VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VYUŽITÍ TECHNOLOGIE VIRTUÁLNÍ REALITY K MONITORINGU A VIZUALIZACI VYBRANÝCH PROVOZNÍCH VLASTNOSTÍ STROJE A JEJICH ANALÝZE

USE OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY FOR MONITORING AND VISUALIZATION OF SELECTED OPERATIONAL CHARAKTERISTICS OF MACHINES AND THEIR ANALYSIS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — **Ing. Jan Augste**
AUTHOR

ŠKOLITEL — **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**
SUPERVISOR

BRNO 2017

Abstrakt

Tato dizertační práce se zabývá studiem využití virtuálních technologií pro analýzu provozních vlastností stroje. Provozními vlastnostmi stroje jsou parametry, které určují použitelnost stroje pro splnění daného úkolu, a to navíc v určeném čase a za daných podmínek. Patří mezi ně parametry, které mohou být změněny na základě požadavku zákazníka, například velikost stolu a nejvyšší otáčky vřetene až po parametry ovlivněné od počátku konstrukčním řešením stroje jako je přesnost polohování nebo hodnota zrychlení v osách nebo spotřeba.

V první části jsou stanoveny obecné požadavky na vizualizaci informací a ty jsou následně v kapitole věnující se časovému vizualizačnímu protokolu experimentálně ověřeny. Tato práce prezentuje původní experimenty za účelem stanovení základních požadavků pro vizualizace měřené veličiny, v tomto případě posuvové rychlosti. Ověřením použitelnosti při zobrazení těchto vlastností na podkladových datech zobrazující změnu polohy stroje je potvrzena platnost čtyř základních požadavků pro visuální práci s daty s využitím imerzní virtuální reality. Hlubší poznání práce s vizualizacemi datových soborů umožní analyzovat komplikovanější souvislosti v rámci delšího časového úseku, vyšší transparentnost a jednoznačnější výstupy analýz.

Klíčová slova

Virtuální realita, obráběcí stroje, časový vizualizační protokol, analýza dat.

Abstract

This dissertation deals with the study of the use of virtual technologies for an analysis of operating characteristics of a machine. Operating characteristics of a machine are parameters that determine the usability of the machine to accomplish a certain task in addition to the specified time and under the certain conditions. These include parameters that can be changed based on customer requirements, for example, the table size and the highest spindle speed to the parameters influenced from the start of the machine design such as positioning accuracy, acceleration value in the axes or consumption.

The first part sets out general requirements for visualization of information and these are subsequently verified experimentally in the chapter devoted to the time visualization protocol. This thesis presents the original experiments to determine the basic requirements for visualization of a measured quantity, in this case the feed rate. By verifying usability when displaying these properties on the underlying data showing machine position change, the four basic requirements for visual data processing using immerse virtual reality are validated. A deeper insight into the work with data will enable to analyse more complicated relations within a longer period, greater transparency and clearer outputs of analysis.

Key words

Virtual reality, machine tools, time visualization protocol, data analysis.

Bibliografická citace

AUGSTE, J. Využití technologie virtuální reality k monitoringu a vizualizaci vybraných provozních vlastností stroje a jejich analýze. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 87 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne……. …….

Ing. Jan Augste

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr., jehož věcné připomínky a rady mi při studiu a zpracování této práce velice pomohly. Mé poděkování dále patří i školiteli specialistovi Ing. Michalovi Holubovi, Ph.D. a všem ostatním pracovníkům ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, kteří mi byli nápomocni při tvorbě mé práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat za podporu svým blízkým a rodině.

