, jelikož dochází ke zpožděným dodávkám výrobních zakázek na další pracoviště, hromadění zakázek na vstupním místě přetíženého stroje a dalším negativním efektům nejen v samotné výrobě, ale i na koncového zákazníka.

Pokud v průběhu výroby nedojde k nečekanému poškození komponent, které by vedlo k pozastavení výrobní zakázky a následné neplánované kontrole kvality, bývá čas strávený čekáním na následující operaci zpravidla tvořen zmíněnými třemi událostmi.

Průměrná doba čekání na jednotlivé výrobní operace



Graf 1: Grafické znázornění průměrných dob čekání výrobních zakázek na jednotlivé operace, zdroj: autor

Na výše uvedeném Grafu 1 jsou vypočteny průměrné doby čekání na jednotlivé výrobní operace. Výpočet doby čekání se provedl odečtením času dokončení předchozí operace od času dokončení následující operace, od tohoto rozdílu se dodatečně odečetla doba nutná na provedení následující operace.

Jakmile se výrobní zakázka uvolní, uplyne v průměru 475,5 hodin do okamžiku první výrobní operace. Toto zdržení představuje téměř 25 % času z průměrné průběžné doby výroby, která dosahuje hodnoty 79,9 dní. Následně se v průběhu výroby vyskytne řada dalších operací, na kterých se výrobní zakázka zdrží o více než 100 hodin. Časové ztráty mohou mít různý původ, například u operace 15, kde probíhá žihání, čeká vždy výrobní zakázka na spárování s další výrobní zakázkou na lopatky, aby se náklady spojené s provozem pece mohly rozložit do více komponent.

Čeká-li zakázka na provedení operace několik desítek hodin, lze pracoviště, na kterém se patříčná operace vykonává považovat za úzké místo. Mezi úzká místa bych neřadil pracoviště, na kterém se vykonává operace 15, protože zde zakázka čeká záměrně

z důvodu spárování se se zakázkou, která do kalírný teprve dorazí. Za úzké místo se považuje takové pracoviště, kde dochází k hromadění výrobních zakázek z důvodu nedostatečné kapacity. Jsme-li fyzicky ve výrobní hale, lze takové místo vizuálně snadno identifikovat. Pro identifikaci lze též využít průměrných dob čekání na danou výrobní operaci, nadefinuji-li časovou hranici na 50 hodin, lze již pracoviště, kde se daná výrobní operace vykonává, považovat za úzké místo.

Mezi úzká místa patří pracoviště, kde se vykonávají následující operace:

- 01 – Řezání,
- 05 – Ohrubování,
- 10 – Ohrubování,
- 20 – Vrtání a fréza,
- 25 – CNC fréza,
- 30 – Zámečnick,
- 45 – Řezání drátem,
- 50 – Zámečnick.

Pro výrobu statorových lopatek je zapotřebí celkem 17 operací, z nichž osm lze považovat za úzká místa. Vzhledem k tomu, že v celé výrobní hale se nachází i jiné stroje sloužící k výrobě ostatních zbylých komponent, celkový počet úzkých míst se pohybuje v řádech desítek pracovišť. Problematika úzkých míst je velmi komplexní a k vyřešení je zapotřebí značné množství zdrojů, předchází se tudíž výsledným negativním efektům většími zásobami nejen na skladech hotových výrobků, ale i v samotné rozpracované výrobě. Daný problém se tedy řeší formou uvolňování výrobních zakázek ve značném předstihu několika měsíců, což má za následek zmíněné vyšší zásoby, ale na druhou stranu se tím významně omezí opožděné dodávky.

Rozpracovaná výroba

V průběhu výroby lze v každém okamžiku pro libovolnou komponentu vytvořit tabulku, která umožňuje zobrazení všech aktuálních rozpracovaných výrobních zakázek včetně dokončených operací. V praxi se tato tabulka označuje jako „sledovačka“, jelikož umožňuje sledovat veškeré rozpracované výrobní zakázky pro danou komponentu pomocí pouhé tabulky, která ovšem v sobě obsahuje značné množství informací. Jak již bylo v této práci zmíněno, značnou většinu času stráví výrobní zakázka čekáním na vstupním místě z důvodů kolize s ostatními výrobními zakázkami. Tím pádem vytváření „sledovaček“ na denní bázi by bylo značně časově náročné a zároveň i zbytečné, jelikož by se nedostatečně projevil pohyby ve výrobě. Při standardních podmínkách se na běžné výrobní zakázce na libovolnou

komponentu v průměru vykoná přibližně necelé 2 výrobní operace za týden, z to důvodu se „sledovačky“ aktualizují jednou za sedm dní.

V tabulce „sledovaček“ představují řádky výrobní operace, pro každou výrobní operaci se vytváří jeden řádek a jejich seřazení se provádí tak, že v horní části jsou počáteční operace a nejspodnější řádek se zřizuje pro poslední výrobní operací. Následně se pro každou rozpracovanou výrobní zakázku vyčlení jeden sloupec s tím, že v prvním sloupci s výrobní zakázkou se nachází nejstarší zakázka. Dokončení výrobní operace v zakázce se do tabulky zaneše číslovkou „1“. Pomocí kontingenční tabulky a získaných dat lze vytvořit „sledovačku“ pro libovolný okamžik.

Tabulka 8: Veškeré rozpracované zakázky na statorové lopatky ke dni 20. září 2015, zdroj: autor

	Zak. 15-BL0050	Zak. 15-BL0051	Zak. 15-BL0055	Zak. 15-BL0056	Zak. 15-BL0057	Zak. 15-BL0058	Zak. 15-BL0059	Zak. 15-BL0060	Zak. 15-BL0061	Zak. 15-BL0062	Zak. 15-BL0063	Zak. 15-BL0064	Zak. 15-BL0065	Zak. 15-BL0066	Zak. 15-BL0067	Zak. 15-BL0068	Zak. 15-BL0069	Zak. 15-BL0070	Zak. 15-BL0071	Zak. 15-BL0072
Op. 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Op. 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
Op. 10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
Op. 15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
Op. 20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
Op. 25	1	1	1	1	1		1	1		1		1								
Op. 30	1	1	1	1	1		1	1		1		1								
Op. 35	1	1		1	1		1	1		1										
Op. 40	1	1		1	1		1	1		1										
Op. 45	1	1		1	1		1	1		1										
Op. 50	1	1		1			1	1												
Op. 55	1						1	1												
Op. 60	1						1	1												
Op. 65																				
Op. 70																				
Op. 75																				
Op. 80																				

K identifikování úzkých míst lze též využít „sledovačky“. V Tabulce 8 představují nejspodnější jedničky pro každou zakázku poslední provedenou operaci. Jedničky nacházející se výše reprezentují již vyhotovené předchozí výrobní operaci. V ideálním případě by výrobní zakázky měly být ve výrobě rozpracovány rovnoměrně, v takové situaci by nejspodnější jedničky pro jednotlivé výrobní zakázky ležely na pomyslné diagonále spojující levý dolní roh s pravým horním rohem. Toho by se dalo značně dosáhnout řádným dodržováním frontového režimu FIFO. Vzhledem k tomu, že se ve výrobě nachází značné množství úzkých míst a velký počet rozpracovaných zakázek, respektování režimu FIFO je obtížně proveditelné.

Úzká místa lze v Tabulce 8 zjistit dle většího počtu čekajících zakázek na dané operaci. Například na operaci 5 čekalo dne 20. září 2015 celkově 5 výrobních zakázek. Vzhledem k počtu rozpracovaných zakázek a množství výrobních operací by teoreticky na každé operaci měla čekat přibližně jedna zakázka, což z praktického hlediska lze velmi obtížně dosáhnout.

Při hlubší analýze dat v Tabulkách 7 a 8 je možno identifikovat nežádoucí jev spočívající v „předbírání“ výrobních zakázek. Například výrobní zakázka 15-BL0057 uvolněná do výroby začátkem srpna, se ke dni 20. září 2015 nacházela u vyšší operace než zakázka uvolněná v červenci, konkrétně 15-BL0055 čekající na operaci 35. Toto předbírání výrobních zakázek má za následek delší průběžné doby výroby, neboli i vyšší rozpracovanost, což dále znamená i vyšší náklady. Dodržení režimu FIFO by tedy vedlo ke značnému snížení nákladů na danou komponentu.

Littlův vztah

Dle získaných dat o průběhu výrobních zakázek uvolňovaných během sledovaného období lze určit intenzitu vstupního toku neboli intenzitu uvolňování zakázek do výrobního procesu. Celkově bylo od začátku července do konce září 2015 uvolněno 26 výrobních zakázek, z čehož vychází, že střední intenzita vstupního toku činí 2 výrobní zakázky za týden. Střední dobu strávenou požadavkem ve frontě lze též považovat za střední dobu výroby zakázky, tudíž mohu za tuto hodnotu dosadit 79,9 dní, což se rovná 11,4 týdnů. Následným dosazením do Littleova vztahu získám střední počet požadavků ve frontě:

$$E[F] = \lambda \cdot E[W] = 2 * 11,4 = 22,8 \text{ zakázek}$$

Tento střední počet požadavků ve frontě je možno chápat jako průměrný počet rozpracovaných zakázek ve výrobě. Dle Tabulky 8 se ke dni 20. září 2015 nachází 22 výrobních zakázek, což s přihlédnutím k variabilitě v procesu potvrzuje platnost Littleova vztahu.

Od počtu rozpracovaných zakázek ve výrobě lze následně vypočítat celkové náklady vázající se k rozpracované výrobě. Mezi hlavní složky těchto nákladů patří především náklady spojené s vykonanou prací a náklady na vstupní materiál. V porovnání s krátkými dobami výroby představují delší doby výroby značnou finanční zátěž na rozpočet, jelikož je zapotřebí vázat významné finanční prostředky ve vstupním materiálu, tak i rozpracované výrobě. Dlouhé doby výroby též souvisí s vyšším rozptylem průběžných dob, což má za následek nepřesné predikce dokončení, které se kompenzují vyššími skladovými zásobami. Tudíž vzniká další plýtvání. Řešení situace spočívá ve významném zkrácení průběžných dob výroby, čehož je možno dosáhnout zredukováním čekání v průběhu výroby jednotlivých zakázek na lopatky.

