



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**ANALÝZA MOŽNOSTÍ INTEGRACE 3D
TISKU V PROAKTIVNÍ ÚDRŽBĚ
STROJNÍHO VYBAVENÍ**

ANALYSIS OF 3D PRINT INTEGRATION CAPABILITIES IN PROACTIVE
MACHINERY MANAGEMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Egor Cherniaev

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Poliščuk, Ph.D.

BRNO 2022



Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Egor Cherniaev**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. Radek Poliščuk, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza možností integrace 3D tisku v proaktivní údržbě strojního vybavení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řada průmyslových výrobních procesů při údržbě strojního vybavení vyžaduje speciální přípravky a nástroje spotřebního charakteru, jejichž nedostupnost a nebo nepředvídatelné ceny by mohly ohrozit efektivní fungování podniku. V rámci plánování proaktivní údržby je proto vhodné posoudit i alternativní postupy zajištění potřebných vhodných komponent, operativně vyrobitelných vhodnou formou 3D tisku.

Cíle bakalářské práce:

Vymezení problematiky a analýza míst ve výrobním procesu a v údržbě, kde by byly aplikovatelné komponenty vyráběné formou 3D tisku.

Identifikace údržbových procesů, kde by tato alternativa byla vhodná – výhody, nevýhody, potenciální problémy a možná řešení.

Stanovení pilotní sady součástí, vyrobitelných různými způsoby a z různých materiálů (3D tiskem, běžným obráběním v dílně), tak aby bylo možné zjistit reálné finanční a časové náklady a v provozu posoudit jejich životnost.

Seznam doporučené literatury:

CHUA, Chee Kai. a Kah Fai. LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte., 2014. ISBN 9789814571401.

KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 9788025148761.

Kniha Základy 3D tisku od Josefa Průši - Prusa Research a.s. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši. Prusa3D - 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši [online]. Copyright © Prusa Research a.s., [cit. 22.10.2021]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se věnuje analýze možností integrace aditivní výroby do procesů údržby z hlediska nákladů a ekonomických výhod. Z analýzy statistických dat bude stanoven okruh dílů, vhodných pro náhradu 3D tiskem. Výrobní proces některých dílů bude analyzován z hlediska nákladů při použití konvenčních a aditivních technologií.

ABSTRACT

This paper analyzes capabilities of additive manufacturing integration in proactive machinery management mainly from the economical point of view. Statistical data is analyzed to identify sets of parts, which could be produced using 3D printing techniques. Some parts are analyzed for manufacturing costs when using traditional and additive technologies.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní výroba, kalkulace nákladů, proaktivní údržba, Siemens.

KEYWORDS

Additive manufacturing, cost calculation, proactive machinery management, Siemens.



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2022

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHERNIAEV, Egor. *Analýza možností integrace 3D tisku v proaktivní údržbě strojního vybavení*. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140321>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Radek Poliščuk, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Mé poděkování patří též projektovému manažerovi Ing. Michalovi Průšovi, konstruktérovi pro údržbu Lubomírovi Šulcovi a vedoucímu konstrukce nástrojárny Radkovi Havránkovi ze závodu Siemens Mohelnice, za ochotu a spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2022

.....
Cherniaev Egor

OBSAH

1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Siemens Mohelnice	11
2.1.1 Současný stav oddělení údržby	11
2.1.2 Využití aditivních technologií	12
2.2 Údržba	12
2.2.1 Preventivní údržba	13
2.2.2 Prediktivní údržba	13
2.2.3 Proaktivní údržba	13
2.3 Standardy v aditivní výrobě	13
2.4 Základy aditivní výroby	14
2.4.1 Principy aditivní výroby	14
2.4.2 Aplikační klasifikace	15
2.5 Vybrané technologie	15
2.5.1 Powder bed fusion	15
2.5.2 Material extrusion	16
2.5.3 Binder jetting	16
2.5.4 HP Multi Jet Fusion	16
2.6 Pracovní postup v aditivní výrobě	17
2.7 Náklady podniku	18
2.7.1 Kalkulace nákladů	18
2.7.2 Přehled současného stavu poznání	19
2.7.3 Definice nákladového modelu	20
3 PRAKTICKÁ ČÁST	22
3.1 Klasifikace problému práce	22
3.2 Ekonomická výhoda	22
3.3 Hypotéza	23
3.4 Předpoklady	23
3.5 Obecný popis řešení	23
3.6 Analýza dat	24
3.6.1 Popis dat	24
3.6.2 Normalizace	25
3.6.3 Analýza	25
3.6.4 Výsledky	26
3.7 Výběr dílů	27
3.7.1 Spolupráce se společností Siemens s.r.o.	27
3.7.2 Výběrové řízení	28
3.8 Nákladové modely	29

3.8.1 Zdroje firmy	29
3.8.2 Konvenční výroba	30
3.8.3 Aditivní výroba	31
3.8.4 Jak pracovat s modely?	31
3.9 Sběr dat	32
4 VÝSLEDKY A DISKUSE	34
4.1 Nalezené skupiny dílů	34
4.2 Předpoklady a zjednodušení	34
4.3 Cíle a pokračování práce	34
4.4 Defínice podmínek ekonomické výhody	34
4.4.1 Základní tvar modelů	35
4.4.2 Příklad reaktivní údržby	35
4.4.3 Příklad prediktivní údržby	37
4.4.4 Příklad proaktivní údržby	38
5 ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41
SEZNAM OBRÁZKŮ	43
SEZNAM TABULEK	44

1 ÚVOD

Údržba strojů a zařízení je perspektivní oblast pro snížení nákladů podniku. Zavedením vhodných technologických postupů lze docílit menších časů odstávky stroje, prodloužit jeho životnost a redukovat náklady na údržbu.

Údržba má dlouhou historii rozvoje a přístup k zajištění provozuschopnosti se měnil pod nátlakem doby. Prošli jsme cestou od údržby reaktivní až do prediktivní. V podmínkách nárůstu objemů výroby, růstu požadavků na kvalitu výrobků a snižování jejich cen se vyvíjí přístup proaktivní, který sahá až do příčin vzniku závad.

Vyvíjí se i výrobní technologie. Dnes zaznamenáváme nárůst zájmu o aditivní výrobu jako o náhradu konvenčních metod. Velká část výzkumů se věnuje hodnocení mechanických vlastností výrobků, zejména se zkoumá vliv různých parametrů tisku a materiálu. Z hlediska podniku zavedení nové technologie do praxe je spojeno navíc s otázkami ekonomického smyslu. Je důležité mít představu za jakých podmínek lze technologii využívat minimálně bez ztrát, ideálně s výhodou oproti aktuálnímu řešení.

Zavedení nových přístupů do praxe v údržbě může být podpořeno použitím nových výrobních metod a naopak, nové přístupy ve výrobě otevírají cesty ke zlepšení různých procesů v podniku. Právě proto se závod Siemens Mohelnice v rámci rozvoje interních procesů rozhodl prozkoumat vhodnost aditivní výroby pro oddělení údržby z hlediska časových a finančních nákladů. Tato práce si pokládá za cíl nalezení odpovědí na otázku, zda zavedení aditivní výroby do oddělení údržby bude mít pro firmu ekonomický smysl, popřípadě za jakých podmínek.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Siemens Mohelnice

Skupina Siemens Česká republika je součástí globálního koncernu Siemens AG a závod SIEMENS Elektromotory Mohelnice s více než dvěma tisíci zaměstnanců patří mezi významné světové dodavatele nízkonapěťových asynchronních elektromotorů, určených zejména pro výrobce čerpadel, kompresorů a klimatizačních zařízení [1]. V době Covidu byl závod zapojen ve spolupráci s ČVUT do výroby respirátoru na tiskárně HP Multi Jet Fusion (obr. 1) [2]. Dnes je v plánech vedení závodu realizace digitální transformace výroby pro zajištění dokonalé kontroly nad výrobním procesem [3].



Obr. 1: Část respirátoru RP95-3D, která se vyráběla v závodě Siemens.

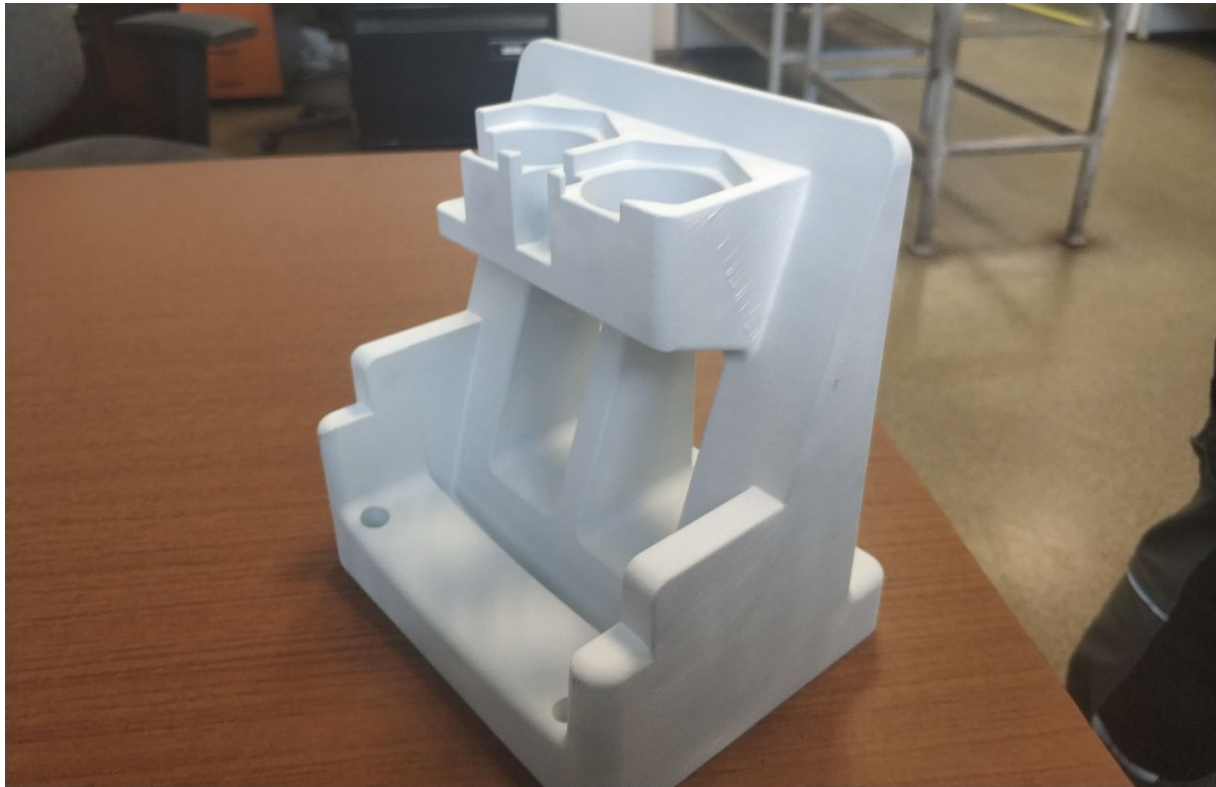
2.1.1 Současný stav oddělení údržby

Údržbu strojů a zařízení na závodě zajišťuje *oddělení údržby*. Oddělení reaguje na poruchy strojů, provádí plánované diagnostiky a *preventivní údržbu* (příp. *prediktivní*).

V rámci dané práce se budeme věnovat teoretickému případu poruchy, při kterém je potřeba vyměnit (vyrobiť) jeden jediný díl. Běžný pracovní postup z hlediska údržbáře je v daném případě změnit rozměry potřebného dílu, vypracovat výkres a poslat objednávku na nástrojárnu, která se z historických důvodů věnuje výrobě pro potřeby oddělení údržby. Pouze tato část práce údržbáře bude posuzována z hlediska časových a finančních nákladů a integrace aditivní výroby.

2.1.2 Využití aditivních technologií

Aditivní technologie jsou dnes zapojené do výrobních procesů závodu. Jde především o tisk málo namáhaných dílů a přípravků (příklad na obr. 2). Výběr technologie pro výrobu dílu se řídí praktickými zkušenostmi, protože u řady dílů lze snadno posoudit zda jsou aditivní technologie aplikovatelné a má-li jejich použití ekonomický smysl.



Obr. 2: Přípravek vyrobený na HP Multi Jet Fusion.

2.2 Údržba

ČSN EN 13306 definuje údržbu jako kombinaci všech technických, administrativních a manažerských zásahů během životního cyklu objektu zaměřených na jeho udržení ve stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci, nebo jeho navrácení do tohoto stavu [4]. Pohled na údržbu se mění a s postupem času údržba nabývá na důležitosti z důvodu rostoucích požadavků na výrobu a rostoucí komplikovaností strojů. V současné době se údržba dělí na dohled, inspekci, údržbu a opravu. [5]

Technologie a přístupy, které se ujaly v údržbových procesech jsou podmíněné jistými praktickými požadavky. Z pohledu zařazení nové technologie do praxe je potřeba počítat především s časovou náročností výroby, protože v případě poruchy značnou část ztrát tvoří ztráty implicitní, zejména časy prostojů linky nebo strojů [6], přičemž v praxi jsou běžné i případy kdy se na náhradní díl čeká týdny nebo měsíce. Proto se v případě *reaktivní údržby* (reakce na poruchu) na technologie díváme primárně z hlediska úspory času, zatímco přímé náklady na materiál a práci nebývají v porovnání s cenou prostojů podstatné. Naproti tomu v

podmínkách proaktivní údržby čas ztrácí cenu a zůstává větší prostor pro úspory práce a materiálu.