OBSAH

1 ÚVOD 8
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 8
2.1 CYBER FYZIKÁLNÍ SYSTÉMY 11
2.2 HROMADNÁ ZÁKAZNICKÁ VÝROBA 14
2.3 SOUČASNÝ STAV PRŮMYSLU 19
2.4 VYUŽITÍ VIZUALIZACÍ V PRAXI 19
2.5 ANALÝZY A INTERPRETACE NA BÁZI REŠERŠE 27
2.6 VYMEZENÍ CÍLE PRÁCE 28
2.7 NÁVAZNOST PRÁCE NA ŘEŠENÉ VAV PROJEKTY 29
3 ČASOVÝ VIZUALIZAČNÍ PROTOKOL 30
3.1 SPONTÁNNÍ SCÉNÁŘE 33
3.2 ČASOVÁ OSA PRÁCE 35
3.3 MEŘENÍ FU EFEKTIV 36
3.4 MĚŘENÍ KOVOSVIT 40
3.5 MĚŘENÍ KOMPAN 48
4 VYUŽITÍ VIRTUÁLNÍ REALITY 68
4.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY 68
4.2 IMERZNÍ ČVP 70
4.3 REALIZACE IMERZNÍHO ČVP 74
5 ZÁVĚR 75
5.1 TEORETICKÝ PŘÍNOS PRÁCE 75
5.2 PRAKTICKÝ PŘÍNOS PRÁCE 76
5.3 PEDAGOGICKÝ PŘÍNOS PRÁCE 76
5.4 NÁMĚTY K DALŠÍMU ROZVOJI 77
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 78
7 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ A VZORKŮ 83
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 84
9 SEZNAM OBRÁZKŮ 85
10 SEZNAM TABULEK 87

1 ÚVOD

V souvislosti s rapidním vývojem informační techniky v posledních letech a její implementace do rozličných odvětví strojírenství, došlo k významnému pokroku v kvalitativních parametrech obráběcích strojů. Zároveň se ovšem snížil prostor pro jejich zlepšování, které je stále méně a méně triviální. Nároky na minimalizaci dopadů práce stroje na životní prostředí a plnění stále přísnějších norem pro emise hluku a vibrací roste stejně, jako se stupňuje tlak na energetickou efektivitu celého výrobního procesu. Překotný vývoj, který prodělává počítačová grafika, resp. virtuální realita v posledních letech, díky neustálému zvyšování technických možností a rostoucím výkonům výpočetní techniky se otevírá prostor nejen pro vizualizaci rozsáhlých souborů, ale i pro jejich souběžné zpracování a analýzu. Tato technicky orientovaná oblast již dávno není výsadou několika málo lidí z vybraných firem, ale naopak se postupně stává součástí běžného života. Zde se nachází prostor pro vytváření cest, jak se můžou její možnosti integrovat do malých a středních podniků a být využívány každodenně širokým spektrem jedinců.

Technologie virtuální reality umožnuje velmi dobrý rámcový náhled a vyhledávání souvislostí, což se pochopitelně nejvíce projeví při práci s rozsáhlými prostorovými daty, kde lze s výhodou využít změnu měřítka zájmového prostoru k analýze detailů. Potenciálně řešitelných technických úloh je celá řada, ať již se jedná o simulace montáže, vizualizace dat získaných experimentálním měření, či vizualizace ryze simulovaných dat mechatronických soustav. V rámci přípravy vlastní dizertační práce bylo při úvodních analýzách zjištěno, že pro některé úlohy je virtuální realita v současném stavu poznání a vývoje příliš zjednodušující nebo naopak nepřiměřeně detailní, a je tedy diskutabilní, zda je tato metoda adekvátní. Naopak vývoj vizuální analýzy velkých datových souborů s využitím virtuální reality není v takové fázi, aby mohl být a byl využíván v technické praxi masivně, přestože má poměrně velký potenciál. Zmíněný vývoj je akcelerován nástupem nových technologií, které jsou souhrnně začleňovány do problematiky Industry 4.0. V ČR byl stanoven jako jeden z bodů Národní výzkumné politiky INICIATIVA PRŮMYSL 4.0. (Národní iniciativa průmysl 4.0 2016). Výhodnější a přehlednější zpracování dat získaných měřením, by umožnilo zvýšení efektivity během jejich zpracování. To by v konečném důsledku znamenalo úsporu časových nároků i eliminaci potenciálních chyb, kterých se lze dopustit při pouhém statistickém zpracování, bez zahrnutí souvislostí spojených s řešeným problémem. Naopak přílišný důraz na postranní vlivy, jejich časový průběh je rovněž nekonstantní, může rovněž vést ke snížené schopnosti rozpoznávat hlavní vlivy. Pro splnění výše zmíněných požadavků, je potřeba hledat nové a alternativní cesty, místo pouhé nástavby nad aktuálně existující. Proto byly v rámci řešení této práce nejprve použity konvenční technologie a následně, na základě úvodních analýz, byly navrženy způsoby využívající nejnovější technologie.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Následující kapitola shrnuje současný stav poznání v oblasti vizualizace rozsáhlých souborů dat, získaných měřením hluku, vibrací a spotřeby, za účelem jejich interpretace, resp. vyvození závěrů. Za tímto účelem jsou použity rešerše publikací, které v této oblasti přinášejí nové přístupy. Kapitola je členěna na oblast analýzy energetických toků a dále na oblast vizualizace souborů dat hluku a vibrací. Řešeny jsou nejen zdroje týkající se norem, ale i ty zabývající se jejich vlivy na subjektivní vnímání operátorem. Hybnou silou výzkumu v uvedených oblastech, jsou stále