Účinnost procesu

Pro stanovení účinnosti procesu se využívá ukazatel PCE, který se vypočítá jako poměr doby s přidanou hodnotou k celkové době trvání procesu. V případě, že by daný proces neobsahoval žádné plýtvání, dosahovala by hodnota ukazatele PCE 100 %. Takový proces lze v reálném světě velmi těžko najít, ve výrobním prostředí se hodnota ukazatele zcela běžně pohybuje kolem úrovně 5 % a existuje tudíž značný prostor ke zlepšení. Dle znalostí expertů z výroby lze považovat za špičkový výrobní proces, jehož účinnost dosahuje úrovně 25 %.

Výpočet ukazatele PCE se provádí vztahem

$$PCE = \frac{\text{Celkový čas s přidanou hodnotou}}{\text{Celková průběžná doba výroby}} * 100 \% \quad (3)$$

Dosazením součtu dob trvání jednotlivých operací a průměrné průběžné doby výroby lopatek získávám ukazatel PCE pro zkoumaný proces.

$$PCE = \frac{77,67 \text{ hodin}}{1918,8 \text{ hodin}} * 100 \% = 4,05 \%$$

Výše vypočtená hodnota se na první pohled může zdát zarážející, ovšem jak již bylo zmíněno, pro výrobní procesy z obdobného prostředí se typická hodnota pohybuje kolem 5 %. Jedná se tedy o proces, kde činnost přidávající na hodnotě tvoří jen nepatrnou část. Na druhou stranu lze v daném procesu poměrně snadno dosáhnout zlepšení ve formě odstranění plýtvání.

Ke zvýšení účinnosti zvoleného procesu je zapotřebí zkrátit časové úseky mezi jednotlivými výrobními operacemi. Určitého zkrácení průběžné doby lze dosáhnout i zlepšením technologického prostupu výroby jednotlivých výrobních operací, například tím, že se řezou dva polotovary současně namísto jednoho. Tímto směrem lze dosáhnout též vyšší efektivity

výroby na dané operaci, ale nevyřešil by se problém plýtvání ve formě čekání na další operace. Daný proces se skládá z činností, které hodnotu přidávají a nepřidávají. Vzhledem k tomu, že činnosti přidávající hodnotu tvoří méně než 5 % z celkové průběžné doby výroby, nelze tedy zkrácením těchto činností významně snížit celkovou dobu výroby. V případě, že by se podařilo zkrátit některé výrobní operace, dosáhlo by se sice snížení výsledné doby výroby lopatek, ale výsledkem by byla i nižší účinnost procesu, jelikož činnosti nepřidávající na hodnotě by zůstaly netknuty.

Je-li tedy cílem významné zkrácení průběžných dob výroby a současně i vyšší účinnost výrobního procesu, je zapotřebí snížit plýtvání v procesu. Výše provedený rozbor získaných dat vedl ke zjištění, že se ve výrobním procesu nachází velké množství plýtvání ve formě čekání, které dosahuje úrovně kolem 96 % z celkové doby výroby. Na základě tohoto zjištění je nezbytně nutné zavést takové opatření, které by vedlo ke značnému snížení čekání ve výrobním procesu.

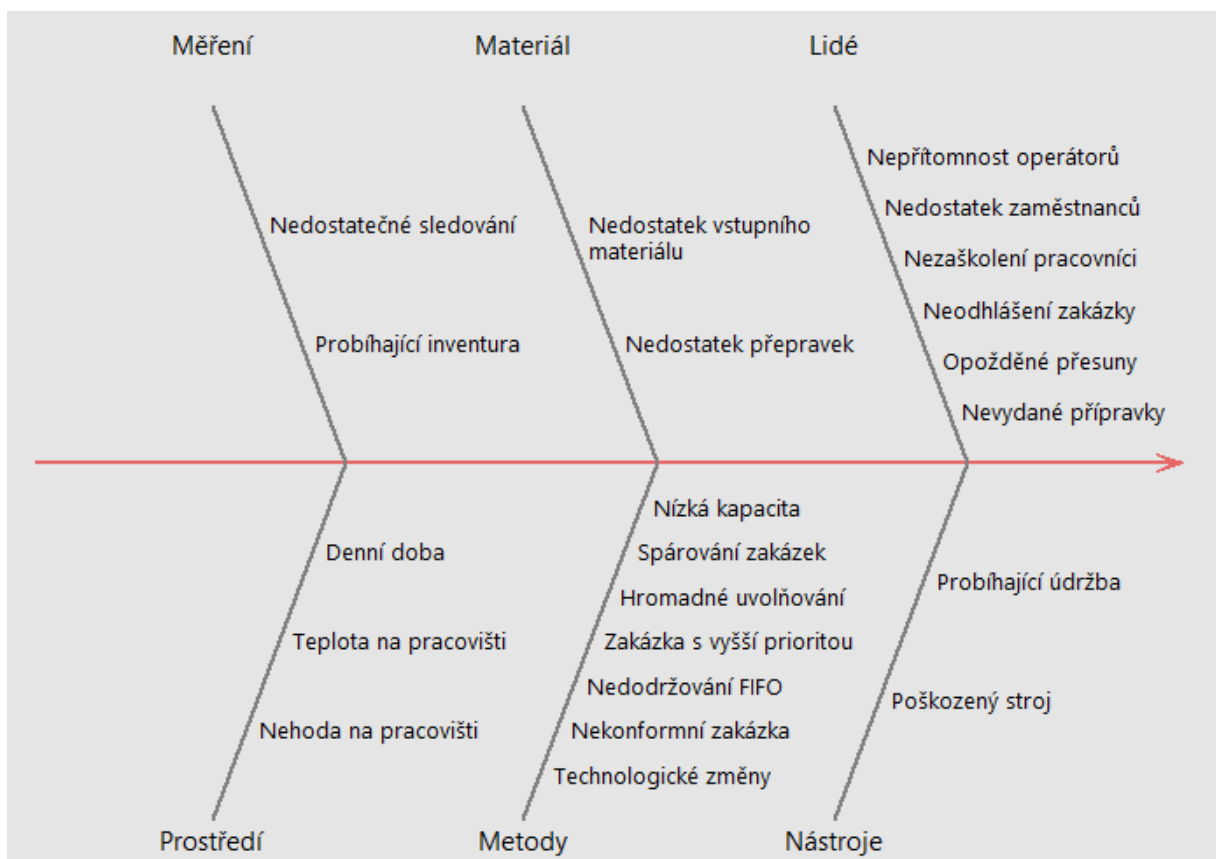
7.3.2 Identifikování kořenových příčin

Hlavní cíl fáze Analýzy spočívá v identifikování kořenových příčin mající největší vliv na délku průběžné doby výroby lopatek. Sledovaný výrobní proces lze též reprezentovat funkční závislostí $Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, kde množina všech x_i představuje veškeré možné faktory vstupující do procesu, jehož výstupem je Y , v tomto případě délka průběžné doby výroby. Do množiny vstupujících faktorů lze například zařadit zaměstnance, materiál, finanční zdroje, výrobní stroje, denní dobu, teplotu prostředí, informace, informační systémy, řízení, metody a další. Do daného výrobního procesu vstupuje značné množství faktorů, některé z nich mají minimální vliv na výslednou dobu výroby lopatek, úkolem fáze Analýzy je určení těch faktorů, jejichž vliv na daný výstup procesu je značný. Tyto faktory označujeme jako kořenové příčiny.

V ideálním případě by poskytnutá data obsahovala mnohem více informací o vstupujících faktorech. Na takovém souboru dat lze dále provádět statistická zpracování a prokazovat míru vlivu jednotlivých faktorů na délku doby výroby. Ve skutečnosti je získání takových informací velmi obtížné a finančně nákladné. Analyzuje-li se proces zpětně, některé informace nelze ani získat. V případech, kdy naměřená data neobsahují dostatečné informace o vstupujících faktorech do procesu, nastává nutnost využití znalostí expertů.

Vzhledem k tomu, že poskytnutý soubor dat neobsahuje dostatečné informace o vstupujících faktorech, je zapotřebí získat dodatečné informace od skupiny expertů. Experty se v tomto případě rozumí všichni zaměstnanci, kteří se na daném výrobním procesu podílejí. Skupina

expertů se v tomto případě skládá z plánovačů výroby, dispečerů, operátorů výrobních strojů, mistrů výroby a nákupčích materiálů. Po vytvoření expertního týmu se pořádá řízená diskuze, během které se vytvoří seznam vstupujících faktorů do procesu. Tyto faktory se následně zanesou do Ishikawova diagramu, též známého jako „rybí kost“. Pro daný výrobní proces obsahuje Ishikawův diagram pouze ty vstupující příčiny, které byly zmíněny v průběhu řízených diskuzí expertním týmem. Pravděpodobně se nenajdou veškeré příčiny, důležité je ovšem identifikovat ty, které se na délce průběžné doby významně podílejí. Některé zmíněné příčiny mohou mít menší význam, tudíž výslednou dobu výroby prodlužují jen o pár hodin. I takové je nutné brát v úvahu během řízené diskuze, jelikož v návaznosti na ně lze objevit další, mnohem závažnější příčiny. V praxi se doporučuje vést řízenou diskusi opakovaně, čímž se zajistí obsáhlejší množina příčin.



Obrázek 15: Ishikawův diagram pro příčiny dlouhých průběžných dob výroby, zdroj: autor

Ishikawův diagram znázorněný na Obrázku 15 obsahuje pravděpodobné příčiny dlouhých průběžných dob výroby. Následuje výpis těchto příčin včetně jejich charakteristiky.

Nepřítomnost operátorů představuje značný problém ve formě snížení kapacity daného stroje. V případě, že se operátor nedostaví na směnu bez předchozího ohlášení svému mistrovi, dochází na daném stroji ke značným prostojům. Další nepřítomnost může být způsobena školením, dovolenou či nemocí.

Nedostatek zaměstnanců ve výrobě vede též ke snížení kapacity na pracovištích, což se následně promítá do delších dob výroby. Bez dostatku operátorů se velmi těžko hledají náhrady za pracovníky na dovolené, případně se ruší i již naplánované směny.

Nezaškolení pracovníci vykonávají zpočátku výrobní operace pomaleji, ve většině případech značně překračují i předepsané časové normy, čímž i zpožďují čekající výrobní zakázky.

Nedostatek vstupního materiálu neumožní včasné uvolnění zakázky do výroby, pravděpodobně tudíž nebude dokončená zakázka včas na skladě.

Technologické změny výroby vyžadují při zavádění značné množství kontrolních operací a zásahů pracovníků technologie do výrobní zakázky v průběhu její výroby. Pro danou komponentu dochází ke změnám zřídka, pokud ovšem k zavádění změn dojde, dochází ke značným průtahům ve výrobě.