2.2.1 Preventivní údržba

Preventivní údržba je koncept údržby, dle kterého se snažíme poruše předejít. Cílem je posoudit degradaci, zmírnit její následky a snížit pravděpodobnost poruchy objektu [4]. Z toho důvodu se zavádějí pravidelné kontroly a servisní prohlídky. Zároveň je nutno s předstihem zajistit zásobování příslušnými náhradními díly. [5][6]

Údržbové procesy společnosti Siemens se aktuálně řídí koncepcí preventivní údržby. V jistých případech se lze setkat s prediktivní údržbou na základě diagnostiky.

2.2.2 Prediktivní údržba

Prediktivní údržba je údržba prováděná na základě předpovědi odvozené z opakované analýzy nebo ze známých charakteristik a vyhodnocení významných parametrů degradace objektu [4]. Jde o statistickou analýzu dat ze senzorů, řídicích jednotek, protokolů údržby atd. [5]

Z hlediska nákladů se při daném typu údržby značně redukuje čas prostoje a s tím klesá cena času jako zdroje firmy (viz. kapitola 9). To znamená, že optimalizace nákladů bývá spojena s optimalizací jiných složek, zejména práce a materiálu.

2.2.3 Proaktivní údržba

Proaktivní údržba není samostatný typ údržby, ale je odvozena z prediktivní údržby a existuje především z důvodů, že určité skupiny poruch se pravidelně opakují a mají jasné příčiny, mezi které patří například kvalita instalace a seřízení objektu údržby, špatný postup údržby a nebo zásahy do objektu. Proaktivní údržba tak řeší především příčiny vzniku poruchy. [5]

Při analýze možností integrace aditivních technologií do proaktivní údržby nejprve budeme muset analyzovat integraci do základních údržbových procesů (výroba náhradních dílů) z hlediska nákladu, teprve potom budou probrány další možnosti zapojení technologie. Uvedený postup zároveň odpovídá současným potřebám oddělení údržby.

2.3 Standardy v aditivní výrobě

Aditivní výroba je relativně mladé průmyslové odvětví, proto standardizace v dané oblasti donedávna téměř neexistovala.

V roce 2007, v Německu organizace German Society of Mechanical Engineers (VDI) vypracovala speciální doporučení pro Rapid prototyping (VDI3404), která byla publikována v roce 2008 [7]. V roce 2009 organizace American Society of Mechanical Engineers (ASME) ve spolupráci s American Society for Testing and Materials (ASTM) začala vývoj vlastních standardů. Na podzim v roce 2009 ASTM byla založena komise F42, pro účely šíření poznatků v oblastech aditivní výroby, simulace výzkumů, vývoje standardů. Do činnosti komise bylo zapojeno kolem 100 expertů, primárně z území USA a EU. [7][8][9]

V roce 2011 byla založena komise pod vedením International Organization for Standardization (ISO), do jejíž činnosti jsou zapojeni členové z 22 zemí, přičemž 6 zemí vykonává dohled [10]. Složky této komise pracují na vlastních normách a za účelem adopce zkoumají externí normy ASTM [8]. V současné době ISO/TC 261 vydalo 22 norem, jejichž aktuální seznam je k dispozici na webových stránkách organizace [10].

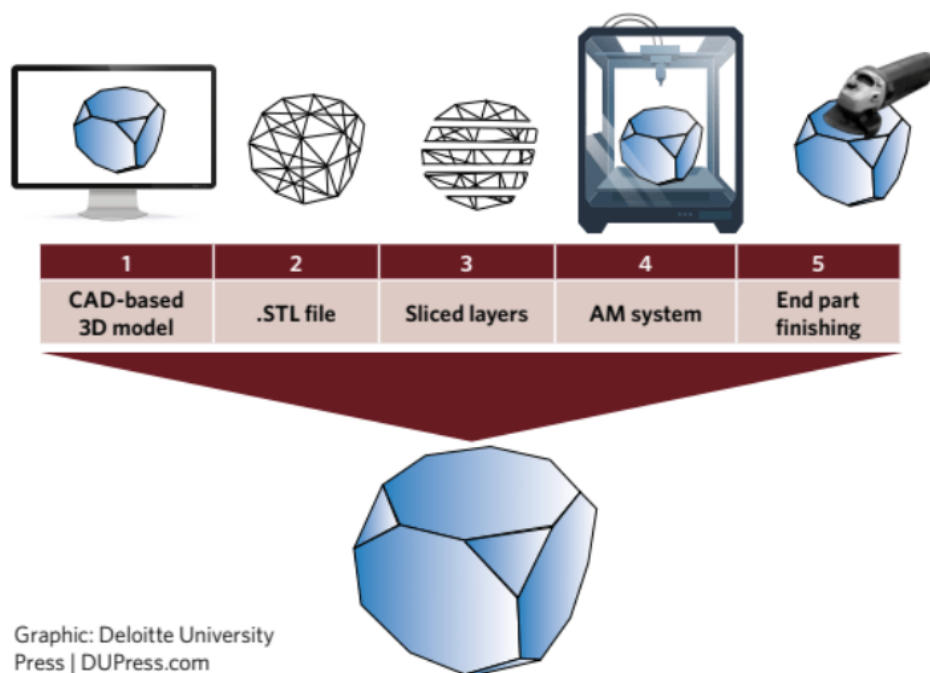
Terminologie v dané práci bude odpovídat ISO/ASTM 52900:2021 (volný překlad normy do češtiny), důležité definice budou explicitně vypsány, případné odchylky od normy budou vyznačeny.

2.4 Základy aditivní výroby

Norma ISO/ASTM 52900:2021 definuje *aditivní výrobu (Additive manufacturing, AM)* jako proces spojení materiálu za účelem tvorby *dílu (part)* přímo z 3D CAD modelu, běžně *vrstva (layer)* po vrstvě. Z definice AM je postavena proti konvenčním metodám výroby - subtraktivním a tvarovacím [11]. Pro účely této práce definici upřesníme, budeme požadovat aby tisk byl zcela automatický [7].

2.4.1 Principy aditivní výroby

Hlavní princip AM je sestavení 3D fyzického objektu z množství vrstev, zpravidla stejné tloušťky. Každá vrstva je vyprodukována na základě dat 3D modelu a umístěna na předchozí vrstvu. Obr. 3. definuje obecný *pracovní postup (process chain, workflow)*, který je stejný pro většinu technologií AM [7].



Obr. 3: Obecný pracovní postup v aditivní výrobě [12].

Vytvořený 3D model je potřeba *nařezat (slicing)* na 2D vrstvy za použitím software nazývaného *slicer*. Pro tisk výsledný soubor dat se přeneso do výrobního zařízení, které provede tisk automaticky. Přesný postup je závislý na zvolené technologii výroby a tiskárně.

2.4.2 Aplikační klasifikace

Aplikační klasifikace aditivní výroby (application levels), použitá v dané práci, není standardizována, nicméně je široce akceptována (jedná se o klasifikaci dle [7]). AM se dělí na dvě základní kategorie dle oblastí použití: *Rapid prototyping* a *Rapid manufacturing*.

Rapid prototyping je kategorie, do které patří výroba prototypů, vzorků či názorných modelů pomocí metod AM, zatímco cílem Rapid manufacturing je regulérní produkt či díl.

Všechny procesy AM jsou *přímé procesy (direct process)*. Pojem poukazuje na to, že výsledný fyzický objekt vzniká bezprostředně z 3D modelu. Výrobek, který vzniká *nepřímým procesem (indirect proces)* neodpovídá definici aditivní výroby, tím pádem, nepřímé procesy AM nejsou ve skutečnosti součástí aditivní výroby, nýbrž technologiemi kopírování (např. odlévání silikonové pryže do formy vyrobené AM).

Rapid prototyping

Kategorie se dále dělí na *Solid imaging* (resp. *Concept modeling*) a *Function prototyping*. Solid imaging je kategorie dílů, vyrobených za účelem ověření základních konceptů, pomáhají získat hmotnou představu o výrobku. Function prototyping slouží k ověření jednotlivých izolovaných funkcí výrobku.

Rapid manufacturing

Pojem popisuje skupinu procesů výroby finálního produktu (odpovídá všem požadavkům, založeným při návrhu) nebo finální částí produktů, které vznikají přímo použitím AM (*Direct manufacturing*, resp. *Direct Digital Manufacturing* [13]). Vzniká li při výrobě negativní díl (např. forma na lití), výroba spadá do podkategorie *Direct tooling*.

2.5 Vybrané technologie

Existuje široká řada technologií AM. Dále budou popsány nejvíce rozšířené přístupy. Větší pozornost bude věnována laserovému sintrování (SLS), vzhledem k jejímu pozitivnímu přijetí v průmyslovém prostředí a využití v mnoha technologiích, včetně HP Multi Jet Fusion [14].

2.5.1 Powder bed fusion

Norma definuje kategorii *powder bed fusion* jako skupinu technologií aditivní výroby, kde je termální energie selektivně aplikována na práškové medium [11]. Tyto technologie obecně nevyžadují použití podpor při tisku, protože okolní materiál zajišťuje dostatečnou stabilitu vyráběného dílu během tisku [7].

Laser sintering, Selective laser sintering (LS, SLS)

Pojem se používá zejména ve spojení se zpracováním plastů [7]. Stroj je vybaven zásobníkem materiálu (prášku) a pracovní komorou, které jsou zahřáté na určitou teplotu těsně pod bodem tání materiálu. V komoře pro tisk laserem se speče (sintruje) 2D řez modelu, potom se komora posune dolů, přes vypálený obrys je nanесena nová vrstva materiálu a proces se opakuje [15].

Preferovanou skupinou materiálů pro sintrování jsou polyamidy, přičemž oproti konvenční výrobě (např. vstřikování plastu) je nutné dodatečně kontrolovat mechanické vlastnosti výrobku, protože homogenní chemické složení materiálu zde nezajišťuje izotropní vlastnosti. Typicky se používá polyamid 11 nebo 12 [7]. Například výrobce 3D tiskáren HP na svých stránkách uvádí PA 11, 12 a PP (polypropylén) včetně dalších polymerů [16].

Laser Melting, Selective Laser Melting (SLM)

Technologicky jde o obdobu SLS, s tím rozdílem, že technika tavení byla upravena pro výrobu kovových dílů, u kterých je vyžadována vysoká hustota (> 99%) [7]. Pro zamezení reakce prášku s kyslíkem bývá pracovní komora vakuová, nebo plněná inertním plynem [9].

Pro tisk je k dispozici široká škála materiálů, včetně uhlíkové oceli, nerezové oceli, titanu a dalších kovových materiálů.

2.5.2 Material extrusion

Norma definuje kategorii *material extrusion* jako skupinu technologií, kde je při tisku roztavený materiál selektivně dávkován pomocí trysky [11], pohybuje se v pracovním prostoru tiskárny.

Fused deposition modeling (FDM)

Je nejpopulárnější technologie 3D tisku mezi drobnými spotřebiteli. Pochází z roku 1989, kdy byla patentována Scottem Crumpem. Technologie popisuje způsob 3D tisku vytlačněním roztaveného materiálu tryskou, která se pohybuje v průřezu výrobku. Jako tiskový materiál (filament) se používá specifická skupina termoplastů, které musí bez degradace vydržet zahřívání a tlak během tisku. Na druhou stranu FDM se vyznačuje nízkou cenou výroby a poměrně vysokou rychlostí tisku. [15] Z České Republiky pochází například výrobce FDM tiskáren Josef Průša a jeho společnost Prusa Research.

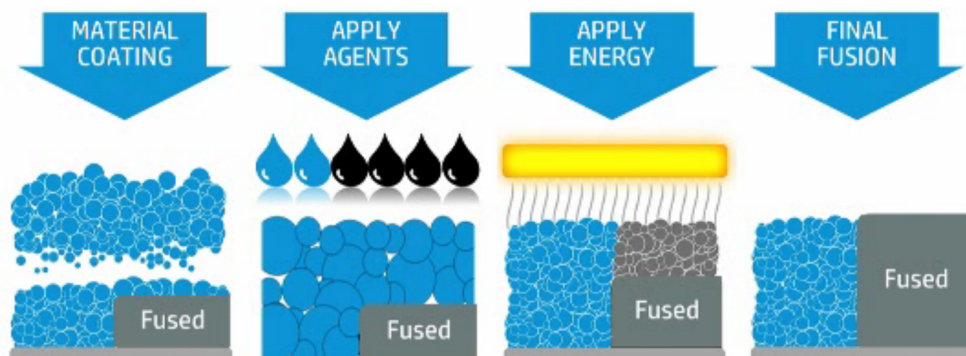
2.5.3 Binder jetting

Norma definuje kategorii *binder jetting* jako skupinu technologií aditivní výroby, kde se tekuté pojivo aplikuje selektivně za účelem spojení materiálu v podobě prášku [11]. Konstrukce tiskáren je technicky shodná s tiskárnami na bázi Powder Bed Fusion, s tím rozdílem, že hlavička tiskárny aplikuje místo termální energie pojivo.

2.5.4 HP Multi Jet Fusion

Technologie *HP Multi Jet Fusion* nespadá do žádné z definovaných kategorií, je to spojení dvou přístupů - Powder Bed Fusion a Binder Jetting. Konstrukce tiskárny je shodná s Powder Bed Fusion, kde tisk probíhá po vrstvách. Na každou vrstvu se v místech spojení materiálu

aplikuje v pojivo a speciální tekutina pro zlepšení vlastností výrobku. Po zahřátí a vychladnutí daných oblastí vzniká pevný spoj (obr. 4).