rostoucí požadavky na produktivitu. Mechanické komponenty strojů musejí snášet enormní zatížení v nepřetržitých provozech s minimální ztrátou energie, která má v souvislosti s rostoucími cenami energií stále větší vliv na cenu vyráběného produktu. Zároveň mají energetické ztráty řadu nepříznivých vlivů na životnost i přesnost výrobních strojů (Tůma 2013). Mimo to, musí koncepce stroje už ve fázi návrhu, plně umožnit splnění budoucích kritérií v oblasti interakce stroj – obsluha, ať už se jedná o zmínění dopadů hluku, vibrací či například ergonomie. (Bunse et al. 2011)

Ještě před dvaceti lety byly stroje stavěny s mnohem jednodušší koncepcí, bez počítačového řízení a procesy, které na nich probíhaly, byly mnohem snadněji analyzovatelné. Navíc jejich návrh probíhal čistě s ohledem na maximalizaci funkčních parametrů, jako jsou výkon nebo rychlost. V současné době je při vývoji zohledněna také délka technické životnosti nových strojů a stejně tak se výrazněji klade důraz na náklady spojené s provozem strojů. Tuto změnu pohledu způsobily nařízení, která regulují energetické dopady strojů po celou dobu jejich plánované životnosti (Life Cycle Assessment) (Duflou et al. 2012; Kočí 2010). Tyto dopady je nutné analyzovat a vyhodnocovat (ČSN EN ISO 14040: 2006), protože rozměrné soubory dat získané měřením pracovního cyklu obráběcích strojů, mohou být bez přehledné návaznosti na právě probíhající úlohu a další souvislost, obtížně vyhodnotitelné. Z těchto komplexních souvislých procesů je velmi obtížné jednoduše eliminovat bezpečností rizika, energetické ztráty i konstrukční závady.

Životní cyklus (technická životnost) u moderního CNC obráběcího stroje je až 20 let, takže je důležité pro úspory hledat metody, které mohou být aplikované na stroje/mechatronické soustavy ve fázi vývoje, produkce i nasazení ve výrobě (Oda et al. 2012). Podle směrnice Evropské unie (EU 2009) pojem Ecodesign cílí na snížení dopadů na životní prostředí po celou dobu životního cyklu (LCA- fáze výroby, užití, recyklace a ukončení životnosti), a to tak, že systematicky zahrnuje environmentální aspekty do počáteční fáze návrhu produktu (ČSN EN ISO 14006: 2011). Je odhadováno, že více než 80 % všech dopadů na životní prostředí je určeno ve fázi návrhu (Iskandirova et al. 2013). Výsledky úsporných opatření jsou často dány základní spotřebou stroje, která udává spotřebu energií i v neproduktivní fázi.

Hybnou silou v oblasti poznávání využití virtuální reality, jsou v současnosti národní iniciativy, které se nazývají například Industry 4.0 (Německo), ale byly i jinak nakopírovány do různých národních výzev jako například Smart Industry (Holandsko), Catapult (Velká Británie) l'Usine Nouvelle (Francie) and Made Different (Belgie). Velkou výhodou těchto projektů je, že se daří zapojovat jak vládní organizace, tak i firemní sdružení a vývojové instituce.