Nekonformní zakázka je výrobní zakázka, u níž se při kontrole našly určité neshody s předepsaným postupy. K opoždění zakázky dochází nejen při rozhodování posuzovací komise, ale i během opravných operací. Jestliže oprava není realizovatelná, případně by se finančně nevyplatila, komponenty se v dané výrobní zakázce sešrotují.

Nedostatek přepravek značně prodlužuje výrobní proces na samotném počátku. Přířezy na lopatky se sice nařežou, ale z důvodu nedostatku přepravních bedýnek se dočasně ukládají do regálu. Jakmile se uvolní přepravka, přířezy se do ní naskládají a dochází k okamžitému přesunu na vstupní místo následující operace.

Nehoda na pracovišti není pravidelným jevem ve výrobě, pokud ovšem dojde k nepředvídatelné havárii, může dojít k pozastavení celé výroby, čímž dochází k časovým prodlevám. Nedostatečná údržba může vést například k požáru, který by následně mohl dočasně ochromit výrobu.

Teplota na pracovišti se nejčastěji projevuje na pracovišti technické kontroly, kde dochází k ověřování provedených operací dle technické dokumentace. Změna teploty se projevuje na teplotní roztažnosti kovových materiálů. Z tohoto důvodu je potřebné na pracovišti kontroly udržovat konstantní teplotu za různých klimatických podmínek. Dále má teplota na pracovišti vliv i na samotné operátory ve výrobě, tudíž i na jejich produktivitu.

Denní doba též zasahuje do průběžné doby výroby. Při nočních směnách se převážně provádějí méně náročné operace na levnějších dílech. Nachází-li se tedy na vstupním místě více zakázek v průběhu noční směny, nechávají se náročnější operace pro operátory přicházející na ranní směnu. Výsledkem je snížení rizika výroby vadných dílů na úkor prodloužení průběžné doby výroby jiné zakázky.

Velikost dávky je přímo úměrná průběžné době výroby. Pro stanovení optimální velikosti dávky se využívá vztahu odvozeného od nákladů na seřizování, rozpracovanou výrobu a fixních nákladů. Z praktického hlediska ovšem výrobní zakázka o nižším počtu položek zajistí vyšší průtok zakázek ve výrobě, tudíž i výslednou kratší dobu výroby. V případě statorových lopatek nelze velikost dávky ve výrobní zakázce měnit, protože každá zakázka se vyrábí pro jeden motor, tudíž vždy o velikosti 40 kusů lopatek.

Nedodržování FIFO se negativně promítá do průběžných dob. Předbírání výrobních zakázek na stejnou komponentu se převážně odehrává na vstupních místech, kde se mohou nacházet zakázky o různých datech uvolnění, a operátor odebere ze vstupního místa novější zakázku, čímž prodlužuje délku výroby té starší. Řešení představují spádové regály, které ovšem v porovnání se současným systémem skládání přepravek na sebe mají horší využitelnost podlahové plochy.

Zakázka s vyšší prioritou značně komplikuje průběh výroby ostatních zakázek. Vyšší priorita se přiřazuje zakázkám, které přímo ohrožují včasnou kompletaci motoru, tudíž se jim ostatní zakázky musí podřídít. Kromě zmíněných deficitních dílů se může též jednat o díly vývojové, které též nepředvídatelně nabourávají tok zbylých výrobních zakázek.

Neodhlášení zakázky je poměrně častý jev, kdy operátor výroby po kompletním dokončení operace umístí zakázku na výstupní místo bez řádného odhlášení zakázky z informačního systému. Dispečer výroby následně tuto zakázku přesune na vstupní místo následující operace, kde se ovšem další operátor do zakázky nemůže přihlásit v informačním systému, čímž dochází ke zcela zbytečným průtahům na zakázce.

Hromadné uvolňování zakázek vede k zahlcení pracoviště, kde se provádí řezání vstupního materiálu. Ve většině případů zakázky uvolňuje dispečer výroby, který místo postupného uvolňování zakázek v průběhu daného měsíce, uvolní mnoho zakázek v jeden den. Na pásovou pilu, která řeže nejen přířezy pro lopatky, se tudíž vytváří fronta výrobních zakázek na značné množství odlišných komponent. Dle Grafu 1 zakázka čeká na nařezání pásovou pilou průměrně 475,5 hodin, což představuje téměř čtvrtinu celkové doby výroby lopatek, následkem toho je nutné se při hledání nápravných opatření soustředit právě na zredukování tohoto čekání.

Nedostatečné sledování rozpracovaných zakázek se přímo promítá do delších průběžných dob výroby. V rámci výroby není aplikováno žádné řešení, které by zamezilo delším dobám strávených na vstupním místě určitého pracoviště.

Probíhající inventura vyžaduje dočasnou změnu pracovní náplně výrobních dispečerů, kteří se místo přesunu zakázek zabývají činnostmi spjatými s inventarizací.

Opožděné přesuny zakázek z výstupních míst na další operaci se pravidelně podílejí na zbytečném prodloužení průběžných dob. Povinností výrobního dispečera je alespoň dvakrát za denní směnu obejít veškerá výstupní místa a zajistit přesun zakázky k dalšímu zpracování. Dle poznatků výrobních operátorů zakázka na výstupním místě stráví i několik desítek hodin, což je v rozporu s povinnostmi dispečera. Jedná se spíše o ojedinělé případy, které vyplývají ze selhání jednotlivců.

Spárování zakázek se většinou vyžaduje z ekonomických důvodů. Ke spárování zakázek většinou dochází na stroji, jehož využití pouze na jednu zakázku by bylo příliš drahé. V případech, kdy technologické předpisy umožňují zpracování více n zakázek současně, dochází právě k prodlevám na jednotlivých zakázkách z důvodu čekání na druhou příchozí zakázku.

Poškozený stroj představuje okamžitou nedostupnost výrobní kapacity na daném stroji. Poruchy malého rozsahu lze ve většině případů opravit během několika hodin, ovšem rozsáhlejší poškození mohou protáhnout čekání výrobních zakázek na vstupním místě o několik dní až týdnů. Nefunkční stroj též způsobuje hromadění zakázek na vstupním místě, což dále vede k nepřehlednosti mezi zakázkami.

Nízká kapacita stroje má za následek značné opoždění na výrobní zakázce. Problém nízké kapacity se může řešit zakoupením dalšího výrobního zařízení, případně vytvoření nového alternativního programu na jiném stroji ve výrobní hale nebo zasílat část zakázek do kooperace obchodním partnerům. V některých případech může být množství zakázek překračující kapacitu stroje pouze dočasné, tudíž je zapotřebí při řešení problému úzkých míst přistupovat individuálně. Dalším důvodem nízké kapacity stroje může být pouze jeden operátor schopný obsluhovat daný stroj, což při nepřetržitém provozu vede ke značným prostojům.

Nevydané přípravy z výdejny mohou prodloužit dobu výroby přibližně o jeden den. K průtahům na zakázce dochází, když si mistr výroby nestihne během pracovní doby výdejny požádat o vydání přípravku nutného k provedení výrobní operace.

Probíhající údržba na stroji z krátkodobého pohledu dočasně znepřístupňuje jeho kapacitu, ovšem toto preventivní opatření v rámci údržby předchází dlouhodobějším výpadkům

kapacity stroje. V rámci údržby se ve většině případů jedná o čištění stroje, pravidelnou prohlídku či výměnu opotřebených součástí. Na rozdíl od porouchaného stroje lze údržbu naplánovat na dny, během kterých poptávka na kapacitu dosahuje nízkých hodnot, čímž se tolik neohrozí tok výrobních zakázek.

7.3.3 Výběr závažných příčin

Zmíněné příčiny jsou výsledkem řízené diskuze expertní skupiny, která vytvořila jejich sumarizaci. Souhrn příčin obsahuje celou řadu zdrojů delších průběžných dob výroby, ovšem nezahrnuje jejich kvantifikaci, tudíž je nezbytné dále posoudit jejich skutečnou závažnost. Některé příčiny způsobují prodlevy na zakázkách v řádech dnů a jiné v řádech týdnů. Současně je potřeba posoudit i pravidelnost výskytu tak, aby se především odstranily ty příčiny, které mají vysoký výskyt v procesu a současně způsobují i dlouhé prodlevy. Závěrem je zapotřebí též u každé příčiny posoudit náročnost případné nápravy, na základě které se vyberou k nápravě ty příčiny, jejichž vyřešení bude proveditelné. Pro veškeré identifikované příčiny se vytvořila tabulka obsahující jak frekvenci výskytu, způsobené zdržení výrobní zakázky, tak i proveditelnost nápravných opatření.

Pro zjištěné příčiny byly nadefinovány četnost výskytu na třech úrovních. Výskyt příčiny vyskytující se několikrát za rok jsem v této práci zvolil jako „Nízký“, pro příčiny vyskytující se několikrát do měsíce jsem zvolil jako „Pravidelný“ a každodenní výskyt jako „Neustálý“, Tabulka 9.

V Tabulce 9 se nachází pro každou příčinu i odhady průtahů způsobených jednotlivými příčinami. Tyto odhady byly vytvořeny pro výrobní zakázky na statorové lopatky. Veškeré identifikované příčiny mají za následek nežádoucí plýtvání, jelikož neumožňují plynulý průběh práce na výrobní zakázce. V naprosté většině případů je výsledkem prostoj, během kterého zakázka nečinně čeká v regálu vstupního místa pracoviště.

Poslední sloupec Tabulky 9 vyjadřuje proveditelnost nápravy jednotlivé příčiny. Vyjádření napravitelnosti bylo definováno na třech úrovních. „Nízká“ napravitelnost vyjadřuje téměř nulovou možnost nápravy, jelikož ze své pozice neovlivním denní dobu, příchod zaměstnance na směnu, vyhotovení vadného výrobku, atd. Soustředění úsilí na zavedení nápravných opatření této skupiny příčin by nebylo tudíž efektivní. Z toho důvodu se snahy o nápravu budou soustředit na ty příčiny, jejichž napravitelnost dosahuje úrovně „Střední“ či „Vysoká“.