Obr. 4: Ilustrace technologie HP Multi Jet Fusion [14].

2.6 Pracovní postup v aditivní výrobě

Pro návrh nákladových modelů potřebujeme popsat postup výroby za použití aditivních technologií. Obecný postup následně rozšíříme operací seřízení stroje, která je běžně zahrnuta do operace tisku.

Základem pro každý typ AM je 3D model dílu a jeho tvorba je první krok, shodný pro všechny druhy aditivních technologií. Obecně není důležité jak byl model získán. K primárnímu definici tvaru je možné použít například jak profesionální CAD systémy, tak 3D skenovací zařízení s vhodným softwarem pro post-processing dat. K uložení modelu je k dispozici řada formátů (STL, AFM, VRML), přičemž nejtypičtějším je formát STL [7]. Před tiskem pak následuje tzv. slicing (řezání) modelu na 2D vrstvy, přičemž vhodný software často poskytuje sám výrobce dané tiskárny [15].

Během modelování lze s výhodou využít optimalizačních technik ke snížení hmotnosti dílu a zvýšení pevnosti. Příkladem optimalizační techniky může sloužit *topologická optimalizace a generativní design*.

Další krok je výběr materiálu a technologie tisku s ohledem na konstrukční požadavky na díl. Řada studií se zabývá zkoumáním materiálu a technologií tisku z hlediska mechanických vlastností [15][17], nicméně, pro účely této práce nejsou mechanické vlastnosti dílu podstatné a měly by být řešeny zvlášť.

Seřízení zahrnuje uvedení stroje do provozního stavu (předehřátí materiálu, úklid po tisku). Samotný tisk pak probíhá zcela automaticky a zpravidla nevyžaduje zásah operátora.

Poslední operace je *post processing*, kdy se odstraní zbytky materiálu, podpěrné struktury a provedou se kosmetické úpravy. Případné *dokončovací práce* nejsou součástí post-processingu a nepatří do obecného popisu procesu aditivní výroby, nicméně v dalším textu dokončovací práce budeme uvažovat.

2.7 Náklady podniku

Náklady podniku se dají pojmut z manažerského hlediska nebo z hlediska finančního účetnictví. Účetní hledisko popisuje náklady jako peněžně vyjádřené snížení vlastního kapitálu. Z manažerského hlediska náklady představují spotřebu hodnoty, která souvisí s provozovanou činností (lze zjistit příčinu jejich vzniku). Pro účely této práce se omezíme na manažerské pojetí výrobních nákladů. [18]

Základními nákladovými druhy jsou (*druhovému třídění nákladů*) [19]:

- spotřeba surovin a materiálu
- odpisy majetku
- mzdové a ostatní osobní náklady (mzdy, sociální a zdravotní pojištění a jiné)
- finanční náklady (pojistné, poplatky a jiné)
- náklady na externí služby

Pro účely této práce se soustředíme na spotřební náklady a mzdové. Jiné kategorie nesouvisí přímo s výrobní metodou, resp. budeme předpokládat, že jsou nezávislé na metodě výroby.

Dále se soustředíme především na *explicitní náklady*, jedna se o skutečně zaplacené náklady v peněžních prostředcích. *Implicitní náklady* budeme uvažovat souhrnně jako cenu času prostoje.

2.7.1 Kalkulace nákladů

Zjišťování nákladů na přesně stanovenou jednotku nákladů se nazývá *kalkulace*. Kalkulace, jako zdroj podpůrných informací, bude sloužit k posouzení výhod použití každé metody výroby a posléze jako podklad pro manažerská rozhodnutí v dané otázce.

Existuje více metod a přístupů pro kalkulaci nákladů. V dané situaci hledáme přístup, který dostatečně přesně popíše celkové náklady na výrobu součástky a zároveň dokáže odhalit problematická místa použité technologie.

Kalkulace plných nákladů

Kalkulace plných nákladů (absorpční kalkulace) vyjadřuje poměr všech spotřebovaných zdrojů v přepočtu na kalkulační jednotku (tradiční přístup). Je zejména vhodná pro statické zobrazení kalkulované veličiny (v případě že nedochází ke změnám v objemu výroby, nebo sortimentu). Nevýhodou je neschopnost poskytovat informace o objemu a struktuře operací. Nezajistí ani dostatečně podrobné informace v při rozhodování o variantách výrobku. Jinými slovy, tradiční metoda není schopna poskytnout relevantní informace pro rychle rostoucí diverzifikované portfolio výroby.

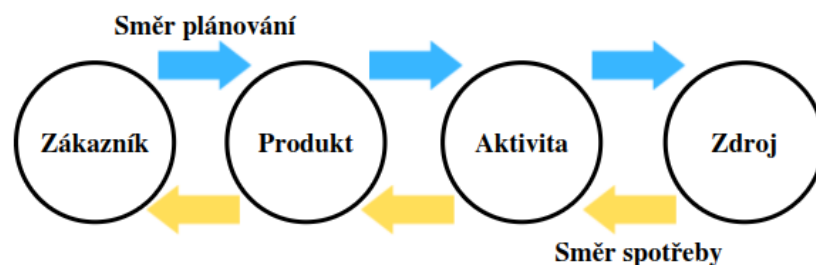
Metoda ABC

Omezení tradičního přístupu vedly ke vzniku metody, založené na kalkulaci nákladů dílčích aktivit - *ABC (Activity Based Costing)*. Metoda klade větší důraz na příčiny vzniku nákladů (množství výroby už není hlavní příčinou růstu nákladů). [20]

Aktivita je fundamentální prvek procesu. Je to činnost, kterou je potřeba vykonat, aby vznikl nákladový objekt (výrobek) - např. frézování, kontrola kvality atd. Za *Cost driver* se pak považuje příčina spotřeby zdroje aktivitou. [20]

Proces je sekvence aktivit. Metoda předpokládá větší ustálenost procesu výroby oproti rychle se měnícím požadavkům na výrobek. Výrobek může mít i relativně krátkou periodu výroby, během které jsou výrobní procesy více méně stejné (je to obzvláště aktuální v podmínkách výroby pro údržby). Další výhodou je možnost alokace fixních nákladů - přiřazení jistého fixního nákladu určitému nákladovému objektu a možnost kalkulace vícero nákladových objektů najednou (např. náklady na jednotlivé části procesu). [20]

Zdroje jsou základní výrobní faktory konzumované při výkonu aktivit, přičemž spotřeba zdroje představuje vznik nákladů. Výstupem modelu ABS je *Nákladový objekt*, přičemž může jít jak o klasický produkt (výrobek), tak o zákazníka, dodavatele a pod. Na tento nákladový objekt je pak možné alokovat náklady. [20]



Obr. 5: Schématické zobrazení metody kalkulace ABC [20].

Základní myšlenku metody ABC lze vyjádřit pomocí jednoduchého schématu na obr. 5. Zákazníci vyžadují produkty a služby, tyto produkty a služby spotřebovávají aktivity, aktivity spotřebovávají zdroje.

2.7.2 Přehled současného stavu poznání

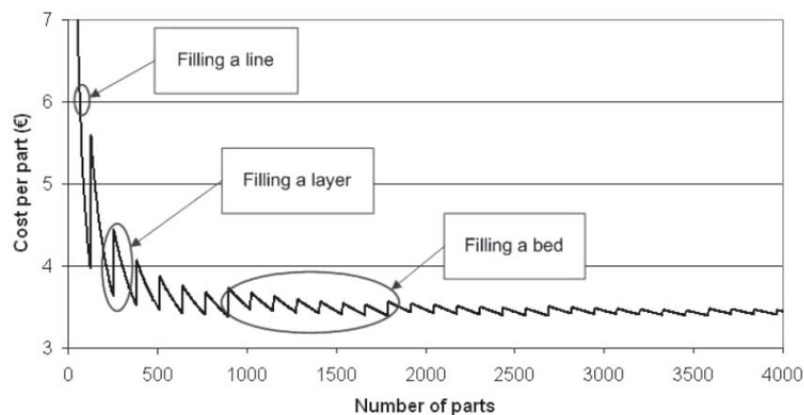
Přehled literatury která se zabývá návrhem a analýzou nákladových modelů pro aditivní výrobu byl v roce 2016 zpracován v Itálii autory G. Costabilea, M. Ferab, F. Fruggieroc, A. Lambiasea a D. Pham. Zde budou stručně popsány vybrané práce, uvedené ve zmíněné rešerši. Z celkového počtu cca 3000 prací věnovaných AM se analýzou nákladů zabývají přibližně 4% z nich. [21]

Hopkinson and Dicknes (2003) byli jedněmi z prvních, kdo realizoval analýzu nákladů na aditivní výrobu. Byly porovnány konvenční metody výroby (vstřikování plastu) s aditivními (stereolithography, fused deposition modelling and laser sintering). Ukázalo se že existují případy geometrií, pro které je AM výhodnější jen do jistého počtu výrobků. Náklady byly rozděleny na cenu stroje za hodinu, cenu práce za hodinu a cenu materiálu, přičemž součet činí celkové náklady.

V roce 2006 Ruffo et al. vylepšili model navržený Hopkinsonem and Dicknesem rozdělením nákladů na přímé (*direct*) a nepřímé (*indirect*). Výsledkem je nový graf závislosti

ceny dílu na množství (obr. 6) a odhalení nepřesností předchozích modelů. Z grafu je patrné, že se cena ustálí po dosažení určitého množství výrobků a klesá s rostoucím počtem dílů.

Baumers et al. v roce 2012 použili model založený na metodě ABC (podobně jako Ruffo et al.) a zahrnuli do něj také energetické náklady na provoz tiskáren. Lindemann et al. pak ve stejném roce do modelu zahrnuli i aktivity post-processingu. V následujícím roce se Rickenbacher et al. (2013) se zaměřili na hlubokou analýzu procesu výroby a nákladů na výrobu jednoho kusu. Navíc byl vypracován algoritmus pro výpočet doby tisku pro každý díl zastavby. V roce 2015 se pak Schröder et al. věnovali vývoji business modelu s použitím metody ABC pro kalkulaci nákladů.



Obr. 6: Závislost ceny dílu na vyráběném množství podle Ruffo et al. [21]

Do práce byl převzat přístup pro definici nákladového modelu, výrobní postup a rozložení na aktivity. Přesnost vytvořených modelů nevyžaduje podrobné zkoumání každé aktivity a energetických nákladů.

2.7.3 Definice nákladového modelu

Nejdříve identifikujeme významné aktivity a procesy, které ve zkoumaném podniku probíhají. Dalším krokem je identifikace zdrojů a přiřazení jednotlivých aktivit těmto zdrojům, definujeme cost drivery a nákladové objekty. Závěrečnou etapou bude alokace procesních nákladů na nákladové objekty, tak aby bylo provedeno ocenění nákladových objektů.

Je důležité podotknout, že modelování a hodnocení mohou být realizovány na určité úrovni přesnosti, definované při aplikaci metody. Pro účely dané práce není vyžadován detailně propracovaný model nákladů. Zajímá nás především rozdíl nákladů při použití dvou technologií, tudíž drobné aktivity se jednoduše ztratí při porovnání. Není například podstatné, že např. vytažení dílu ze stroje po třískovém obrábění zabírá určitý čas, ale je podstatné zda použití aditivních metod oproti konvenčnímu obrábění trvá obecně kratší nebo delší dobu.

Zvolíme li jako nákladový objekt vyráběný díl, celkové náklady C [CZK] se pak počítají jako součet nákladů dílčích n aktivit a materiálu podle (1). Vzorec platí za předpokladu použití hodnot stanovených pro jeden díl. Pro větší množství dílů je třeba

stanovit každou hodnotu pro potřebné množství a vydělit výslednou hodnotu celkovým počtem dílů.

$$C = M + \sum_{i=1}^n A_i \cdot D_i \quad (1)$$

Kde

- M - cena materiálu [CZK],
- A_i - objem i -té aktivity [h],
- D_i - cost driver (cena) i -té aktivity [CZK/h] resp. [CZK/ks].

3 PRAKTICKÁ ČÁST

K dosažení stanovených cílů je potřeba navrhnout a implementovat analýzu nákladů výrobce (vypracovat nákladové modely), která prokáže výhody (resp. nevýhody) použití dané technologie výroby. Součástí řešení je vymezení okruhu dílů se kterými pracuje oddělení údržby a které jsou vhodné pro aditivní výrobu. Návrh modelů byl inspirován předchozími výzkumy v oblasti analýzy nákladů na aditivní výrobu.

3.1 Klasifikace problému práce

Výroba dílů pro oddělení údržby pomocí metod AM sama o sobě spadá do kategorie rapid manufacturing, do podkategorie direct manufacturing a direct tooling zároveň (ze zadání neplynou žádná omezení na díly, které máme zkoumat). Z ekonomického hlediska jde o analýzu nákladů výrobce a efektivity výroby cestou sestavení modelu nákladů a sběrem potřebných dat.

3.2 Ekonomická výhoda

Ekonomickou výhodou použití 3D tisku tvoří úspory ve smyslu času (člověka, stroje nebo času prostoje), materiálu nebo využití jinak ztracených možností.

Úsporou materiálu se rozumí snížení množství použitého materiálu a zbylého materiálu, který nelze opakovaně použít (tzv. odpad). Ve smyslu dané práce tato výhoda bude uvažována povrchově - k hlubší analýze chybí potřebná data.