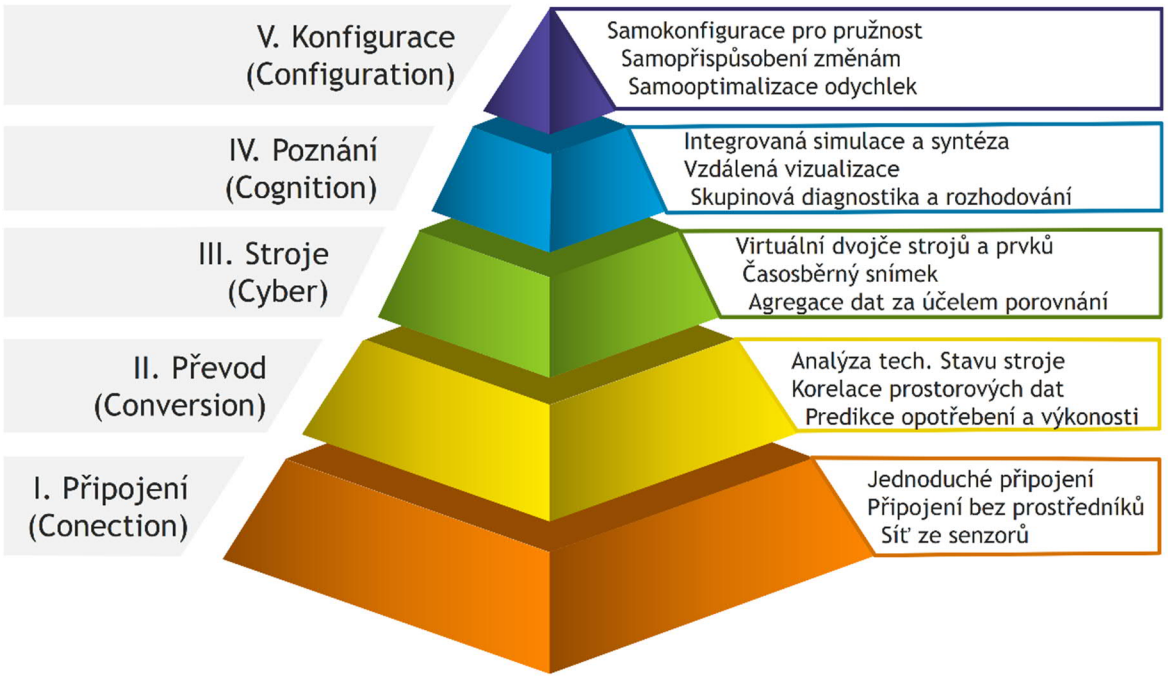
Česká republika je dle reportu světového ekonomického fóra, na 42. místě hodnocení „Networked readiness index“. Digitalizace je nezbytnou, skutečně základní podmínkou pro realizaci systémových a kybernetických principů, pro realizaci inteligentních výrobních systémů a služeb. Nicméně 4. průmyslová revoluce není jen o ní. Index připravenosti zemí sestavený firmou Roland Berger řadí ČR mezi „tradicionalisty“. To znamená země, které dosud těží z aktuálního potenciálu, ale zatím neudělaly kroky, které můžou vést k razantnějšímu posunu do úplně nové éry. Vzhledem k šíři dopadu, musí tato filozofie proniknout do myšlení celé společnosti. Bez větší nadsázky lze říct, že iniciativa Průmysl 4.0 je především o odpovědné podpoře změny způsobu myšlení celé společnosti, než o konkrétních technologiích (Mařík et al. 2016). Jednou z myšlenek této iniciativy je, že lidé musejí být v práci podporování k získání nadhledu, a to i přesto, že daná továrna nepřetržitě roste, a

přitom by se mohlo zdát, že budou spíše ztrácet. Myšlenka se zdá být velmi zřejmá až samozřejmá, ale není v současnosti podporovaná úplně automaticky. Není totiž dostupný systém, který by se dokázal vždy přizpůsobit měnícím se podmínkám, a tím i změnit obsah poskytované informace. S přechodem na automatizaci nejjednodušších operací, musejí být operátoři připraveni vykonávat stále náročnější úkony, s častějšími změnami, do kterých musejí být zaškoleni za kratší dobu (Kagermann et al. 2013). Aby toto bylo realizovatelné, je potřeba využít zvýšenou míru symbolizace a vizuálních informací, které jsou prokazatelně rychle vstřebatelné (kapitola 2.4.1).

Na úvod je možné definovat, že Smart systém je v podstatě reflexe na výše zmíněné požadavky na výrobní systém, to tedy znamená, že tento systém musí poskytnout správné informace, vždy na správném místě. Podnik, který takový systém využívá, se označuje termínem Smart Factory (Shrouf et al. 2014). Toto samozřejmě klade extrémní nároky na velikost dat. Jejich analýza může být zaměřena na vyhledání obtížně popsatelných, a tedy i dohledatelných informací, což je nepochybně jednou z výzev. Dále ale může být analýza využita k převodu dat na informace, a tím ke zmenšení velikosti uložených dat a především k optimalizaci datového toku. Každopádně bude rostoucí využívání počítačově řízených strojů vést, k vytváření dalších statistických dat, která mohou být využita pro výše zmíněné informace.