Tabulka 9: Kvantifikace jednotlivých příčin dlouhé doby výroby, zdroj: autor

Příčina	Výskyt	Odhad zdržení způsobeného případným výskytem příčiny [dny]	Napravitelnost příčiny
Nepřítomnost operátorů	Nízký	1	Nízká
Nedostatek zaměstnanců	Nízký	5	Střední
Nezaškolení pracovníci	Nízký	3	Vysoká
Nedostatek vstupního materiálu	Nízký	14	Vysoká
Technologické změny	Nízký	20	Nízká
Nekonformní zakázka	Nízký	25	Nízká
Nedostatek přepravek	Nízký	7	Vysoká
Nehoda na pracovišti	Nízký	3	Střední
Teplota na pracovišti	Neustálý	1	Střední
Denní doba	Neustálý	1	Nízká
Nedodržování FIFO	Neustálý	15	Střední
Zakázka s vyšší prioritou	Pravidelný	5	Nízká
Neodhlášení zakázky	Pravidelný	2	Střední
Hromadné uvolňování	Pravidelný	10	Vysoká
Nedostatečné sledování	Neustálý	20	Střední
Probíhající inventura	Nízký	2	Nízká
Opožděné přesuny	Pravidelný	1	Vysoká
Spárování zakázek	Pravidelný	10	Střední
Poškozený stroj	Nízký	7	Střední
Nízká kapacita	Neustálý	15	Střední
Nevydané přípravky	Nízký	1	Vysoká
Probíhající údržba	Pravidelný	2	Střední

Kritéria pro výběr příčin

Vzhledem k tomu, že hlavním cílem je zkrácení průběžné doby výroby statorových lopatek, primárně se tedy zaměřím na příčiny způsobující časové prodlevy 10 a více dnů. Zároveň by zavádění nápravných opatření nemělo být nepřiměřeně náročné, tudíž předmětem nápravy nebudou ty příčiny, jejichž napravitelnost byla stanovena jako „Nízká“. Do množiny příčin vytvořených dle stanovených kritérií patří:

- nedostatek vstupního materiálu,
- nedodržování FIFO,
- hromadné uvolňování,
- nedostatečné sledování,
- spárování zakázek,
- nízká kapacita.

Nedostatek vstupního materiálu představuje jedinou příčinu, jejíž výskyt je „Nízký“. Na druhou stranu způsobuje poměrně významné zpoždění zakázky, kterému ovšem lze předejít „Vysokou“ napravitelností příčiny. Tudíž i přes stanovený výskyt ponechám tento zdroj prodlev v množině příčin vybraných k nápravě.

7.4 Fáze Improve

V předposlední fázi zlepšovacího cyklu DMAIC je zapotřebí navrhnout nové uzpůsobení výrobního procesu takovým způsobem, aby se významně zmírnily negativní dopady identifikovaných příčin. Výsledkem tohoto zmírnění by mělo být značné snížení počtu zakázek překračujících horní specifickou mez, neboli USL.

Vzhledem k tomu, že bylo identifikováno více příčin, které pro svou nápravu budou pravděpodobně vyžadovat různorodá opatření, stanovím nejprve pro každou příčinu možné řešení zvlášť. Pro tato jednotlivá řešení se následně pokusím nalézt jedno komplexní řešení, které bude obsahovat nápravy všech vybraných příčin tak, aby se jejich negativní vliv zredukoval a současně samotná implementace výsledného řešení byla co nejschůdnější.

Tabulka 10: Seznam nápravných opatření pro vybrané příčiny, zdroj: autor

Příčina	Nápravné opatření dané příčiny
Nedostatek vstupního materiálu	Zavedení pravidelného reportu pro oddělení nákupu, na základě kterého se bude průběžně objednávat vstupní materiál.
Nedodržování FIFO	Jestliže na vstupním místě výrobního stroje čeká více výrobních zakázek na stejnou komponentu, bude povinností výrobního operátora vybrat ke zpracování tu nejstarší.
Hromadné uvolňování	Povinností dispečera/plánovače bude uvolňovat zakázky do výroby na stejnou komponentu rovnoměrně v průběhu měsíce.
Nedostatečné sledování	Pro každou výrobní operaci se nově stanoví týden, ve kterém má být daná operace provedena. Průběh výroby nově uvolněné zakázky se bude sledovat pomocí softwarového nástroje. Povinností výrobních mistrů bude dodržení detailních výrobních plánů. Úkolem dispečera bude zakázky sledovat a zajišťovat jejich včasný přesun.
Nízká kapacita	Součástí nově vytvořeného softwarového nástroje bude i tvorba rozvrhů, na základě kterých bude mistr výroby schopen předpovědět přítomnost zakázky v daném týdnu, tudíž bude mít možnost zajistit patřičnou kapacitu na daném stroji v dostatečném časovém předstihu.
Spárování zakázek	Výrobní zakázky na statorové lopatky se nově budou uvolňovat vždy v páru či jeho násobcích. Tato ucelenost se bude dodržovat až k tepelnému zpracování, po kterém se již zakázky nemusí jít ve shluku.

7.4.1 Řešení softwarovým nástrojem

Jednotlivá nápravná opatření v Tabulce 10 lze implementovat do jednoho softwarového nástroje. Pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel lze vytvořit vícestránkový soubor,

ke kterému budou mít přístup patřiční zaměstnanci, popřípadě budou výstupy pravidelně sdíleny ve vytištěné formě.

Prvním krokem je vytvoření plánu výrobních operací, neboli přiřazení jednotlivých operací k určitému týdnu, který uplyne od uvolnění zakázky do výroby. Plán by měl být sestaven tak, aby většina dokončených zakázek splňovala požadavky stanovené USL. Vzhledem k tomu, že výsledkem je snížení průběžných dob výroby, měla by každá operace co nejdříve následovat po té předchozí. Naneštěstí se ve výrobním procesu nachází velké množství vlivů, které způsobují prodlevy ve výrobě. Z tohoto důvodu je zapotřebí v navrženém sledu operací tyto vlivy zohledňovat a případně vkládat mezi operace dostatečné časové rezervy. Místa mezi operacemi, kam se tyto časové rezervy budou vkládat lze odvodit z Grafu 1 ilustrujícího průměrné čekací doby na jednotlivé operace. Současně je zapotřebí zohledňovat i pracovní dobu jednotlivých pracovišť, Tabulka 3. Jinými slovy navržený plán nesmí být sestaven příliš natěsno z důvodu nižších kapacit a současně nesmí být nadměrně roztažen, jelikož by se nemuselo dosáhnout požadovaného zkrácení výrobních dob.

Tabulka 11: Naplánování sledu výrobních operací, zdroj: autor

Naplánovaný týden provedení operace (týden po uvolnění)	Operace	Název operace	Průměrná doba čekání na vstupním místě [h]	Pracoviště
1	0	Uvolnění	0	LOG_004
	1	Dělení materiálu	475,5	LOG_002
2	5	CNC frézování	213,7	CNC_002
	10	CNC frézování	65,5	CNC_002
3	15	Tepelné zpracování	157,4	TEZ_001
	20	CNC vrtání a frézování	158,0	CNC_007
4	25	CNC frézování	99,0	CNC_005
	30	Zámečnick	212,6	ZAM_001
5	35	Mytí	13,5	ZAM_002
	40	Kontrola kvality	20,8	TK_002
	45	Řezání drátem	113,6	CNC_008
6	50	Zámečnick	153,9	ZAM_001
	55	Kontrola kvality	13,0	TK_002
	60	Mytí	31,0	ZAM_002
7	65	Kontrola kvality	19,1	TK_002
	70	Mytí	32,0	ZAM_002
	75	Kontrola kvality	29,9	TK_002
	80	Zaskladnění	34,6	SKL_006

Přiřazení dokončení výrobní operace k danému týdnu bylo provedeno s ohledem na zjištěné doby čekání na danou operaci. Ke konci výrobního procesu již výrobní zakázky tolik nečekají na vstupním místě, tudíž bylo možné vměstnat do jednoho týdne větší počet operací. Tabulka 11 se v plánovacím nástroji nachází na listu „*Sled Operací*“.

V dalším kroku je zapotřebí vytvořit nový list s názvem „Vyhodnocení a plán uvolňování“, na kterém se bude nacházet plán pro uvolňování zakázek do výroby v týdenních intervalech. Jedná se o jednoduchou tabulku obsahující pro každý jednotlivý týden v roce množství výrobních zakázek potřebných k uvolnění do výroby. Vizualizace tabulky lze nalézt v Tabulce 12. Jelikož je potřeba měsíčně uvolnit do výroby 8 výrobních zakázek a současně by měli být zakázky rovnoměrně uvolňovány, uvolňují se tedy 2 zakázky týdně. S uvolňováním výrobních zakázek do výroby se začíná již první týden v měsíci, následně se uvolňují vždy 2 zakázky na začátku následujícího týdne.

Tabulka 12: Plán uvolňování, zdroj: autor

	C	D	F	G	H	I	J	K
		Rok	2016	2016	2016	2016	2016	2016
Statorové lopatky		Týden	1	2	3	4	5	6
		Kombinace	201601	201602	201603	201604	201605	201606
		Počet zakázek k uvolnění	2	2	2	2	2	2

Z důvodu pravidelného vyhodnocování pohybů výrobních zakázek ve výrobní hale jsem vytvořil další list, který jsem pojmenoval „Transakce přesunu“. Tento list slouží ke vložení materiálových pohybů exportovaných z podnikového systému. Vyexportované pohyby se pro řádnou funkčnost navrhovaného nástroje budou vkládat přibližně jednou až dvakrát týdně. Základním výstupem tohoto listu bude informace o dokončení jednotlivé operace na dané zakázce včetně časového údaje. Sloupce sloužící ke vkládání vyexportovaných přesunů výrobních zakázek se vkládá do žlutě vybarvených sloupců, v části vybarvené modře se nachází vzorce, které je třeba po vložení dat rozkopírovat až do úrovně vložených přesunů.

Tabulka 13: Transakce přesunu a jejich dalších zpracování, zdroj: autor

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	VP	Popis	Move from	Move to	Datum transakce	Kombinace_1	Týden	Rok	Kombinace_2
2	16-BL0130	Uvolnění	0	1	4.1.16 9:12	16-BL0130:0		1	2016 201601
3	16-BL0131	Uvolnění	0	1	4.1.16 9:16	16-BL0131:0		1	2016 201601
4	16-BL0130	Dělení materiálu	1	5	8.1.16 10:35	16-BL0130:1		1	2016 201601
5	16-BL0131	Dělení materiálu	1	5	8.1.16 12:20	16-BL0131:1		1	2016 201601
6	16-BL0132	Uvolnění	0	1	11.1.16 11:54	16-BL0132:0		2	2016 201602
7	16-BL0133	Uvolnění	0	1	11.1.16 11:59	16-BL0133:0		2	2016 201602
8	16-BL0132	Dělení materiálu	1	5	14.1.16 14:06	16-BL0132:1		2	2016 201602
9	16-BL0133	Dělení materiálu	1	5	14.1.16 15:40	16-BL0133:1		2	2016 201602
10	16-BL0130	CNC frézování	5	10	12.1.16 7:32	16-BL0130:5		2	2016 201602

V Tabulce 13 znázorňuje každý řádek jednu transakci, neboli dokončení výrobní operace. Následně se pro každou transakci pomocí vzorců určí týden dokončení. Dokončená operace a týden jejího dokončení se následně využije pro kontingenční tabulku, pomocí které získám kompletní přehled o celkovém dokončeném množství zakázek na dané výrobní operaci za daný týden, Tabulka 14. Kontingenční tabulka se v softwarovém nástroji nachází na listu „PIVOT_dokončeno“ a vždy po vložení vyexportovaných přesunů se provádí její aktualizace.