Úsporou času budeme rozumět krátkodobé a dlouhodobé snížení času přípravy k výrobě, výroby samotné a dokončovacích prací. Konvenční výroba je roztažená jak v čase, tak i v prostoru, protože různé operace se vykonávají na různých místech a často různými pracovníky, přičemž prodlevy mezi operacemi mohou trvat i celé dny. Tím vznikají přímé ztráty - narůstá doba dodání výrobku, zvětšují se prostoje linky (v případě reaktivní údržby). Aditivní výroba zde nemá bezpodmínečné výhody, vzhledem k tomu že vyžaduje dokončovací práce. Nicméně, počet potřebných kroků se značně redukuje a celá výroba probíhá na jednom místě, bez změny stroje, nástrojů a pracovníků. Proces může běžet v noci a zpravidla nevyžaduje dohled. Modely pro 3D tisk lze používat opakovaně, čímž se opět redukuje čas přípravy při opakovaném tisku.

Ztracené možnosti úzce souvisí s úsporou času a uvolněním kvalifikovaného personálu pro efektivnější účely. Aditivní výroba oproti konvenční výrobě nevyžaduje přímé zásahy operátora do procesu tisku. Stejně tak u operátora nejsou vyžadovány ani zvláštní znalosti a schopnosti, tudíž je možné delegovat výrobu méně honorovaným pracovníkům.

3.3 Hypotéza

Ekonomická výhoda vznikne:

1. Snížením celkových nákladů na výrobu jednoho dílu (důsledek snížení ceny práce, zahrnuté do ceny výrobku)
2. Snížením doby prostoje (důsledek snížení doby výroby a dodání dílu)

Ekonomická výhoda se více projeví při opakovaném tisku stejného dílu nebo dílu s minimálními úpravami. Větší šance na dosažení ekonomické výhody je také u dílů s komplikovanou geometrií, která u 3D tisku nepředstavuje významný problém. Za průkazné pro danou třídu výrobků budeme považovat prokázání výhody u vybraných reprezentantů.

3.4 Předpoklady

Předpokládáme, že během výroby nevznikají zmetky a každý díl se vyrábí zvlášť. U aditivní výroby budeme uvažovat dokončovací práce a předpokládáme totožnost mechanických vlastností dílů s konvenční výrobou (jinými slovy, zanedbáváme mechanické vlastnosti, které by měly být předmětem samostatného zkoumání).

Z podstaty práce není požadováno velké rozlišení při měření času procesů a ani velká přesnost, proto budeme počítat se zvětšenou tolerancí při časovém hodnocení procesů. Vzhledem k obtížnosti měření některých časových údajů povolíme profesionální odhady na základě [20].

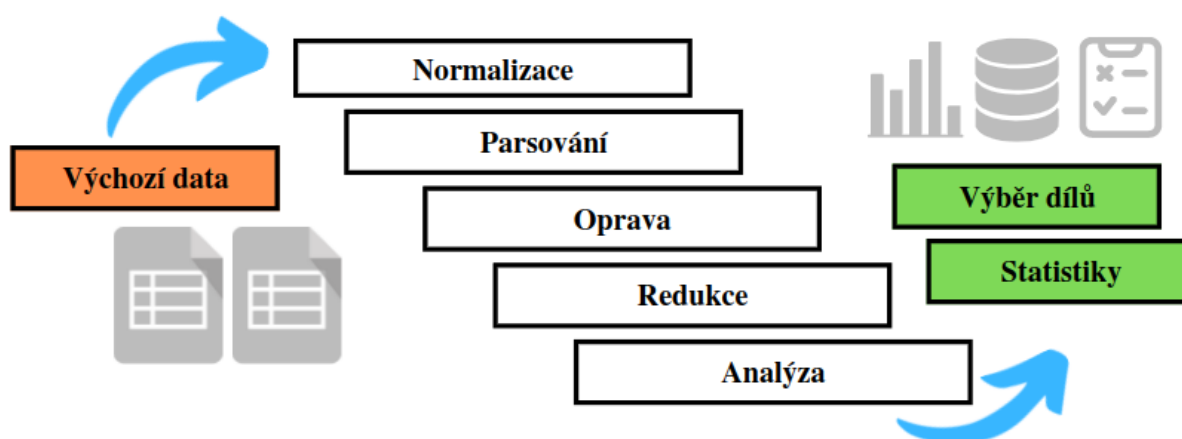
V průběhu práce bude zaveden předpoklad vůči obsahu objednávky v poskytnutých souborech - na množství uvedeném v objednávce nezáleží (viz. Výběr dílů).

3.5 Obecný popis řešení

1. **Analýza dat.** Na základě poskytnutých dat (seznam objednávek z dílny) od společnosti Siemens bude provedena analýza výskytu výrobku v objednávkách. Výsledkem této analýzy bude tabulka, seřazená dle počtu výskytu dílů které se vyráběly, včetně zdrojových textů objednávek.
2. **Vymezení okruhů dílů.** Na základě získaných údajů bude společně s vedením projektu provedena redukce délky seznamu dílů vhodných pro tisk. Během návštěvy závodu budou vybrány určité skupiny dílů, se kterými dále budeme pracovat a reprezentanti z těchto skupin.
3. **Nákladové modely.** Je potřeba vypracovat interaktivní nákladové modely podle metody ABC k aditivní výrobě a konvenční výrobě.
4. **Sběr dat.** Je potřeba vytvořit 3D CAD modely zvolených dílů, vyhodnotit aditivní a konvenční výrobu podle nákladových modelů. Chybějící data budou vyžadovat buď měření a nebo profesionální odhad.
5. **Interpretace výsledků.** Popis dosažených výsledků a jejich interpretace z hlediska hypotézy a cílů práce.

3.6 Analýza dat

Hlavním objektem zkoumání zde jsou údaje, poskytnuté společností Siemens za účelem sestavení představy o počtu výskytu výrobků mezi objednávkou na dílnu a vymezení okruhu výrobků, vhodných pro 3D tisk. Schéma na obr. 7 popisuje hlavní stupně analýzy, které byly implementovány v programovacím jazyce Python.



Obr. 7: Schéma analýzy dat.

3.6.1 Popis dat

Za účelem analýzy statistických údajů zadavatel poskytl 2 dokumenty ve formátu Microsoft Excel, obsahující záznamy o objednávkách na dílnu od roku 2007, přičemž objednávkou se rozumí jeden řádek v tabulce. Záznam o objednávce není omezen na počet a druh dílů, její obsah nebyl nijak standardizován. Každý soubor byl vyplněn ručně a obecně obsahuje následující údaje (zbytečné a utajované detaily zde nebudou uváděny):

- Datum přijetí objednávky (nestandardní formát, přesnost na den)
- Datum splnění objednávky (nestandardní formát, přesnost na den)
- Text objednávky (bez formátu, obsahuje nepovinný počet objednaných dílů, časté chyby a zkratky)
- Záznam o normohodinách práce strávených na objednávce (číslo, hodiny)

První soubor (*objednávky údržby*, necelých 2000 záznamů) obsahoval objednávky z oddělení údržby na dílnu, druhý (*všechny objednávky*, cca 6000 záznamů) všechny objednávky které v daném období vyráběla dílna. Objednávky z údržby jsou obsaženy mezi všemi objednávkami, jsou tedy jejich podmnožinou. Záznam objednávek z údržby obsahuje více informací o objednávce. Záznam všech objednávek obsahuje zkrácený text objednávky.

Tab. 1 obsahuje statistické údaje o obdržených souborech. Tab. 2, 3 obsahují příklady dat pro lepší představu objektu analýzy.

Tab. 1: Údaje o výchozích datech.

	Začátek	Konec	Dní (celkem)	Zaznamy
Všechny objednávky	2007.05.15	2021.12.1	2090	5929
Objednávky údržby	2020.1.6	2021.12.3	438	1835

Tab. 2: Příklad výchozích dat, všechny objednávky (upraveno v souladu s NDA).

Datum přijetí	Datum dokončení	Text	Normohodiny
27.3. ¹	27.3.	Úprava krytu 2ks.	1h
29.3.	30.3.	oprava závitu 1+1ks	0,5

Tab. 3: Příklad výchozích dat, objednávky údržby (upraveno v souladu s NDA).

Datum přijetí	Datum dokončení	Text	Práce [Nh]
17.01.2020	28.02.2020	Naváděcí trn XYZ, 2ks	3
9.1.2020	7.2.2020	Krytky vinutí proti šponám na upínací trn dle přílohy XYZ	2

3.6.2 Normalizace

Soubory nebyly v původním stavu vhodné pro žádnou formu analýzy a vyžadoval normalizaci. Normalizací se upravil formát dat, byly vyřazeny prázdné řádky, sjednotil se formát pro zaznamenaný čas, data atd. Normalizace byla provedena s pomocí programovacího jazyka Python.

Tab. 4: Příklad normalizace.

Originál	27.3.	Úprava krytu 2ks.	1h
Normalizováno	2007-3-27	úprava krytu ²	1,0

3.6.3 Analýza

Cílem analýzy je vymezit skupiny dílů, které se vyskytují v záznamech dílny a zjistit, jak často se tam objevují. Vzhledem k nutnosti analýzy nestrukturovaného textu byl zvolen následující přístup: Z každého záznamu byly vytaženy podstatná jména a slovesa, které byly následně převedeny do základního tvaru. Dále byly vyřazeny záznamy nepředstavující výrobní činnost, tj. neobsahující specifická slovesa “vyrobit”, “opravit”, “upravit”, přičemž záznamy neobsahující žádné sloveso naopak byly považovány za “výrobní”. Pro každé zbylé

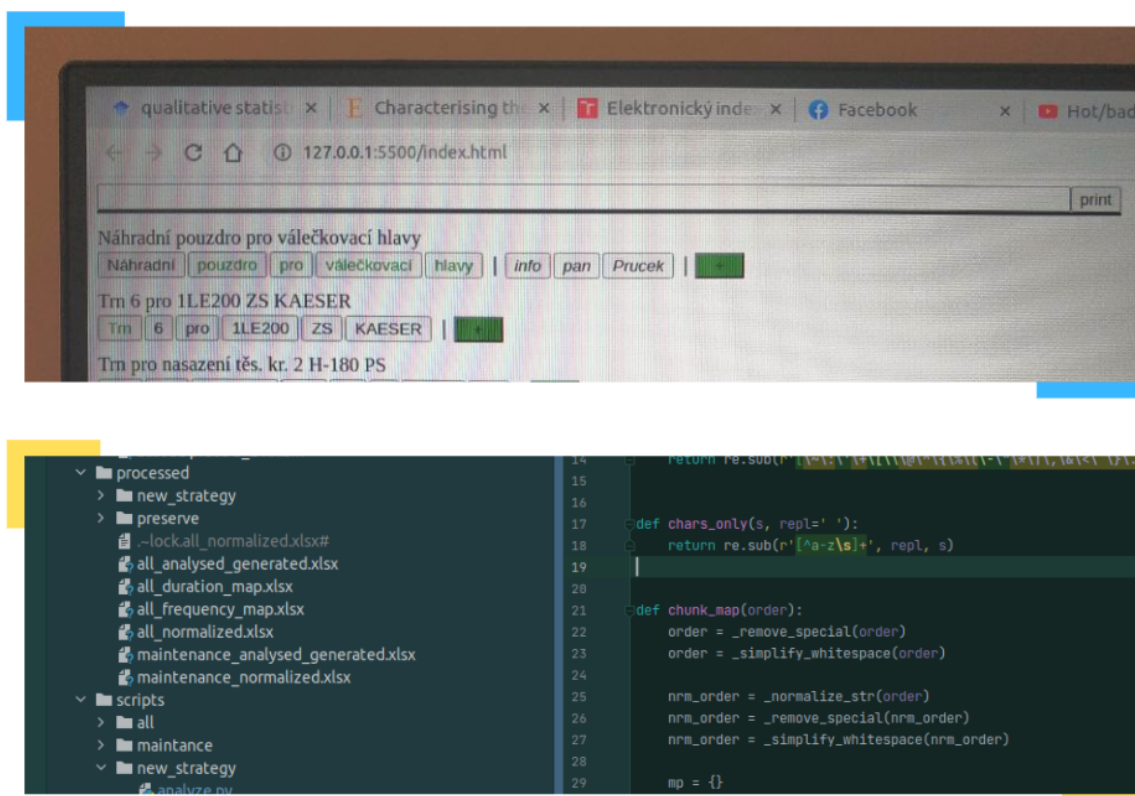
¹ Rok se zpravidla uvedl jednou na začátku skupiny záznamů.

² Informace o kusech byly odstraněny na základě předpokladů.

slovo byl spočítán počet výskytů. Například z normalizovaného záznamu *úprava krytu 2ks* vystupují následující čistá data: jedno sloveso *upravit* a jedno podstatné jméno *kryt*. Do počtu výskytů slova *kryt* bude tedy přičten jeden výskyt, výskyt sloves už se dále nepočítá.

Původně byla přijata jiná strategie parsování dat, podle které se měl každý záznam rozdělit na akci a objekt akce, nicméně tento postup byl opuštěn z důvodu nízké spolehlivosti vyhodnocení co je objekt akce (nejednoznačnost hodnocení).

Tento krok byl primárně realizován pomocí jazyka Python a *regulárních výrazů*. Ze své podstaty analýza nevyžadovala nasazení speciálních nástrojů, které by umožňovaly obnovení a doplnění dat. Návrh lepšího systému sběru dat by měl pro společnost jistě smysl do budoucna, nicméně pro jednorázové zpracování 15 let existujících dat by se nejednalo o použitelný přístup. V rámci ladění a testování tak byly vytvořeny jednoúčelové nástroje, které usnadňovaly operativní práci s textem a třídění slov (konzolové aplikace, Web GUI a jiné), viz obr. 8.