Tabulka 14: Kontingenční tabulka pro transakce přesunu výrobních zakázek, zdroj: autor

Počít z Kombinace_2	Popisky sloupců	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	Celkový součet
201601		2	2																	4
201602		2	2	2	2															8
201603		2	2	2	2	2	2													12
201604		2	2	4	2	2	2	2	2											18
201605		2	2		2	4	2	4	2	2	2	2								24
201606		2	2	2	2		2	2	2	4	4	4	2	2	2					32
201607		2		2	2	2	2		2	2	2		4	4	4	2	2	2	2	36
201608		2	4	2	2	2	2	2			2	2	2		4	4	4	2		36
201609		2	2	2	2	4	2	2	4	2	2	2			2	2	2		2	34
201610		2	2	2	2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		2	2	32
201611		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	2		2	2	1	37
201612		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			2	4	4	2	2		36
201613				2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4				2	2	30
201614					2	2	2	2	4	2	2			4	4	4	2	2		32
201615						2	2		2	2	2	2	2	2	2	4	5			25
201616									2	2	4	2	2							12
201617											2	2	4	4	2					14
201618																2	4	4		10
Celkový součet		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	432

Nyní jsou již vytvořeny podklady po kompletní vyhodnocení aktuálního průběhu rozpracovaných zakázek. Díky informacím z kontingenční tabulky na listu „PIVOT_dokončeno“ a nadefinování týdne dokončení jednotlivých operací Tabulkou 11, lze

yní na listu „Vyhodnocení a plán uvolňování“ provést kompletní přehled rozpracovaných zakázek, Tabulka 15.

V tabulce na listu „Vyhodnocení a plán uvolňování“, jejíž část je zobrazena v Tabulce 15, se nachází kompletní přehled rozpracovanosti z pohledu množství zakázek, pomocí kterého lze určit množství zakázek se zpožděním. Jestliže ve výrobě nastane zpoždění výrobní zakázky oproti přednastavenému plánu, buňka v tabulce zčervená. Na základě pozice buňky zabarvené červeně lze odvodit konkrétní operaci, kde ke zpoždění došlo. Následně se provede zásah ze strany dispečera, který nejen obsluhuje celý softwarový nástroj, ale stará se o samotný přesun zakázek výrobou. Tudíž je schopen komunikovat s mistry výroby a domluvit vyhotovení dané výrobní operace na zpožděné zakázce.

Tabulka 15: Část tabulky s vyhodnocením výrobních zakázek, zdroj: autor

Plánovaný týden	Operace	Týden	201605	201606	201607	201608
1	0	Původní plán	2	2	2	2
		Přepočtený plán	2	2	2	2
		Dokončeno	2	2	2	2
	1	Původní plán	2	2	2	2
		Přepočtený plán	2	2	2	4
		Dokončeno	2	2	0	4
2	5	Původní plán	2	2	2	2
		Přepočtený plán	0	2	2	2
		Dokončeno	0	2	2	2
	10	Původní plán	2	2	2	2
		Přepočtený plán	2	2	2	2
		Dokončeno	2	2	2	2

Kompletní tabulka vyhodnocení, částečně znázorněna Tabulkou 15, obsahuje veškeré operace. Pro každou operaci se v tabulce nachází tři řádky: „Původní plán“, „Přepočtený plán“ a „Dokončeno“. „Původním plánem“ se rozumí plán uvolňování zakázek do výroby neboli množství výrobních zakázek potřebných uvolnit do výroby. „Dokončeno“ představuje skutečné množství vyhotovených zakázek na dané výrobní operaci. Vzhledem k tomu, že se plán nemusí splnit, existuje „Přepočtený plán“, který zohledňuje deficity z předchozího týdne a připočítává je do plánu pro následující týden. Tento tabulkový přehled v softwarových nástrojích je založen kompletně na vzorcích, tudíž obsluhující personál pouze nahrává data, aktualizuje kontingenční tabulku a kopíruje sloupce pro nadcházející týden.

Posledním vytvořeným listem v softwarovém nástroji jsou „Rozvrhy“, které slouží především k vytištění a následnému předání patřičným osobám na jednotlivých pracovištích. Vytištěné rozvrhy umožní mistrům výroby předpovědět počet příchozích zakázek pro následující týden.

Na základě této předpovědi mohou následně mistři výroby efektivněji zaplánovat ostatní výrobní zakázky na daných pracovištích, čímž se zrychlí tok zakázek celou výrobou. Pro každý týden, obsahuje rozvrh dva sloupce, v jednom se nachází plán pro daný týden a druhý slouží k ručnímu zaznamenání dokončeného počtu zakázek, což slouží i jako osobní pomůcka pro ruční přepočítání plánu. I tato tabulka s rozvrhem je postavena na vzorcích, tudíž stačí pravidelně rozkopírovat vzorce, Tabulka 16.

Tabulka 16: Znárodnění rozdávaných rozvrhů pro mistry výroby, zdroj: autor

Pracoviště	Položka	Op.	Název operace	Zodpovědná osoba	201601	201602	201603	201604
LOG_004	Statorová lopatka	0	Uvolnění	Martin Fiala	2	2	2	2
LOG_002	Statorová lopatka	1	Dělení materiálu	Pavel Milota	2	2	2	2
CNC_002	Statorová lopatka	5	CNC frézování	Jaroslav Svoboda	0	2	2	2
CNC_002	Statorová lopatka	10	CNC frézování	Jaroslav Svoboda	0	2	2	2
TEZ_001	Statorová lopatka	15	Tepelné zpracování	Jan Němeček	0	0	2	2
CNC_007	Statorová lopatka	20	CNC vrtání a frézování	Jaroslav Svoboda	0	0	2	2
CNC_005	Statorová lopatka	25	CNC frézování	Jaroslav Svoboda	0	0	0	2
ZAM_001	Statorová lopatka	30	Zámečnick	David Hájek	0	0	0	2
ZAM_002	Statorová lopatka	35	Mytí	David Hájek	0	0	0	0
TK_002	Statorová lopatka	40	Kontrola kvality	Pavel Brejcha	0	0	0	0
CNC_008	Statorová lopatka	45	Řezání drátem	Jaroslav Svoboda	0	0	0	0
ZAM_001	Statorová lopatka	50	Zámečnick	David Hájek	0	0	0	0
TK_002	Statorová lopatka	55	Kontrola kvality	Pavel Brejcha	0	0	0	0
ZAM_002	Statorová lopatka	60	Mytí	David Hájek	0	0	0	0
TK_002	Statorová lopatka	65	Kontrola kvality	Pavel Brejcha	0	0	0	0
ZAM_002	Statorová lopatka	70	Mytí	David Hájek	0	0	0	0
TK_002	Statorová lopatka	75	Kontrola kvality	Pavel Brejcha	0	0	0	0
SKL_006	Statorová lopatka	80	Zaskladnění	Nikola Polanská	0	0	0	0

Pro zajištění plné funkčnosti daného zlepšení se na začátku každého týdne uskutečňuje setkání, kterého se účastní mistři výroby dotčených pracovištích, dispečer a plánovač výroby. Cílem této schůze je vzájemné informování se o zpožděných zakázkách a nalezení řešení, jak časové prodlevy na zakázkách dohnat. V případě poruchy na stroji se sdělí informace, že zakázky se na dané operaci nevykonají, tudíž mohou mistři výroby, jejichž pracoviště zpracovávají následující operace připravit kapacitu pro jiné výrobní zakázky. Jestliže zakázka se zakázka zdrží na jedné operaci delší dobu, je nezbytně nutné operaci provést co nejdříve její dokončení a zkoordinovat větší počet následujících operací do plynulé posloupnosti bez prodlev tak, aby bylo možné dokončenou zakázku včas dodat k montáži do nadřazené sestavy. V případech, kdy výrobní zakázky proudí výrobou dle navrženého plánu, stačí na pravidelné setkání několik minut.

Dispečer výroby se v nově nastaveném procesu stará nejen o samotné přesuny, ale i o pravidelnou aktualizaci „softwarové nástroje“. Jednou až dvakrát týdně si z informačního systému vyexportuje veškeré přesuny, nahraje je do žlutého pole na listu „Transakce přesunu“, rozkopíruje vzorce v modrém poli až k poslednímu záznamu vloženého exportu transakcí, následně aktualizuje kontingenční tabulku na listu „PIVOT_dokončeno“ a na listu „Vyhodnocení a plán uvolňování“ zkontroluje dle probarvení řádku „Dokončeno“ pro jednotlivou výrobní operaci aktuální stav. Kompletní aktualizace „softwarového nástroje“ trvá přibližně 5 minut, tudíž ji lze bez problému provádět i dvakrát týdně.

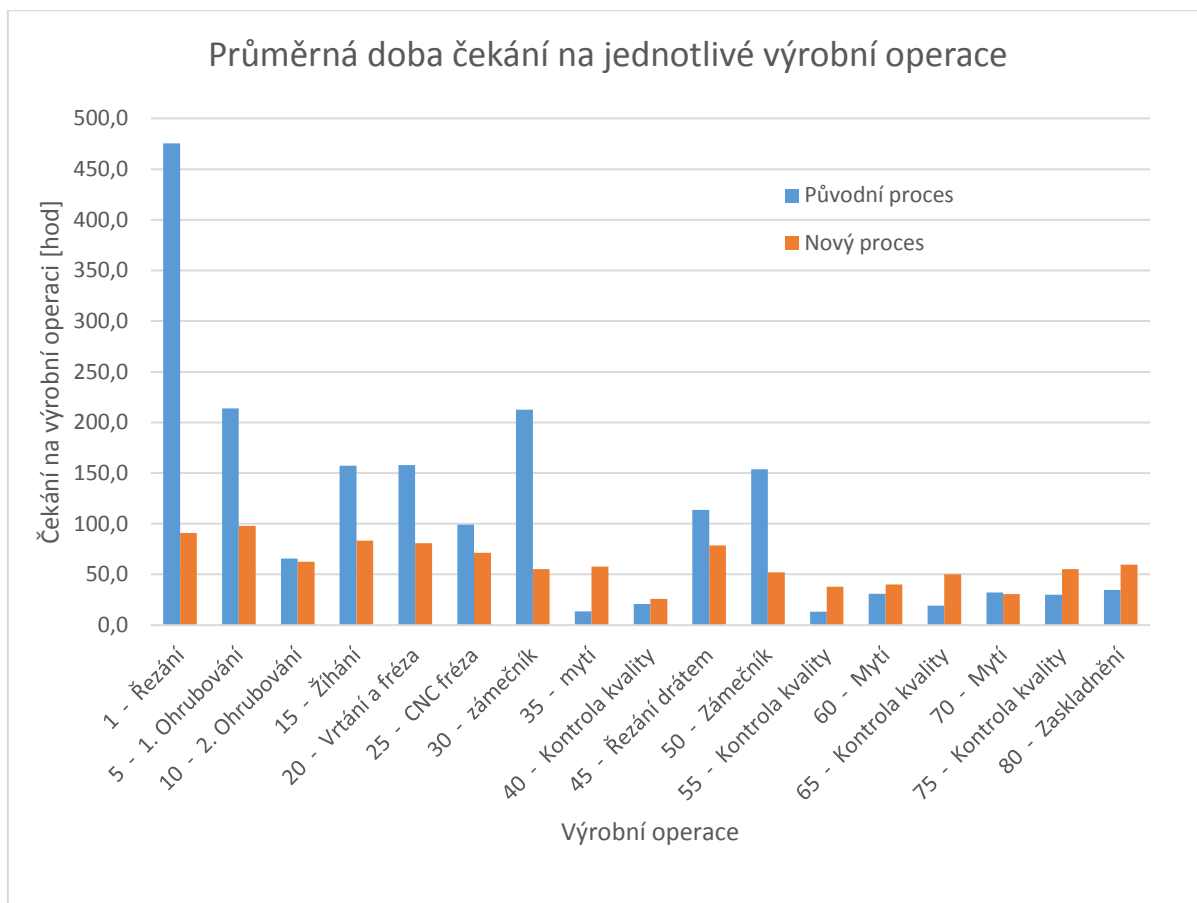
7.4.2 Vyhodnocení implementované změny

Poslední částí fáze Improve je vyhodnocení výstupů zlepšeného procesu. Pro směrodatné posouzení se doporučuje nasbírat stejný počet dat, který byl poskytnut pro vyhodnocení původního procesu. Následující Tabulka 17 obsahuje výrobní příkazy uvolněné v průběhu ledna, února a března. Během těchto tří měsíců byly průběžně zadávány do výroby výrobní zakázky, které se pomocí „softwarového nástroje“ monitorovaly a vyhodnocovaly. Tím, že měl dispečer výroby lepší přehled o rozpracovaných zakázkách a zároveň mohl vyhodnotit míru jejich rozpracování vůči předepsanému plánu, mohl výrobní dispečer lépe koordinovat dokončení jednotlivých operací.

Tabulka 17: Přehled výrobních příkazů včetně průběžných dob výroby v novém procesu,
zdroj: autor

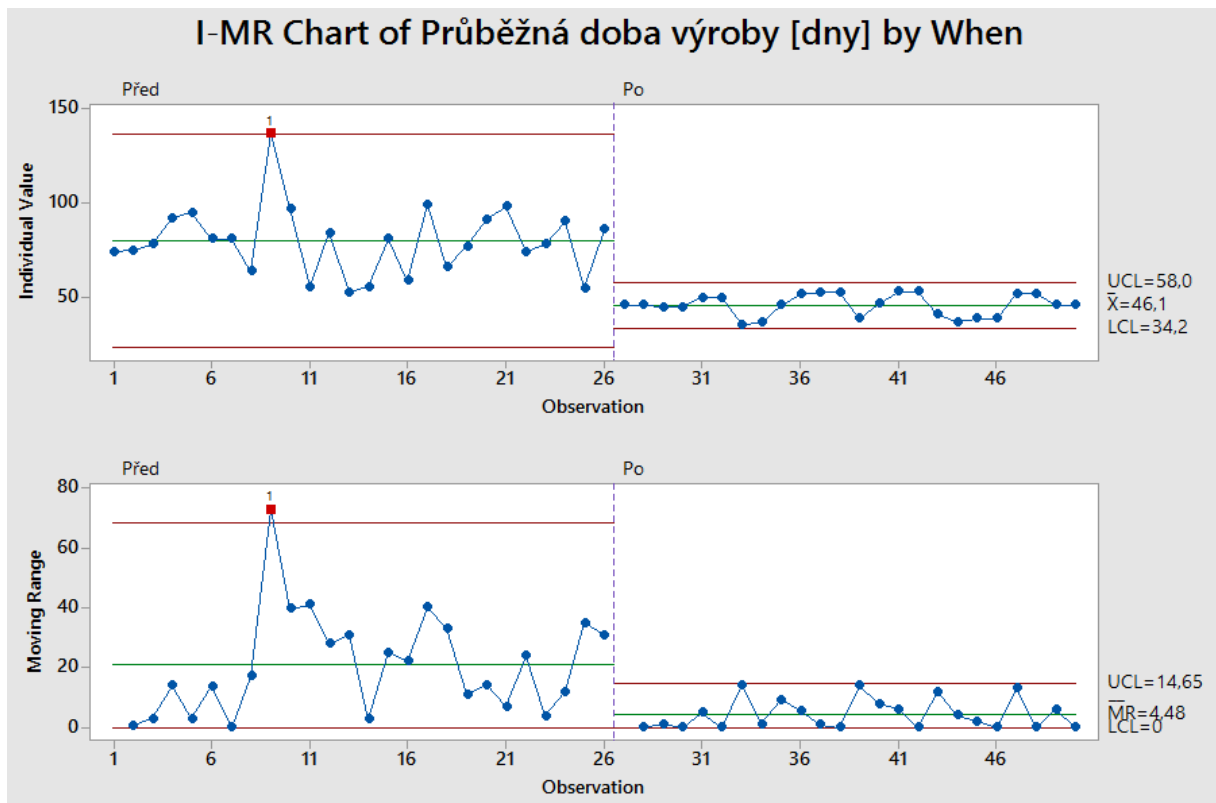
Výrobní zakázka	Datum uvolnění	Datum zaskladnění	Průběžná doba výroby [dny]
16-BL0130	4.1.16 9:12	19.2.16 14:45	46,23
16-BL0131	4.1.16 9:16	19.2.16 15:00	46,24
16-BL0132	11.1.16 11:54	25.2.16 14:28	45,11
16-BL0133	11.1.16 11:59	25.2.16 14:30	45,10
16-BL0134	18.1.16 9:15	8.3.16 12:45	50,15
16-BL0135	18.1.16 9:20	8.3.16 12:48	50,14
16-BL0136	25.1.16 12:16	1.3.16 8:40	35,85
16-BL0137	25.1.16 8:20	2.3.16 9:23	37,04
16-BL0138	1.2.16 9:12	18.3.16 15:14	46,25
16-BL0139	1.2.16 9:17	24.3.16 8:44	51,98
16-BL0140	8.2.16 8:53	1.4.16 9:12	53,01
16-BL0141	8.2.16 8:56	1.4.16 9:17	53,01
16-BL0142	15.2.16 10:42	25.3.16 11:27	39,03
16-BL0143	17.2.16 10:48	4.4.16 11:31	47,03
16-BL0144	22.2.16 8:15	15.4.16 14:32	53,26
16-BL0145	22.2.16 8:19	15.4.16 14:36	53,26
16-BL0146	1.3.16 9:36	11.4.16 13:53	41,18
16-BL0147	29.2.16 9:39	6.4.16 13:57	37,18
16-BL0148	7.3.16 10:42	15.4.16 14:30	39,16
16-BL0149	7.3.16 10:47	15.4.16 14:37	39,16
16-BL0150	14.3.16 8:36	5.5.16 14:28	52,24
16-BL0151	14.3.16 8:41	5.5.16 14:32	52,24
16-BL0152	21.3.16 8:07	6.5.16 10:28	46,10
16-BL0153	21.3.16 8:16	6.5.16 10:43	46,10

V Grafu 2 uvádím průměrné doby čekání na jednotlivé výrobní operace v nově nastaveném procesu. Vzhledem k tomu, že jsem podobný výpočet pro původní proces uvedl již v Grafu 1, předkládám pro porovnání v Grafu 2 i čekací doby v původním procesu.



Graf 2: Porovnání dob čekání na jednotlivé výrobní operace v původním a novém procesu, zdroj: autor

Z Grafu 2 je patrné, že se podařilo významně snížit celkový čas strávený čekáním na vstupním místě následující výrobní operace. Značného zkrácení čekání se zejména dosáhlo hned u první výrobní operace, původní čekání se podařilo snížit ze 475,5 dní na 90,9 dní. Celkově lze vyzorovat i podstatné snížení rozpětí čekacích dob pro nově nastavený proces, což svědčí i o určité standardizaci výrobního procesu. Na druhou stranu u několika výrobních operací došlo k nepatrnému nárůstu čekání, jedná se především o neproblematická místa jako je mytí či kontrola, které se běžně vykonávají do 2 pracovních dnů od příchodu zakázky na vstupní místo. Příčinou těchto nepatrných nárůstů může být volněji nastavený plán pro daný týden po uvolnění, jestliže bych snížil naplánovanou dobu výroby ze sedmi týdnů na šest, vytvořil bych tím větší tlak na včasné provedení mytí a kontroly. Ovšem tímto zásahem bych přišel o časovou rezervu, která mi vykrývá nepředvídatelné negativní vlivy prodlužující průběžnou dobu výroby.



Obrázek 16: Regulační diagram IM-R Chart pro průběžné doby výroby lopatek před a po zavedení nápravného opatření, zdroj: autor

Na základě regulačního diagramu zobrazeného na Obrázku 16 lze konstatovat, že se nejenom snížila střední hodnota průběžné doby výroby statorových lopatek, ale i variabilita v procesu. Z původní střední hodnoty na úrovni 79,9 dní se mi podařilo zredukovat střední hodnotu doby výroby na 46,1 dní. Současně se podařilo snížit i variabilitu, což má za následek nepřekročení kontrolních limitů, tudíž lze nově nastavený proces považovat za stabilní.