Obr. 8: Nástroje pro analýzu. Web GUI (třídění slov) a Python skripty.

3.6.4 Výsledky

Výsledkem předchozích kroků jsou 2 databázové tabulky, jedna z každého poskytnutého souboru. Každá tabulka obsahuje:

- Podstatné jméno (které je zároveň odkaz na všechny záznamy, kde se vyskytuje)
- Počet výskytů v celém dokumentu
- Zatržítka (checkbox), který slouží k výběru záznamu pro následující kroky

Obr. 9 ukazuje příklad takové tabulky pro všechny objednávky. Řádky jsou seříděny podle počtu výskytů a podle *přijetí ve výběrovém řízení* (viz. kapitola Výběr dílů). Každé slovo reprezentuje skupinu výrobků (např. *klíč* - nejedná se o nějaký konkrétní klíč, nýbrž o klíče obecně). Dále budeme řádku (slovu z těchto tabulek) říkat *skupina dílů*.

redukce	48	<input checked="" type="checkbox"/>	Výroba pláště 1ks
táhlo	47	<input checked="" type="checkbox"/>	Výroba pláště 1ks
segment	32	<input checked="" type="checkbox"/>	Výroba přípravku-pláště
rameno	31	<input checked="" type="checkbox"/>	Úprava pláštů 2ks, 1LE90-6, L=118,7
kontakt	21	<input checked="" type="checkbox"/>	plast.čočka 4ks
příruba	20	<input checked="" type="checkbox"/>	Výroba pláště cívky
klíč	14	<input checked="" type="checkbox"/>	Plášt cívky 2ks
plášť	12	<input checked="" type="checkbox"/>	pláště cívky 4ks
zarážka	9	<input checked="" type="checkbox"/>	plášt cívky 1ks
příchytka	8	<input checked="" type="checkbox"/>	plášt cívky 2ks
hřídel	302	<input type="checkbox"/>	plášt cívky 2ks
podložka	248	<input type="checkbox"/>	
rotor	242	<input type="checkbox"/>	
kostra	227	<input type="checkbox"/>	
čep	213	<input type="checkbox"/>	

Obr. 9: Příklad výsledné tabulky (všechny objednávky).

Největší problém činil objem dat a jejich nekonzistentnost. Nebyl nalezen jednoduchý a účinný způsob třídění textu podle popsanych pravidel. Práce s analýzou dat zabrala cca dva měsíce (od obdržení po dokončení tabulek LibreOffice Base, obdoba MS Access) a hodnota získaných údajů ve výsledku nebyla pro práci důležitá na té úrovni, na které se to předpokládalo na začátku (resp. objem odvedené práce neodpovídá hodnotě získaných údajů).

3.7 Výběr dílů

Další fázi projektu představoval výběr skupin dílů vhodných pro 3D tisk. Pro vyhodnocení se udělalo důležité rozhodnutí – zavedl se předpoklad, že na množství uvedeném v záznamu nezáleží. Jinými slovy, více perspektivní pro nahrazení 3D tiskem je předmět, který se vyrábí častěji i v malém množství, než ten který se vyrábí jen občas a ve velkém množství. Tento předpoklad se vztahuje k myšlence opakovaného využití vytvořených 3D modelů a je zásadní také z hlediska spolehlivosti analýzy, protože u řady záznamů zcela chyběly údaje o vyrobeném množství, což ještě víc rozostřuje už tak nepřilíš kvalitní zdrojová data.

3.7.1 Spolupráce se společností Siemens s.r.o.

Spolupráce se společností probíhala z důvodů karanténních opatření dvěma formami, distančně pomocí Microsoft Teams a pak při osobním setkání na půdě závodu v Mohelnici. Rozhodnutí přijatá v této fázi probíhaly ve spolupráci s projektovým manažerem Michalem Průšou a pod profesionálním dohledem pana Lubomíra Šulce z oddělení údržby.

3.7.2 Výběrové řízení

Nejprve byla na základě dohody se zadavatelem stanovena minimální prahová hranice pro výskyt skupiny na cca 10 výskytů, čímž byl značně zredukován počet relevantních záznamů. Z několika tisíc tak zůstalo jen 155 skupin dílů ze dvou souborů, u kterých bylo při konzultaci se zadavatelem provedeno odborné posouzení daných skupin výrobků (“výběrové řízení”, provedené interaktivně pomocí zatržitek v databázovém formuláři). Výsledkem uvedeného hodnocení byl výrazně zredukovaný soubor 35 skupin dílů, které oddělení údržby skutečně nechávalo často vyrábět a zároveň splňují technologické předpoklady pro náhradu 3D tiskem.

Seznam vhodných dílů tak obsahoval objekty jako: *spojka, redukce, táhlo, segment, rameno, kontakt, příruba, klíč, plášť, zarážka, příchytka, přípravek, vložka, deska, krytka, čelist, kleština, držák, měrka, podložka, střížník, dílec (díl), kryt, doraz, víko, pouzdro, lišta, narážka, nástavec, zátka, ručka, upínka, opěrka, podpěra.*

Důvody k “diskvalifikaci” skupin dílů byly různé, primárně se jednalo výrobky s vysokými požadavky na kvalitu povrchu a fyzikálně-teplotní vlastnosti, s přísnými rozměrovými tolerancemi, vyvážené rotační díly (např. hřídele) a výrobky ze specifického materiálu (např. bronzu). Zamítnuty byly také sériově vyráběné a snadno dostupné výrobky typu kroužek, matice, šroub a jiné.

Detailní výběr reprezentantů pak probíhal při osobní návštěvě závodu v Mohelnici, jelikož tato fáze spolupráce už vyžadovala intenzivnější kontakt. Jako první bylo nutné omezit počet skupin a zvolit preferované výrobky. Z celkem 35 skupin byly po konzultaci stanoveny 4 (viz následující ukázka). Dle výkresové dokumentace pak byly identifikovány také díly s nejsložitější geometrií, která je jednou z preferovaných indikací pro 3D tisk.

Skupina: příchytka

Výkresy: M331-428-PRICHYTKA, M331-494-PRICHYTKA, M331-496-PRICHYTKA

Statistické údaje (z dat pro celou výrobu):

- Doba výroby (pouze práce mechanika) [h]
 - průměrná délka 5.263 +- 7.353,
 - modus 1,
 - kvantily [1.0, 1.5, 11.9]
- Doba vyřízení objednávky byla zamítnuta jako statistický údaj z důvodu nízké přesnosti dat (na den)

Skupina: držák

Výkresy: M311-399-DRZAK, M311-400-DRZAK, M331-577-DRZAK

Statistické údaje (z dat pro celou výrobu):

- Doba výroby (pouze práce mechanika) [h]
 - průměrná délka 3.958 +- 4.519,
 - modus 1,
 - kvantily [1.15, 2.5, 4.9625]

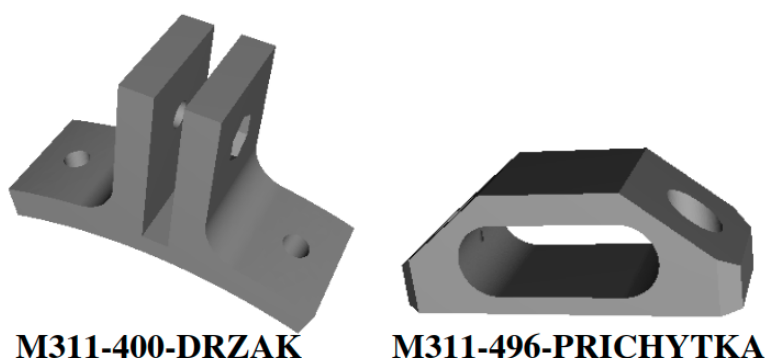
- Doba vyřízení objednávky byla zamítnuta jako statistický údaj z důvodu nízké přesnosti dat (na den)

Skupina: Plášť, 3 kusy (hodnocení bude provedeno mimo danou práci)

Skupina: Klíč, 3 kusy (hodnocení bude provedeno mimo danou práci)

Objednávky obecně obsahují různé množství dílů, průměrné hodnoty tak mají značné odchylky a nejsou vhodné pro posouzení “běžných” objednávek. Proto bude pro hodnocení časových nákladů použita hodnota modu, přičemž tento čas (doba výroby) zahrnuje nejen samotné obrábění dílu, ale i seřizování stroje a další operace.

Do každé skupiny jsme vybrali 3 díly jako reprezentanty (na obr. 10 jsou zobrazeny příklady dílů pro představu). Zde už se počítá s následným průměrováním naměřených časových hodnot, aby byly použitelné pro celou skupinu. Plast a kov odpovídají materiálu tisku, přičemž po dohodě se zadavatelem bylo posouzení kovových součástí z časových důvodů odloženo mimo práci.



Obr. 10: Příklad dílů ze skupin držáků a přichytek (STL modely).

3.8 Nákladové modely

Zde a dále budou postupně teoreticky definovány nákladové modely pro výpočet nákladů podle metody ABC pro zvolené technologie výroby.

3.8.1 Zdroje firmy

Zdroje jsou společné pro obě metody výroby a předpokládáme, že zdroje jsou neomezené. Zdroj je definován v jednotkách, přístupných pro měření s uvedením ceny pro účely zapojení finančních nákladů.

- **Materiál [ks, cm³], cena materiálu [CZK/ks, CZK/cm³]** – celkové množství materiálu, odebraného ze zásob k výrobě dílu, včetně odpadu. Pro porovnání ceny výrobku z různých materiálů je třeba uvažovat celkovou cenu materiálu (vybrané výrobky připouští použití různých materiálů).
- **Práce [h], cena práce [CZK/h]** – součet dílčích prací (popř. prací různých lidí). Čas, který musí člověk strávit konáním aktivit pro vznik výrobku.

- **Čas stroje [h], cena času stroje [CZK/h]** – čas, který stroje byly obsazen, včetně času seřízení a úklidu.
- **Čas prostoje [h], cena času prostoje [CZK/h]** – abstraktní pomocný zdroj firmy, který pomáhá spočítat implicitní ztráty. Cena času prostoje se rovná ceně prostoje linky, strojů, lidí, co čekají na díl. V této práci čas prostoje bude vypočítán jako *ideální čas prostoje* – čas od vzniku požadavku na výrobek až po jeho uvedení do provozu.

3.8.2 Konvenční výroba

Proces - výroba dílů především frézováním. Pro úplnost budeme do procesu výroby zahrnovat i návrh a dokončovací operace.

Aktivity (odpovídají výrobnímu postupu)

1. **Vypracování výkresové dokumentace** – první krok v procesu výroby. Díl se navrhne, změří se potřebné rozměry a vytvoří se výkres.
2. **Vypracování výrobních podkladů** – aktivita je závislá na operacích potřebných k výrobě dílu. Zahrnuje vytváření doplňkových (díličích) výkresů, tvorbu programů pro CNC a jiné.
3. **Seřízení strojů** – zahrnuje nastavení a přípravu potřebných strojů (včetně automatických kontrol, *self testing*), nahrávání programů, uklid stroje atd. . .
4. **Spotřeba materiálu** – materiál se spotřebuje v okamžiku, kdy bude odebrán ze zásob.
5. **Obrábění** – hlavní aktivita v modelu nákladů konvenční výroby. Reprezentuje soubor operací, potřebných k výrobě dílu. Výsledkem aktivity je polotovár, vhodný k provedení dokončovacích prací.
6. **Dokončovací práce** - odjehlení a finální úpravy dílu dle požadavků technologa.
7. **Prostoj** – pomocná aktivita, která pomáhá alokovat čas prostoje. Náklady plynou z faktu, že díl nemůže být používán pro svoje přímé účely.

Tab. 5: Přiřazení aktivit zdrojům, hodinové sazby (nemusí odpovídat skutečným hodnotám).

Zdroj	Aktivity	Cost drivers	Základní sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra [h]	0 [CZK/h]
	Vypracování výrobních podkladů	Práce technologa [h]	0 [CZK/h]
	Seřízení strojů	Práce mechanika [h]	650 [CZK/h]
	Obrábění		
	Dokončovací práce		
Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje [h]	0 [CZK/h]
	Obrábění		
Materiál	Spotřeba materiálu	Množství dílů [ks]	60 [CZK/ks]
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl [h]	0 [CZK/h]

Sestavíme tabulku v obecném tvaru a přiřadíme aktivity ke zdrojům (tab. 5). Cena zdroje byla uvedena pro *základní cenu* dílu (model a tato cena dílu by měla odpovídat ceně, kterou stanoví Siemens jako cenu dílu). Cena práce konstruktéra a technologa je zahrnuta do ceny práce mechanika jako *režijní náklady* a činí cca 45%. Ve výsledku společnost platí pouze čas mechanika v dílně a materiál.

Dosazením požadovaných hodnot sazby u jednotlivých aktivit dosáhneme odhadu *skutečné ceny* výrobku (tato cena nemusí odpovídat ceně stanovené společností Siemens).

3.8.3 Aditivní výroba

Proces – výroba dílů podle technologie HP Multi Jet Fusion.