Pro nově nastavený proces nebyl zaznamenán výrobní příkaz, jehož výroba by trvala déle jak 60 dní, tudíž ukazatel FTY dosahuje hodnoty 100 %, neboli absolutní absence defektů.

V nově nastaveném procesu bylo za období od začátku ledna do konce března uvolněno celkově do výroby 24 výrobních zakázek, čemuž odpovídá střední hodnota intenzity vstupního toku 1,86 zakázek/týden. V nově nastaveném procesu se střední hodnota průběžné doby výroby rovná 46,1 dní, neboli 6,58 týdne. Dosazením do Littleova vztahu získám střední hodnotu rozpracovaných zakázek ve výrobním procesu:

$$E[F] = \lambda \cdot E[W] = 1,86 \cdot 6,58 = 12,23 \text{ zakázek}$$

V Tabulce 18 se nachází přehled rozpracované výroby ke dni 10. března 2016, díky snížení průběžné doby výroby došlo i ke snížení rozpracovanosti na přibližně 12 zakázek, což

potvrzuje i výše uvedený vztah. Dalším pozitivním efektem zavedeného softwarového nástroje vytvořeného v Microsoft Excel je i úspěšné dodržování frontového režimu FIFO, které zajišťuje vzájemné nepředbíhání zakázek ve výrobním procesu, čímž se významně redukuje variabilita průběžné doby výroby.

Tabulka 18: Veškeré rozpracované zakázky na statorové lopatky ke dni 10. března 2016,
zdroj: autor

	16-BL0138	16-BL0139	16-BL0140	16-BL0141	16-BL0142	16-BL0143	16-BL0144	16-BL0145	16-BL0146	16-BL0147	16-BL0148	16-BL0149
Op. 0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Op. 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Op. 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Op. 10	1	1	1	1	1	1	1	1				
Op. 15	1	1	1	1	1	1	1	1				
Op. 20	1	1	1	1	1	1	1					
Op. 25	1	1	1	1	1							
Op. 30	1	1	1	1								
Op. 35	1	1	1	1								
Op. 40	1	1	1	1								
Op. 45	1	1										
Op. 50	1	1										
Op. 55	1	1										

Prokázal jsem snížení rozpracovaných zakázek ve výrobě, následně se zabývám ukazatelem PCE, neboli účinností procesu. Účinnost nově nastaveného procesu se vypočte následovně:

$$PCE = \frac{\text{Celkový čas s přidanou hodnotou}}{\text{Celková průběžná doba výroby}} * 100 \% = \frac{77,67 \text{ hodin}}{1106,4 \text{ hodin}} = 7,02 \%$$

Tabulka 19: Porovnání charakteristik výstupů z původního a nově nastaveného procesu,
zdroj: autor

	Původní proces	Nově nastavený proces
Střední hodnota doby výroby	79,9 dní	46,1 dní
Směrodatná odchylka doby výroby	17,96 dní	5,70 dní
Podíl defektů	80,77 %	0%
Střední hodnota rozpracovaných zakázek	22,8	12,23
Účinnost procesu	4,05 %	7,02 %

V Tabulce 19 lze vypočítat skutečnost, že se v nově nastaveném procesu podařilo snížit střední hodnotu průběžné doby výroby o více než 40 %, současně se též snížila o více než dvě třetiny směrodatná odchylka, čímž se dosáhlo značného standardizování doby trvání výrobního procesu. Před zavedením nápravných opatření do procesu jsem definoval defekt, jakožto výrobní zakázku, jejíž doba výroby přesahuje 60 dní. V nově nastaveném procesu se pro nasbíraná data nenacházela zakázka, která by tuto hranici překračovala. Z krátkodobého hlediska lze daný proces považovat za velmi předvídatelný, jelikož pracovníci montáže, kde se dané statorové lopatky kompletují do nadřazené sestavy, mohou nyní očekávat včasné dodání statorových lopatek.

7.5 Fáze Control

Jakmile nově nastavený proces dosahuje požadovaných výsledků, přichází na řadu poslední fáze „Control“. Hlavním úkolem této fáze je zaručení správné funkčnosti daného procesu v dlouhodobém horizontu. Pro nasbíraná data, která odpovídají výrobním příkazům uvolněných v průběhu prvních třech měsíců roku 2016, nebyly nalezeny žádné defekty. V delším časovém úseku by již pravděpodobně docházelo k výskytu defektů způsobených například novým zaměstnancem, který by nemusel být plně proškolen ve svých pracovních povinnostech. Aby se zaručila dlouhodobá funkčnost nově nastaveného procesu, zavádí se řada kontrolních prvků. V daném případě jsem se rozhodl pro implementování dodatků do vnitropodnikových předpisů, do kterých pomocí matice zodpovědnosti přiřazuji dotčenému zaměstnanci konkrétní pracovní povinnosti, Tabulka 20.

Tabulka 20: Matice zodpovědnosti pro dotčené zaměstnance, zdroj: autor

	Plánovač výroby	Dispečer výroby	Mistr Výroby	Výrobní operátor	Skladník vstupní kontroly	Skladník komponent	Nákupčí
Aktualizace výrobního plánu	P						
Export dat o pohybech zakázek	S	P					
Aktualizace softwarového nástroje a tisk rozvrhů	S	P					
Dodržování vytištěných rozvrhů			P	S			
Uvolnění výrobní zakázky		P					
Tisk výrobní dokumentace		P					
Předání dokumentace do výdejny materiálu		P					
Výdej materiálu					P		
Pohyb materiálu včetně dokumentace		P					
Provedení výrobní operace				P			
Odepsání dokončené operace v systému			S	P			
Zaskladnění dokončené zakázky						P	
Kontrola zásob vstupního materiálu	P						
Reportování stavu skladů do oddělení nákupu	P						
Nákup vstupního materiálu							P
Řízení pravidelných schůzek	P	S					
P – primární zodpovědnost S – sekundární zodpovědnost							

Pro zajištění správné funkčnosti nově nastaveného procesu tvoří Tabulka 20 součást vnitropodnikových předpisů pro řízení výrobních zakázek. Současně je zapotřebí pravidelná aktualizace softwarového nástroje dispečerem, nejvhodněji dvakrát za týden. Začátkem každého týdne se uskutečňuje pravidelné setkání všech dotčených osob, kdy se na základě vytvořených rozvrhů stanovují priority pro daný týden. Další doplněk tvoří i řádné proškolení případných nových zaměstnanců tak, aby nedošlo k negativnímu ovlivnění výsledných průběžných dob výroby statorových lopatek.

8 Závěr

Předložená práce demonstruje zlepšení vnitropodnikového procesu pomocí metodologie Lean Six Sigma. Použitá metodologie vznikla spojením principů štíhlé výroby a iniciativy Six Sigma. Obě složky metodologie se zrodily v rozdílných dobách a současně mají i různé účely. Jak již bylo v práci pojednáno, hlavním smyslem štíhlé výroby je významné zvýšení rychlosti produkce, čehož se dosahuje odstraněním veškerých časových úseků nepřidávajících hodnotu na finálním výrobku. Záměrem iniciativy Six Sigma je eliminace variability na výstupu procesů tak, aby se mezi střední hodnotu výstupu a stanovenou mez vešel požadovaný počet směrodatných odchylek, tedy šest. Na začátku diplomové práce jsem představil historii a nástroje jak štíhlé výroby, tak i iniciativy Six Sigma, včetně praktického využití.

Po představení metodologie jsem popsal princip turbovrtulového motoru a poukázal na konkrétní komponentu, jejíž dlouhá doba výroby způsobuje komplikace při montáži výsledného motoru. Následně jsem uvedl jednotlivé výrobní operace tvořící kompletní sled činností od počátečního uvolnění výrobní zakázky až po finální zaskladnění vyhotovené komponenty, která se může již použít pro kompletaci nadřazené sestavy.

Praktickou část práce jsem provedl dle cyklu DMAIC, tudíž v první fázi cyklu bylo nejprve nutné definovat problematický proces. Pro zvolený výrobní proces statorové lopatky byla stanovena hranice pro defekt na 60 dní, což představuje časový úsek, během kterého pracovníci montáže očekávají vyhotovenou výrobní zakázku na statorové lopatky, aby mohli pokračovat v kompletaci nadřazené statorové sestavy. Výrobní zakázky s delší průběžnou dobou výroby pravidelně ohrožovaly montáž výsledného motoru, z tohoto důvodu bylo nutné zavést nápravné opatření, které by zajistilo zkrácení doby výroby statorových lopatek včetně snížení odchylek tak, aby nově nastavený proces probíhal dle kladených požadavků. Sběr dat probíhal na výrobních zakázkách uvolněných během července, srpna a září roku 2015. Celkově byly naměřeny hodnoty pro 26 výrobních zakázek s tím, že stanovený plán pro uvolňování byl osm zakázek za měsíc a dvě zakázky nebyly uvolněny v červnu, tudíž proběhlo jejich uvolnění následující měsíc. Na základě naměřených dat jsem stanovil pro jednotlivé výrobní příkazy průběžnou dobu výroby a seřazené hodnoty jsem zpracoval statistickým nástrojem I-MR Chart, který je součástí softwarového nástroje Minitab 17. Pomocí statistického nástroje jsem vyhodnotil daný proces jako nestabilní, jelikož došlo k překročení kontrolních limitů. Ve fázi *Analyze* byl pro daný výrobní proces proveden rozbor, během kterého došlo ke zjištění, že téměř 96 % z celkové průběžné doby výroby statorových lopatek je tvořeno čekáním na provedení výrobní operace. Pro jednotlivé výrobní operace byly stanoveny průměrné doby čekání na vstupním místě, což umožnilo vytvoření přehledu

pracovišť, kde dochází k nejvyšším ztrátám. Jednoznačně nejdelší dobu strávily výrobní zakázky před pracovištěm, kde dochází k řezání tyče, téměř 25 % z celkové průběžné doby výroby čekaly zakázky na daném pracovišti. Ve fázi *Analyze* jsem též využil nástroj „sledovačky“ pomocí kterého lze identifikovat úzká místa ve výrobním procesu, aktuální pozici výrobní zakázky, množství výrobních zakázek v procesu či předbírání zakázek. Výstupem fáze *Analyze* je identifikování potenciálních kořenových příčin způsobujících dlouhé doby výroby. Pro jejich identifikování byla sestavena expertní skupina, která pomocí řízených diskuzí vytvořila seznam možných příčin, a jejich následnou analýzou byly vybrány příčiny určené k nápravě.