Aktivity (odpovídá pracovnímu postupu)

1. **Vypracování výkresové dokumentace** - je shodná s konvenční metodou.
2. **Vypracování modelů** – tvorba 3D CAD modelu dílu. Zadavatel v současné době nepoužívá digitální prostředky poskytující 3D model přímo z předchozího kroku, modely je proto nutné vytvářet zvlášť.
3. **Seřízení strojů** – zahrnuje nastavení a přípravu 3D tiskárny, zahřívání materiálu, načítání modelů atd.
4. **Spotřeba materiálu** - materiál odebrán ze zásob (okamžitá aktivita).
5. **Tisk** – hlavní aktivita v modelu nákladů aditivní výroby, představující automatickou činnost tiskárny. Výsledkem je výtisk, vhodný k provedení dokončovacích prací.
6. **Dokončovací práce** – činnost zaměřená na úpravu dílu vzniklého 3D tiskem do stavu vhodného k spotřebě. Pro zjednodušení sjednotíme tuto aktivitu s post processingem.
7. **Prostoj** – pomocná aktivita, která pomáhá alokovat čas prostoje. Náklady plynou z faktu, že díl nemůže být používán pro svoje přímé účely.

Tab. 6: Přiřazení aktivit zdrojům, hodinové sazby (nemusí odpovídat skutečným hodnotám).

Zdroj	Aktivity	Cost drivers	Základní sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra [h]	0 [CZK/h]
	Vypracování modelů		
	Seřízení stroje	Práce operátora [h]	650 [CZK/h]
	Dokončovací práce	Práce mechanika [h]	650 [CZK/h]
Čas stroje	Seřízení stroje	Obsazení stroje [h]	0 [CZK/h]
	Tisk		
Materiál	Spotřeba materiálu	Objem dílu [cm ³]	35 [CZK/cm ³]
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl [h]	0 [CZK/h]

3.8.4 Jak pracovat s modely?

Každý model je v podstatě parametr, který reflektuje vliv každého kroku výroby na cenu. Lze porovnávat jak změny uvnitř modelu (například, pokud se změní technologie výroby a

obrábění bude rychlejší, výsledný parametr modelu taky klesne) nebo modely mezi sebou (jak po částech, tak i celkem, podle výsledného parametru buď v hodinách nebo v peněžních jednotkách).

Přidáním aktivit a jejich cost driverů lze zpřesnit modely a dosáhnout plného rozložení ceny výrobku podle aktivit. Model nerespektuje závislost hodnot cost driverů na množství vyráběných dílů, jinými slovy je potřeba dosadit hodnoty ihned pro požadované množství dílů. Nebylo například stanoveno jak se mění množství práce v závislosti na množství výrobků, proto uvažujeme-li N výrobků, je potřeba změřit a dosadit hodnoty pro N výrobků a nestačí jednoduše vynásobit práci potřebnou k produkci jednoho kusu.

Pro implementaci modelů byla z důvodů preference zadavatelem zvolena platforma Microsoft Excel, kde byla implementována tabulka pro výpočet ceny dílu dle (1).

3.9 Sběr dat

Metoda kalkulace nákladů podle prováděných operací potřebných k výrobě předpokládá znalost doby trvání každé operace. Vzhledem k tomu, že společnost Siemens takto striktní přístup běžně nepoužívá, nejsou nám známe ani potřebné délky konaných činností (resp. tyto údaje se nijak organizovaně nesbírají). Nicméně [20] připouští použití *expertního odhadu* pro ocenění aktivit v případech kdy přímé měření času není realizovatelné. V daném případě byly hodnoty primárně odhadovány na základě konzultací s pracovníky údržby a nástrojárny (pan Radek Havránek).

Odhad byl zadavatelem preferován z důvodů náročnosti měření a protože ani z ekonomického hlediska nedávalo smysl nechat vyrobit různě velké série speciálních dílů konvenční metodou, jen kvůli přesnému zjištění průměrného času potřebného na výrobu v daném množství. Přímé měření bylo naopak použito ke zjištění času tvorby modelů, přičemž měření bylo provedeno během tvorby modelů pro účely 3D tisku. Předpokládaná doba tisku pak byla stanovena přímo, na základě vygenerovaných NC výstupů ze slicingové aplikace tiskárny HP - obr. 12 (orientace dílů byly zvoleny na základě zkušeností).

Na obr. 11 je implementace základního modelu ceny v Excel. Pro aditivní výrobu dodavatel udává i násobně nižší ceny, protože v řadě případů se z důvodů časových a prostorových optimalizací výrobek netiskne sám, ale společně s dalšími výrobky.

Konvenční výroba			M311-399-DRZAK		M311-400-DRZAK		M331-577-DRZAK		
Zdroj	Aktivita	Cost driver	Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	0	1,5	0	1,5	0	0
	Vypracování výrobních podkladů	Práce technologa	1,5	0	1,5	0	1,5	0	0
	Seřízení strojů	Práce mechanika	0,5	325	1	650	0,85	552,5	650
	Obrábění	Práce mechanika	0,5	325	0,33	214,5	0,33	214,5	650
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,5	325	0,5	325	650
Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	0,5	0	1	0	0,85	0	0
	Obrábění	Obsazení stroje	0,25	0	5	0	3,5	0	0
Materiál	Spotřeba materiálu	Množství dílů	1	60	1	60	1	60	60
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	4,5	0	4,83	0	4,68	0	0
Celková cena [czk]			1035	czk	1249,5	czk	1152	czk	

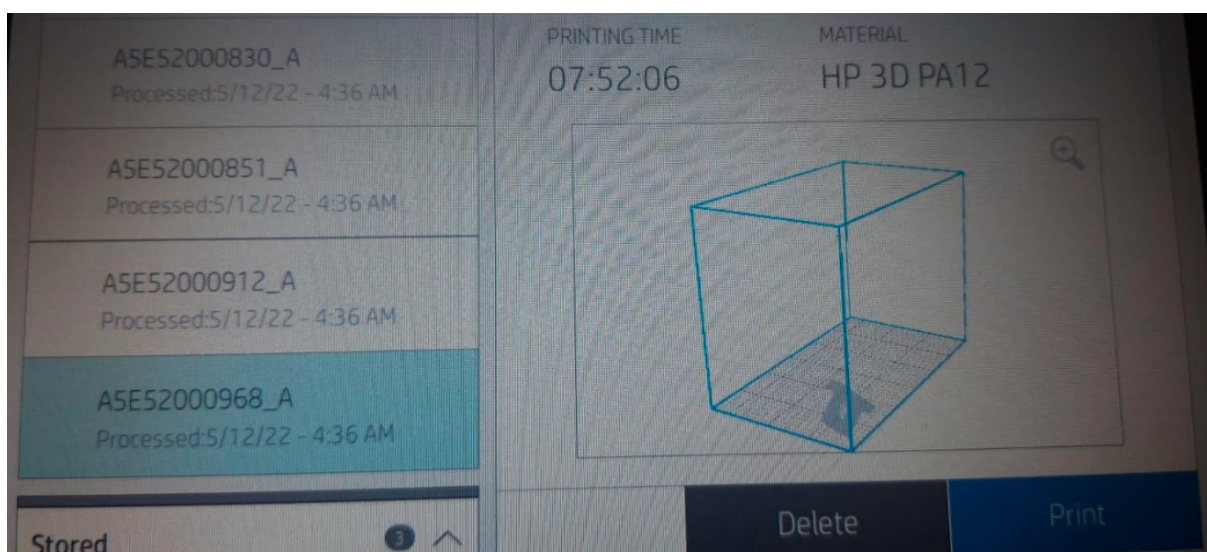
Aditivní výroba			M311-399-DRZAK		M311-400-DRZAK		M331-577-DRZAK		
Zdroj	Aktivita	Cost driver	Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	0	1,5	0	1,5	0	0
	Vypracování modelů	Práce konstruktéra	0,25	0	0,25	0	0,15	0	0
	Seřízení strojů	Práce operátora	1,5	975	1,5	975	1,5	975	650
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,33	214,5	0,33	214,5	650
	Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	1,5	0	1,5	0	1,5	0
	Tisk	Obsazení stroje	7,63	0	8,16	0	7,86	0	0
Materiál	Spotřeba materiálu	Objem výrobku	12	420	35	1225	32	1120	35
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	19,38	0	19,74	0	19,34	0	0
Celková cena [czk]			1720	czk	2414,5	czk	2309,5	czk	

Obr. 11: Základní model ceny, včetně doby vychladnutí výrobků - 8h.

Konvenční výroba			M331-494-PRICHYTKA		M331-496-PRICHYTKA		M331-428-PRICHYTKA		
Zdroj	Aktivita		Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	0	1,5	0	1,5	0	0
	Vypracování výrobních podkladů	Práce technologa	1,5	0	1,5	0	1,5	0	0
	Seřízení strojů	Práce mechanika	0,5	325	1	650	0,85	552,5	650
	Obrábění	Práce mechanika	0,25	162,5	0,25	162,5	0,25	162,5	650
Čas stroje	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,5	325	0,5	325	650
	Seřízení strojů	Obsazení stroje	0,5	0	1	0	0,85	0	0
Materiál	Obrábění	Obsazení stroje	0,25	0	0,5	0	0,5	0	0
	Spotřeba materiálu	Množství dílů	1	60	1	60	1	60	60
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	4,25	0	4,75	0	4,6	0	0
Celková cena [czk]			872,5	czk	1197,5	czk	1100	czk	

Aditivní výroba			M331-494-PRICHYTKA		M331-496-PRICHYTKA		M331-428-PRICHYTKA		
Zdroj	Aktivita		Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	0	1,5	0	1,5	0	0
	Vypracování modelů	Práce konstruktéra	0,18	0	0,25	0	0,11	0	0
	Seřízení strojů	Práce operátora	1,5	975	1,5	975	1,5	975	650
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,25	162,5	0,25	162,5	0,25	162,5	650
Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	1,5	0	1,5	0	1,5	0	0
	Tisk	Obsazení stroje	7,38	0	8,63	0	8,35	0	0
Materiál	Spotřeba materiálu	Objem výrobku	6	210	10	350	22	770	35
	Čas prostoje	Prostoj	18,81	0	20,13	0	19,71	0	0
Celková cena [czk]			1347,5	czk	1487,5	czk	1907,5	czk	

Obr. 11: Základní model ceny, včetně doby vychladnutí výrobků - 8h (pokračování).



Obr. 12: Příklad zástavby, náhled v prostředí slicingové aplikace.

4 VÝSLEDKY A DISKUSE

Kapitola je věnována interpretaci dosažených výsledků, vysvětlení nasbíraných dat a analýze možností integrace aditivní výroby do existujících procesů údržby, popř. návrhu podmínek, při kterých taková integrace má ekonomický smysl. Z praktického hlediska jde o příklad práce s nákladovými modely a příklad interpretace výsledků.

4.1 Nalezené skupiny dílů

Nalezené skupiny dílů definují okruhy, kde aplikace 3D tisku je možná již dnes bez dodatečného zkoumání vlivu aditivních metod na mechanické vlastnosti dílu. Ekonomická výhoda musí být dodatečně ověřena dosazením vhodných hodnot do modelu nákladů, stejně jako to bude uděláno pro výš popsané plastové příchytky a držáky.

Zbytek dílů objednávaných oddělením údržby vyžaduje dodatečné zkoumání vlivu aditivní technologie výroby, což nebylo předmětem této práce. Navržený model nákladů lze po úpravách aplikovat i na složitější díly, které vyžadují značné dokončovací práce.

4.2 Předpoklady a zjednodušení

Hodnocení počítá s jistými předpoklady, zejména s tím že každý díl se vyrábí zvlášť a jeho mechanické vlastnosti (pevnost, modul pružnosti, kvalita povrchu atd.) nejsou podstatné. Vypracovaný model nákladů není na těchto předpokladech závislý a lze jej aplikovat na větší počet dílů beze změn. Toto zjednodušení bylo důležité z hlediska identifikace kandidátů a organizace práce, nicméně v budoucí praxi lze i tyto parametry zahrnout do hodnocení.

4.3 Cíle a pokračování práce

Práce se věnuje finančním a časovým výhodám integrace aditivní výroby. Byla vypracována strategie která ověří ekonomickou výhodu v aktuálních podmínkách údržby a zároveň pomáhá identifikovat produkty, u kterých je taková výhoda dosažitelná. Záměrně zatím byly vynechány záležitosti integrace a implementace do výrobního procesu, u kterých se předpokládá další spolupráce. Obdobným způsobem se předpokládá i průzkum požadavků údržby z hlediska mechanických vlastností s hlediska materiálů používaných v aditivní výrobě. Tento navazující výzkum by měl dále rozšířit seznam dílů vhodných pro náhradu.

4.4 Definice podmínek ekonomické výhody

Zde budou namodelovány a popsány různé výrobní strategie a popsán způsob práce s modely. Cena zdroje je zde orientační a má smysl pouze při porovnání dvou metod. Pro nalezení skutečných cen výrobků je potřeba dosadit hodnoty a sazby, které odpovídají realitě.

Z důvodu zachování obchodního tajemství zde skutečné hodnoty nebudou uvedeny. Výsledky jsou platné za předpokladu platnosti dosazených hodnot.

Ukázalo se, že výsledky jsou citlivé k ceně času stroje. V daném případě bude předpokládat, že se součástky vyrábějí konvenční metodou pomocí *NC frézky*. V případě použití jiných strojů je potřeba upravit cenu času stroje. Ceny byly odhadnuty ve spolupráci s Siemens a nemusí odpovídat reálným hodnotám pro závod (odpovídají poměrově vůči sobě, pro porovnání metod je to postačující).