V následující fázi *Improve* došlo k vytvoření softwarového nástroje sloužícího k pravidelnému sledování a vyhodnocování rozpracovaných výrobních zakázek. Navržený softwarový nástroj představuje komplexní řešení pro identifikované kořenové příčiny dlouhých průběžných dob výroby. Navržené nápravné řešení zahrnuje přehlednější plán pro uvolňování zakázek rovnoměrně v průběhu měsíce, čímž se pokrývá i problém spárování, jelikož se zakázky uvolňují po dávkách. Pravidelně distribuované rozvrhy pro výrobu řeší potíže s nižší kapacitou a předbíráním zakázek, protože na základě rozvrhů pro následující týdny mohou mistři výroby pro konkrétní dávky vymezit kapacity na jednotlivých pracovištích, což ve výsledku zabrání zbytečnému setrvávání zakázek na vstupním místě. Schopnost softwarového nástroje vyhodnocovat aktuální rozpracovanost zakázek umožňuje rychlé identifikování konkrétních opožděných zakázek, čímž se dává dispečerovi jasný signál, na základě kterého následně podniká kroky pro okamžitou nápravu. Předepsáním výrobních operací pro jednotlivé týdny po uvolnění lze značně ovlivnit nejenom výslednou dobu výroby, ale zejména se tím značně snižuje variabilita na výstupu. Celý softwarový nástroj je velmi jednoduchý na obsluhu a zároveň jeho pravidelná aktualizace zabere zanedbatelnou část pracovní doby zaměstnance. Po fázi *Improve* navazuje poslední fáze *Control*, ve které jsem vytvořil dodatek ve formě matice zodpovědnosti do vnitropodnikových směrnic pro zaručení dlouhodobé funkčnosti nově nastaveného procesu.

Pomocí metodologie Lean Six Sigma se mi v diplomové práci podařilo pro vybraný výrobní proces snížit průběžnou dobu výroby ze 79,9 dní na 46,1 dní. Zároveň kontrolní diagram I-MR Chart dokazuje výrazné snížení variability v procesu za současného dosažení stability procesu. Mezi další pozitivní změny dosažené softwarovým nástrojem patří rovnoměrně rozprostřené rozpracované zakázky a nulový výskyt defektů.

9 Použité zdroje

9.1 Literatura

- [1] WEDGWOOD, Ian. *Lean Sigma: A Practitioner's Guide*. 1st ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2006. ISBN 978-0-13-239078-1.
- [2] TAYLOR, Frederick Winslow. *The Principles of Scientific Management*. New York: Harper and Row, 1913.
- [3] SHELDRAKE, John. *Management Theory*. 2nd ed. London: Thomson Learning, 2003. ISBN 1-86152-963-5.
- [4] GANTT, Henry Laurence. *Organizing for Work*. New York: Harcourt, Brace & Howe, 1919.
- [5] SVOZILOVÁ, Alena. *Zlepšování podnikových procesů*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2011. ISBN 978-80-247-3938-0.
- [7] WILSON, Lonnie. *How to Implement Lean Manufacturing*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. ISBN 978-0-07-162508-1.
- [8] TRUSCOTT, William. *Six Sigma: Continual Improvement for Businesses*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0-7506-57650.
- [10] ROTHER, Mike a SHOOK, John. *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate MUDA*. Brookline: The Lean Enterprise Institute, 1999. ISBN 0-9667843-0-8.
- [12] GOLDRATT, Eliyahu Moshe. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. Great Barrington: North River Press, 1992. ISBN 0-88427-061-0.
- [13] IMAI, Masaaki. *KAIZEN: Metoda, jak zavést úspornější a flexibilnější výrobu v podniku*. Brno: Computer Press, a.s., 2008. ISBN 978-80-251-1621-0.
- [14] PANDE, Peter S., NEUMAN, Robert P., CAVANAGH, Roland R. *Zavádíme metodu Six Sigma*. Brno: TwinsCom, s.r.o., 2002. ISBN 80-238-9289-4.
- [15] GEORGE, Mike, ROWLANDS, Dave, KASTLE, Bill. *Co je Lean Six Sigma?*. Brno: SC&C Partner, spol. s r.o., 2002. ISBN 80-239-5172-6.

- [16] PARK, Sung H. *Six Sigma for Quality and Productivity Promotion*. Tokyo: Asian Productivity Organisation, 2003. ISBN 92-833-1722-X.
- [25] McCARTY, Thomas, DANIELS Lorraine, BREMER Michael a GUPTA, Praveen. *The Six Sigma Black Belt Handbook*. New York: McGraw-Hill Professional Books, 2005. ISBN 9780071443296.

9.2 Internetové zdroje

- [6] *Lean Enterprise Institute: Principles of Lean* [online]. [Cit. 15.3.2016]. Dostupné z: <http://www.lean.org/WhatsLean/Principles.cfm>
- [9] *iSixSigma: Value-Added* [online]. [Cit. 23.3.2016]. Dostupné z: <https://www.isixsigma.com/dictionary/value-added/>
- [11] *MindTools: The Theory of Constraints (TOC)* [online]. [Cit. 25.3.2016]. Dostupné z: <https://www.mindtools.com/pages/article/toc.htm>
- [17] *IATA: Safety Fact Sheet – June 1 2015 FINAL*. [online]. [Cit. 20.4.2016]. Dostupné z: <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2015-03-09-01.aspx>
- [18] *Forbes: Minimizing The Impacts Of Lost Luggage -- The Scary Statistics*. [online]. [Cit. 21.4.2016]. Dostupné z: <http://www.forbes.com/sites/benkepes/2015/04/08/minimizing-the-impacts-of-lost-luggage-the-scary-statistics/#256141195e67>
- [19] *RLM & Associates: Six Sigma Introduction 1*. [online]. [Cit. 24.4.2016]. Dostupné z: http://images.slideplayer.com/16/4884898/slides/slide_42.jpg
- [20] *Process Quality Associates Inc.: The Evolution of Six Sigma*. [online]. [Cit. 27.4.2016]. Dostupné z: <http://www.pqa.net/ProdServices/sixsigma/W06002009.html>
- [21] *Meta Stack Exchange: Aviation Discussion*. [online]. [Cit. 3.5.2016]. Dostupné z: <http://aviation.stackexchange.com/questions/1790/what-is-hotel-mode-on-a-turboprop-engine>
- [22] *Cirrus Aviation Inc: PRATT & WHITNEY CANADA SMALL TURBINE ENGINES*. [online]. [Cit. 14.5.2016]. Dostupné z: <http://cirrusaviationinc.com/pt6.htm>
- [23] *Výukové stránky Mgr. Šárky Voráčové, Ph. D.: Teorie hromadné obsluhy*. [online]. [Cit. 18.5.2016]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/departament/k6111/pedagog/K611THO.html>

- [24] Federal Aviation Administration: *Accident Overview*. [online]. [Cit. 20.5.2016].
Dostupné z:
http://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=3&LLID=60&LLTypeID=2

Seznam obrázků

- Obrázek 1: Implementační cyklus technik štíhlé výroby
- Obrázek 2: Znárodnění procesů s různým rozptylem hodnot na výstupu
- Obrázek 3: Variabilita ovlivňuje naši schopnost plnit potřeby zákazníka
- Obrázek 4: Úrovně kvality 6σ a 3σ
- Obrázek 5: Vliv posunu střední hodnoty výstupu o $1,5\sigma$ na procesu úrovně 6σ
- Obrázek 6: Úrovně kvality sigma v oblastech běžného života
- Obrázek 7: Vývoj využití metodologie Six Sigma globálními společnostmi
- Obrázek 8: Ilustrace turbovrtulového motoru
- Obrázek 9: Ilustrační obrázek statorové lopatky turbovrtulového motoru
- Obrázek 10: Ilustrace barevné luminiscenční defektoskopie na lopatce
- Obrázek 11: Délky operací a časy prodlev pro zvolený proces vytvořený na základě dat z roku 2014
- Obrázek 12: Regulační diagram IM-R Chart pro průběžné doby výroby lopatek uvolněných za období červenec až září 2015
- Obrázek 13: Procesní způsobilost pro průběžné doby výroby lopatek zakázek uvolněných mezi červencem a zářím 2015
- Obrázek 14: Testování normality naměřených dat pomocí Anderson-Darlingova testu
- Obrázek 15: Ishikawův diagram pro příčiny dlouhých průběžných dob výroby
- Obrázek 16: Regulační diagram IM-R Chart pro průběžné doby výroby lopatek před a po zavedení nápravného opatření

Seznam tabulek

- Tabulka 1: Úrovní kvality sigma, výtěžnost a míra defektů
- Tabulka 2: Hlavní znaky a porovnání Lean a Six Sigma
- Tabulka 3: Pracovní doba na jednotlivých pracovištích včetně norem práce pro operace
- Tabulka 4: Statistické zpracování průběžných dob komponent statoru v letech 2010 až 2015
- Tabulka 5: SIPOC diagram pro výrobu letecké komponenty tvořící stator
- Tabulka 6: Nadefinování sledované veličiny
- Tabulka 7: Zpracovaná data o výrobních příkazech uvolněných od července do září roku 2015
- Tabulka 8: Veškeré rozpracované zakázky na statorové lopatky ke dni 20. září 2015
- Tabulka 9: Kvantifikace jednotlivých příčin dlouhé doby výroby
- Tabulka 10: Seznam nápravných opatření pro vybrané příčiny
- Tabulka 11: Naplánování sledu výrobních operací
- Tabulka 12: Plán uvolňování
- Tabulka 13: Transakce přesunu a jejich dalších zpracování
- Tabulka 14: Kontingenční tabulka pro transakce přesunu výrobních zakázek
- Tabulka 15: Část tabulky s vyhodnocením výrobních zakázek
- Tabulka 16: Znázornění rozdáváných rozvrhů pro mistry výroby
- Tabulka 17: Přehled výrobních příkazů včetně průběžných dob výroby v novém procesu
- Tabulka 18: Veškeré rozpracované zakázky na statorové lopatky ke dni 10. března 2016
- Tabulka 19: Porovnání charakteristik výstupů z původního a nově nastaveného procesu
- Tabulka 20: Matice zodpovědnosti pro dotčené zaměstnance

Seznam grafů

- Graf 1: Grafické znázornění průměrných dob čekání výrobních zakázek na jednotlivé operace
- Graf 2: Porovnání dob čekání na jednotlivé výrobní operace v původním a novém procesu