4.4.1 Základní tvar modelů

V základním tvaru (kdy definujeme jenom cenu práce mechaniku a cenu materiálu a schováváme implicitní náklady do této ceny) modely vypadají tak, jak je uvedeno na obr. 11. Je patrné, že při podobném přístupu k stanovení ceny aktivit vzniká ekonomická ztráta při použití aditivní metody, která je způsobená zejména cenou materiálu pro tisk a práci mechanika po seřízení stroje. V tomto případě vidíme, že AM bude mít smysl pouze při výrobě dílů, které vyžadují větší zásah mechanika (třeba jsou tvarově složitější, než např. zmíněný držák).

Hlavní nevýhodou aditivní metody je cena materiálu a delší doba seřízení stroje. Poslední se dá redukovat při současném tisku více dílů. Od základního tvaru modelů ustoupíme a pro ilustraci jednotlivých situací v údržbě navrheme ceny (sazby) dílčích aktivit.

4.4.2 Příklad reaktivní údržby

Případ je charakterizován tím, že největší náklady činí čas prostoje (který je nejdražší složkou nákladů, viz obr. 14, 15). Výzkum ukazuje že časové náklady při použití aditivní metody výroby jsou násobně větší než při použití konvenčních metod, tudíž AM není vhodná pro reaktivní údržbu. Výjimkou z pravidla se mohou stát situace, kdy doba výroby dílu konvenční metodou přesáhne dobu tisku, chladnutí a postprocessingu. V uvedeném případě však není řešením ani nechat chladnutí dílu přes noc, protože doba tisku je sama o sobě delší než doba výroby konvenční metodou.

Na Obr. 13 je model situace reaktivní údržby. V obou skupinách jsou implicitní náklady vzniklé prostojem největší složkou a budou jenom narůstat s nárůstem ceny prostoje.

Konvenční výroba			M311-399-DRZAK		M311-400-DRZAK		M331-577-DRZAK		
Zdroj	Aktivita	Cost driver	Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350	900
	Vypracování výrobních podkladů	Práce technologa	1,5	1275	1,5	1275	1,5	1275	850
	Seřízení strojů	Práce mechanika	0,5	325	1	650	0,85	552,5	650
	Obrábění	Práce mechanika	0,5	325	0,33	214,5	0,33	214,5	650
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,5	325	0,5	325	650
Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	0,5	350	1	700	0,85	595	700
	Obrábění	Obsazení stroje	0,25	175	5	3500	3,5	2450	700
Materiál	Spotřeba materiálu	Množství dílů	1	60	1	60	1	60	60
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	4,5	4500	4,83	4830	4,68	4680	1000
Celková cena [czk]			8685	czk	12904,5	czk	11502	czk	

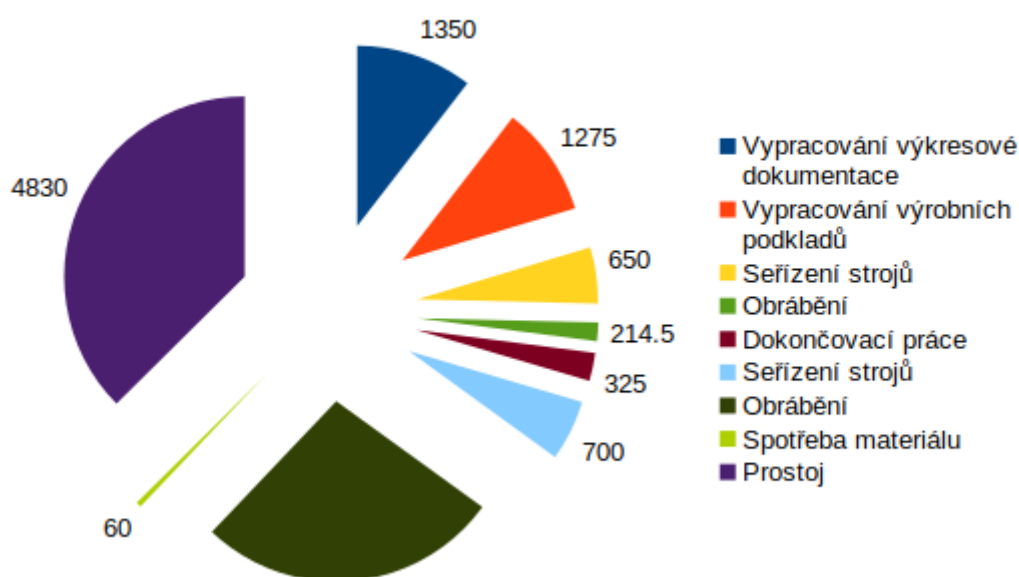
Aditivní výroba			M311-399-DRZAK		M311-400-DRZAK		M331-577-DRZAK		
Zdroj	Aktivita		Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350	900
	Vypracování modelů	Práce konstruktéra	0,25	225	0,25	225	0,15	135	900
	Seřízení strojů	Práce operátora	1,5	975	1,5	975	1,5	975	650
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,33	214,5	0,33	214,5	650
	Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	1,5	900	1,5	900	1,5	900
	Tisk	Obsazení stroje	7,63	4578	8,16	4896	7,86	4716	600
Materiál	Spotřeba materiálu	Objem výrobku	12	420	35	1225	32	1120	35
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	19,38	19380	19,74	19740	19,34	19340	1000
Celková cena [czk]			28153	czk	29525,5	czk	28750,5	czk	

Obr. 13: Modelování reaktivní údržby.

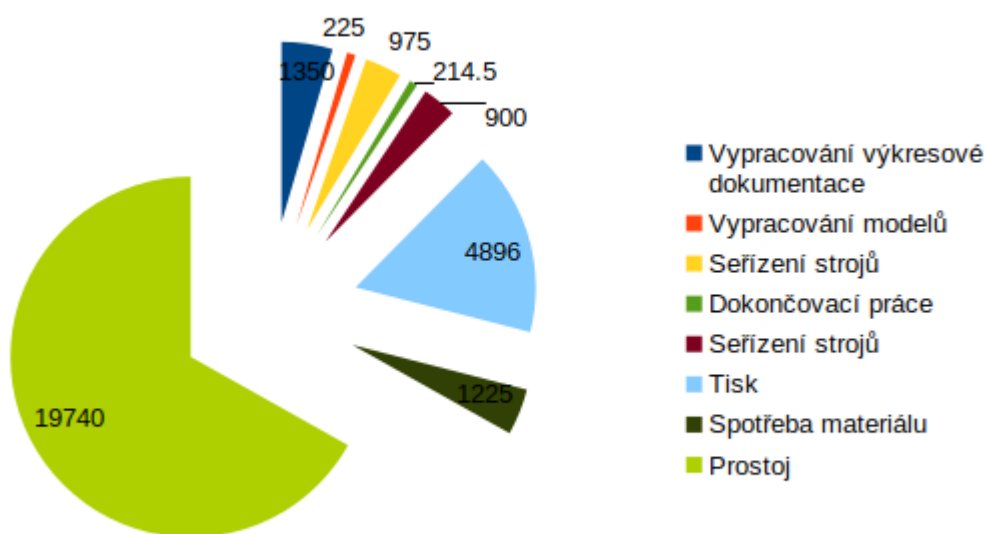
Konvenční výroba		M331-494-PRICHYTKA		M331-496-PRICHYTKA		M331-428-PRICHYTKA			
Zdroj	Aktivita	Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba	
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350	900
	Vypracování výrobních podkladů	Práce technologa	1,5	1275	1,5	1275	1,5	1275	850
	Seřízení strojů	Práce mechanika	0,5	325	1	650	0,85	552,5	650
	Obrábění	Práce mechanika	0,25	162,5	0,25	162,5	0,25	162,5	650
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,5	325	0,5	325	650
Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	0,5	350	1	700	0,85	595	700
	Obrábění	Obsazení stroje	0,25	175	0,5	350	0,5	350	700
Materiál	Spotřeba materiálu	Množství dílů	1	60	1	60	1	60	60
Čas prostroje	Prostoj	Čekání na díl	4,25	4250	4,75	4750	4,6	4600	1000
Celková cena [czk]			8272,5	czk	9622,5	czk	9270	czk	

Aditivní výroba		M331-494-PRICHYTKA		M331-496-PRICHYTKA		M331-428-PRICHYTKA			
Zdroj	Aktivita	Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena	Sazba	
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350	900
	Vypracování modelů	Práce konstruktéra	0,18	162	0,25	225	0,11	99	900
	Seřízení strojů	Práce operátora	1,5	975	1,5	975	1,5	975	650
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,25	162,5	0,25	162,5	0,25	162,5	650
	Seřízení strojů	Obsazení stroje	1,5	900	1,5	900	1,5	900	600
Čas stroje	Tisk	Obsazení stroje	7,38	4428	8,63	5178	8,35	5010	600
	Materiál	Spotřeba materiálu	6	210	10	350	22	770	35
Čas prostroje	Prostoj	Čekání na díl	18,81	18810	20,13	20130	19,71	19710	1000
Celková cena [czk]			26997,5	czk	29270,5	czk	28976,5	czk	

Obr. 13: Modelování reaktivní údržby (pokračování).



Obr. 14: Rozklad ceny M311-400-DRZAK (konvenční metoda).



Obr. 15: Rozklad ceny M311-400-DRZAK (aditivní výroba).

4.4.3 Příklad prediktivní údržby

Konvenční výroba			M311-399-DRZAK		M311-400-DRZAK		M331-577-DRZAK	
Zdroj	Aktivita	Cost driver	Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350
	Vypracování výrobních podkladů	Práce technologa	1,5	1275	1,5	1275	1,5	1275
	Seřízení strojů	Práce mechanika	0,5	325	1	650	0,85	552,5
	Obrábění	Práce mechanika	0,5	325	0,33	214,5	0,33	214,5
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,5	325	0,5	325
Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	0,5	350	1	700	0,85	595
	Obrábění	Obsazení stroje	0,25	175	5	3500	3,5	2450
Materiál	Spotřeba materiálu	Množství dílů	1	60	1	60	1	60
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	4,5	0	4,83	0	4,68	0
Celková cena [czk]			4185	czk	8074,5	czk	6822	czk

Aditivní výroba			M311-399-DRZAK		M311-400-DRZAK		M331-577-DRZAK	
Zdroj	Aktivita		Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350
	Vypracování modelů	Práce konstruktéra	0,25	225	0,25	225	0,15	135
	Seřízení strojů	Práce operátora	1,5	975	1,5	975	1,5	975
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,33	214,5	0,33	214,5
	Seřízení strojů	Obsazení stroje	1,5	900	1,5	900	1,5	900
Čas stroje	Tisk	Obsazení stroje	7,63	4578	8,16	4896	7,86	4716
	Spotřeba materiálu	Množství dílů	12	420	35	1225	32	1120
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	19,38	0	19,74	0	19,34	0
Celková cena [czk]			8773	czk	9785,5	czk	9410,5	czk

Konvenční výroba			M331-494-PRICHYTKA		M331-496-PRICHYTKA		M331-428-PRICHYTKA	
Zdroj	Aktivita		Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350
	Vypracování výrobních podkladů	Práce technologa	1,5	1275	1,5	1275	1,5	1275
	Seřízení strojů	Práce mechanika	0,5	325	1	650	0,85	552,5
	Obrábění	Práce mechanika	0,25	162,5	0,25	162,5	0,25	162,5
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,5	325	0,5	325	0,5	325
Čas stroje	Seřízení strojů	Obsazení stroje	0,5	350	1	700	0,85	595
	Obrábění	Obsazení stroje	0,25	175	0,5	350	0,5	350
Materiál	Spotřeba materiálu	Množství dílů	1	60	1	60	1	60
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	4,25	0	4,75	0	4,6	0
Celková cena [czk]			4022,5	czk	4872,5	czk	4670	czk

Aditivní výroba			M331-494-PRICHYTKA		M331-496-PRICHYTKA		M331-428-PRICHYTKA	
Zdroj	Aktivita		Množství	Cena	Množství	Cena	Množství	Cena
Práce	Vypracování výkresové dokumentace	Práce konstruktéra	1,5	1350	1,5	1350	1,5	1350
	Vypracování modelů	Práce konstruktéra	0,18	162	0,25	225	0,11	99
	Seřízení strojů	Práce operátora	1,5	975	1,5	975	1,5	975
	Dokončovací práce	Práce mechanika	0,25	162,5	0,25	162,5	0,25	162,5
	Seřízení strojů	Obsazení stroje	1,5	900	1,5	900	1,5	900
Čas stroje	Tisk	Obsazení stroje	7,38	4428	8,63	5178	8,35	5010
	Spotřeba materiálu	Množství dílů	6	210	10	350	22	770
Čas prostoje	Prostoj	Čekání na díl	18,81	0	20,13	0	19,71	0
Celková cena [czk]			8187,5	czk	9140,5	czk	9266,5	czk

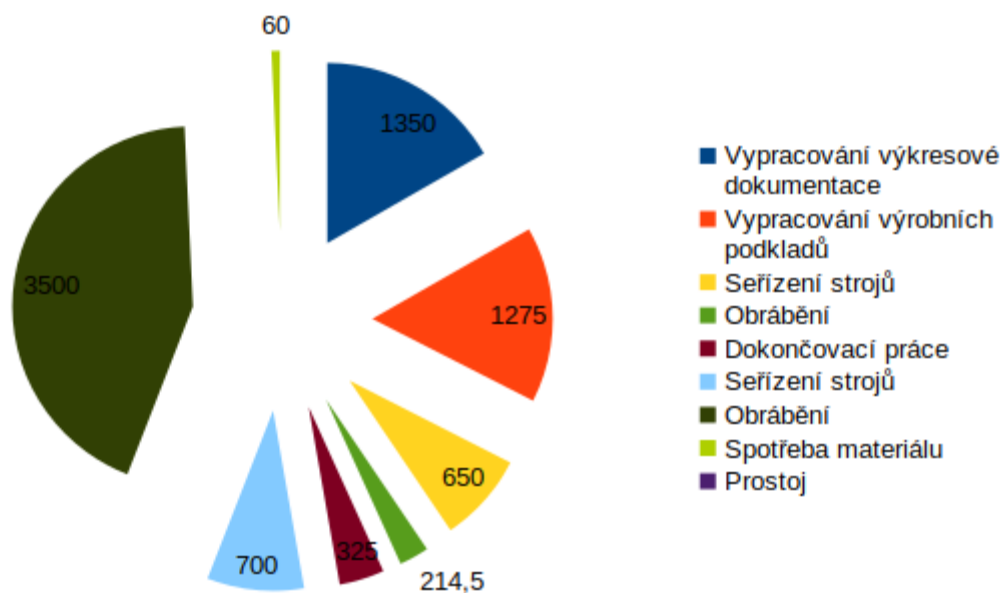
Obr. 16: Modelování prediktivní údržby.

Příklad je charakterizován nulovou (resp. minimální) cenou času prostoje. Výzkum ukazuje, že v tomto případě použití konvenční metody může vést ke ztrátám hlavně z důvodů vysoké ceny seřízení a provozu strojů. Aditivní metoda naopak méně vytěžuje drahé lidské zdroje, zde reprezentované prací konstruktéra a technologa.

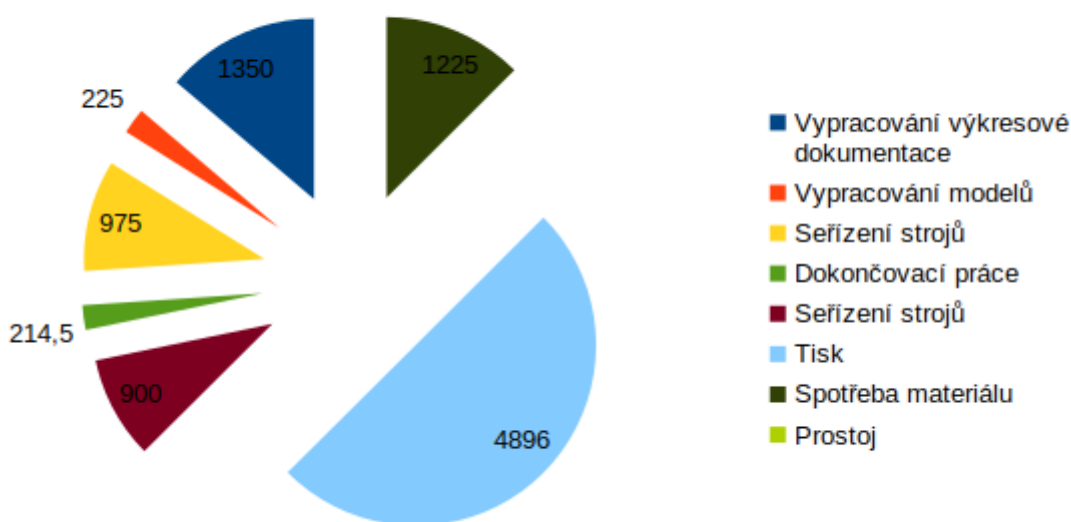
U konvenční výroby vidíme kolísání cen v důsledky rozdílné geometrie dílů, což značně komplikuje odhad nákladů ceny před zahájením výroby. V případě aditivní výroby je cena lépe předpověditelná.

Při použití aditivní metody výroby může být cena jednoho dílu i násobně snížena. [21] ukazuje graf vývoje ceny jednoho kusu. Pokles ceny při tisku několika kusů znamená že doba tisku nemusí být lineárně závislá na množství kusů, stejně jako doba chladnutí *zástavby* (všechny díly, které se tisknou spolu). Při minimální ceně času prostoje je proto výhodné tisknout co nejvíc dílů zároveň, což se (často intuitivně) dělá i dnes. Předpokládáme že další optimalizací bude možné uvnitř vymezených skupin dílů najít další výrobky, u nichž se vyplatí tisknout s předstihem.

Jako skupina, držáky a přichytky nevykazují jednoznačnou výhodu ani v případě prediktivní údržby. Nicméně výhody lze dosáhnout za popsaných podmínek.



Obr. 17: Rozklad ceny M311-400-DRZAK (konvenční metoda).



Obr. 18: Rozklad ceny M311-400-DRZAK (aditivní výroba).

4.4.4 Příklad proaktivní údržby

Proaktivní údržba se stejně jako prediktivní vyznačuje nízkou cenou času prostoje, přičemž z nákladového hlediska může být proaktivní údržba ve smyslu integrace aditivní výroby popsána stejně jako prediktivní.

Jedním z cílů proaktivní údržby je snížení nákladů na údržbu. Podle dosažených výsledků lze zavedením aditivní výroby v podmínkách proaktivní údržby redukovat náklady podniku na výrobu náhradních dílů (resp. dílů pro prodloužení provozuschopnosti stroje), zejména mají-li složitou geometrii a nebo jejich výroba vyžaduje použití provozně drahých strojů, protože časové náklady 3D tisku závisí spíše na hrubém objemu než na složitosti a je možné je naplánovat.

Dalším cílem proaktivní údržby je zamezení vzniku poruchového stavu. Z tohoto hlediska jde o částečné zlepšení konstrukce stroje, náhradou nevhodně navržených dílů jinými. V tomto případě sama aditivní výroba negarantuje jednoznačné výhody a každý případ je nutno posuzovat zvlášť.

Z vývoje cen dílů v závislosti na množství lze usuzovat, že existuje možnost tisknout levné a komplikované díly pro potřeby vylepšení nebo opravy strojů a zařízení. Za podmínek dlouhodobého plánování úprav, oprav a vylepšení se uvedený scénář využití aditivní výroby s velkou pravděpodobností vyplatí.

Implicitní výhodou zavedení aditivní výroby bude větší nezávislost oddělení údržby od dílny. Výroba formou 3D tisku je obecně méně náročná na plánování a v přepočtu na jeden díl vyžaduje méně lidských zdrojů.

5 ZÁVĚR

V rámci práce byly úspěšně analyzovány statistické údaje z oddělení údržby zadavatele, na základě kterých byly stanoveny nejvhodnější skupiny dílů vhodné pro nahrazení 3D tiskem. Vybrané skupiny byly analyzovány i z hlediska ekonomické výhody, na základě metody kalkulace nákladů ABC. Předložená práce tak nabízí nástroj a podklady pro posouzení ekonomické výhody aditivní výroby libovolné skupiny dílů v porovnání s konvenčními metodami a posouzení scénářů zařazení aditivní výroby do praxe.

Do práce nebylo zařazeno posouzení kovových dílů, protože v době odevzdání nebyl k dispozici profesionální odhad (simulace) doby tisku, nicméně po doplnění těchto údajů bude možné doplnit výsledky práce na základě definovaných modelů nákladů.

Práce se soustředí na posouzení případu prediktivní údržby coby součásti proaktivní údržby, přičemž se vychází z praktických potřeb společnosti Siemens v Mohelnici, protože úplné posouzení proaktivní údržby by vyžadovalo komplexnější pohled i na aditivní výrobu. Bakalářská práce se tak z důvodu omezených časových dispozic zabývá zejména rozhodovací a ekonomickou stránkou implementace 3D tisku do údržby, zatímco technická stránka (testování vlastností dílů) bude předmětem navazující interní studie. Dosažené výsledky tak již nyní pro zadavatele představují podklad pro další kvalifikovaná rozhodnutí při plánování vlastní produkce vybraných náhradních dílů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČÍM JSME ZNÁMÍ: Město Mohelnice. *Mikroregion Mohelnicko: Oficiální web* [online]. [Mohelnice]: Město Mohelnice, 2010 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.mohelnice.cz/cim-jsme-znami/ds-5396/p1=98024>
- [2] VISIONS. Časopis o lidech, technologiích a inovacích [online]. [Praha]: Siemens, 30. července 2020, 1/2020. Dostupné z: <https://www.visionsmag.cz/upload/visions-1-2020-final.pdf>
- [3] Digitální transformace v závodě Siemens Elektromotory Mohelnice vstupuje do nové etapy. *Zakazka.cz: Vše pro strojírenskou výrobu* [online]. Ostrava: Dynatron, 2001, 11.11.2021 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.zakazka.cz/digitalni-transformace-v-zavode-siemens-elektromotory-mohelnice-v-stupuje-do-nove-etapy/>
- [4] ČSN EN 13306. *Údržba - Terminologie údržby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [5] Údržba. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9A%C5%BEBa>
- [6] Preventivní údržba šetří stroje i peníze, nečekejte proto na poruchu. *Vše o průmyslu: Portal pro bezporuchovou výrobu* [online]. Český Těšín: Trade Media International, 2022, 29.03.2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/udrzba-a-diagnostika/asset-management/preventivni-udrzba-setri-stroje-i-penize-necekejte-proto-na-poruchu.html>
- [7] GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. Munich: Hanser, c2012. ISBN 978-1-56990-507-4.
- [8] MONZÓN, M.D., Z. ORTEGA a A. MARTÍNEZ. Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. *Int J Adv Manuf Technol*. 13 September 2014n. 1., (76), 1111–1121. ISSN 1433-3015.
- [9] HERDERICK, Ed. Additive manufacturing of metals: A review. *Materials Science and Technology*. October 2011, 2011(9), 1413-1425.
- [10] ISO/TC 261: Additive manufacturing. *ISO - International Organization for Standardization* [online]. Geneva, Switzerland: ISO, 2011 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.iso.org/committee/629086.html>

- [11] ISO/ASTM 52900:2021. *Additive manufacturing — General principles — Terminology*. 2 Edition. Switzerland: ISO/ASTM International, 2021.
- [12] VITALE, Mark, Mark COTTELEER a Jonathan HOLDOWSKY. An Overview of Additive Manufacturing. *Defense AT&L*. DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2016, (November-December 2016), 7-13.
- [13] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2 ed. New York: Springer New York, NY, 2015. ISBN 978-1-4939-4455-2.
- [14] 3D printing and additive manufacturing processes. *HP: Official web* [online]. United States: HP Development Company, L.P., 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/learning-center/3d-printing-process.html>
- [15] DIZON, John Ryan, Alejandro ESPERA, Qiyi CHEN a Rigoberto ADVINCULA. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 2018, **2018**(20), 44-67. ISSN 2214-8604.
- [16] HP 3D Printing materials: Expand into new applications and markets. *HP: Official web* [online]. United States: HP Development Company, L.P., 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/materials.html>
- [17] KUMAR, Jyothish, Pulak PANDEY a David Ian WIMPENNY. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer Singapore, 2019. ISBN 978-981-13-0305-0.
- [18] KRÁL, B., 2010. *Manažerské účetnictví*. 3. vyd. Praha: Management Press, 660 s. ISBN 978-80-7261-217-8.
- [19] FIBÍROVÁ, J., L. ŠOLJAKOVÁ a J. WAGNER, 2007. *Nákladové a manažerské účetnictví*. Praha: ASPI, 430 s. ISBN 978-80-7357-299-0.
- [20] MIKOVCOVÁ, Hana. Kalkulace ABC: Activity Based Costing. *Acta Oeconomica Pragensia*. 2008, 16(4), 22-28.
- [21] COSTABILEA, G., M. FERA, F. FRUGGIEROC, A. LAMBIASEA a D. PHAM. Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. Growing Science, 2017, 2017(8), 263–282.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1, Část respirátoru RP95-3D, která se vyráběla v závodě Siemens	11
Obr. 2, Přípravek vyrobený na HP Multi Jet Fusion	12
Obr. 3, Obecný pracovní postup v aditivní výrobě	14
Obr. 4, Ilustrace technologie HP Multi Jet Fusion	17
Obr. 5, Schématické zobrazení metody kalkulace ABC	19
Obr. 6, Závislost ceny dílu na vyráběném množství podle Ruffo et al.	20
Obr. 7, Schéma analýzy dat	24
Obr. 8, Nástroje pro analýzu. Web GUI (třídění slov) a Python skripty	26
Obr. 9, Příklad výsledné tabulky (všechny objednávky)	27
Obr. 10, Příklad dílů ze skupin držáků a příchytek (STL modely)	29
Obr. 11, Základní model ceny, včetně doby vychladnutí výrobků - 8h	32
Obr. 11, Základní model ceny, včetně doby vychladnutí výrobků - 8h (pokračování)	33
Obr. 12, Příklad zástavby, náhled v prostředí slicingové aplikace	33
Obr. 13, Modelování reaktivní údržby	35
Obr. 13, Modelování reaktivní údržby (pokračování)	36
Obr. 14, Rozklad ceny M311-400-DRZAK (konvenční metoda)	36
Obr. 15, Rozklad ceny M311-400-DRZAK (aditivní výroba)	36
Obr. 16, Modelování prediktivní údržby	37
Obr. 17, Rozklad ceny M311-400-DRZAK (konvenční metoda)	38
Obr. 18, Rozklad ceny M311-400-DRZAK (aditivní výroba)	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1, Údaje o výchozích datech	25
Tab. 2, Příklad výchozích dat, všechny objednávky	25
Tab. 3, Příklad výchozích dat, objednávky údržby	25
Tab. 4, Příklad normalizace	25
Tab. 5, Přiřazení aktivit zdrojům, hodinové sazby	30
Tab. 6, Přiřazení aktivit zdrojům, hodinové sazby	31