2.1 CYBER FYZIKÁLNÍ SYSTÉMY

V tomto prostředí byly položeny základní kameny Cyber Physical System. Originál 6C se 6 komponenty (nazývaný 6C) (Lee et al. 2014) s částečným překryvem byly redukovány na 5 komponentů a nazvány 5C (Lee et al. 2015) stejným autorem o rok později.



Obr. 2.1 CPS systém dle 5C

CPS definoval v roce 2006 Dr. James Truchard, který představil koncept, kde může být spojen virtuální a reálný svět. Demonstraci CPS předvedl na robotovi LEGO® MINDSTORMS® NXT spojeným s bezdrátovým čidlem (Instruments 2006). CPS, který je integrovaným systémem pro výpočet, komunikaci a ovládání (Lee 2008), využívá Industry 4.0. pro výstavbu CPPS[1] (Vogel-Heuser et al. 2014), která je tvořena inteligentními stroji, logistickými systémy a výrobními zařízeními umožňující zahrnout všechny stupně do plně zasíťované výroby, provozované v rámci sytému informačních a komunikačních technologií. (MacDougall 2014). Toto umožnuje zařízením provozovaným v rámci Smart Factory lepší podmínky, přičemž jednotlivé systémy používané v ní se liší podnik od podniku, na základě individuálních potřeb daných například obchodním modelem, takže existují jiné výzvy implementace pro podnik se zákaznickou výrobou nazývanou Engineering to Order (ETO) a logistickou halu distribující nakupované díly. Součásti inteligentního závodu jsou inteligentní (Shrouf et al. 2014):

- Zařízení

Na nejnižší úrovni v podniku jsou inteligentní senzory poskytující digitální výstup spolu s dostatečným odstupem a prevencí interferencí frekvencí při komunikací. Komunikace je obousměrná, což umožnuje vzdálenou kalibraci mezi jednotkami tvořící

[1] Cyber-Physical Production System

senzor. Tyto senzory zlepšují pružnost výroby pomocí průběžných korekcí prahové hodnoty, což v konečném důsledku šetří čas operátora, který toto dříve musel dělat na každém stroji nebo pracovišti zvlášť.

Musí fungovat spolehlivě v nepříznivých podmínkách, což klade vyšší požadavky na jejich ochranu a balení. Spolehlivé připojení ve standardu IoT, s řídicími systémy vyšší úrovně, je kritické pro vytvoření Smart Factory. Zahrnuje všechna zařízení schopná komunikace, jako jsou čtečky, mobily nebo navigace. Slouží pro interakci a komunikaci mezi strojem a operátorem nebo mezi operátory.

- Stroje

Každý takový stroj je vybaven M2M komunikací, která slouží nejen pro komunikaci s ostatními stroji, ale i s lidmi, i když s těmi stále převládá spíše interakce než komunikace (Kagermann et al. 2013). Samozřejmě mají tyto stroje veškeré nové technologie, mezi které patří proaktivní údržba. Je to nutnost a logický důsledek, protože omezením nadbytečných kapacit a efektivnějším využitím strojů se na druhou stranu zvyšují rizika v případě výpadku stroje.

Kumulace dat z výroby a dat od zákazníka znamená, vytvoření požadavku na provádění analýzy dat velkého rozsahu, známá jako Big Data, což by mělo umožnit, vypořádat se s neustále měnícími se požadavky.

To ale není jediný, i když důležitý důvod, proč tyto data ukládat často v cloudovém systému. Mohou být využity k monitoringu, analýze, ale i ke zlepšování a dalšímu vývoji ve spolupráci s dodavatelem, vyhodnocení výkonnosti po změnách servisních akcích a monitoringu energetické efektivity (Behrendt et al. 2012).

- Výrobní procesy

V této souvislosti mluvíme o hyperconnected produkčním procesu. Jsou to takové procesy, které zahrnují podporu dynamických změn a efektivní přímou komunikaci bez vyžádání, tyto umožnují s podporou internetu věcí IoT vybudovat dynamické výrobní prostředí.

- Engineering

Souhrnný název pro služby související s designem, vývojem, konstrukcí, výrobou a poprodejním servisem. Chytrý proces v tomto případě systémově zajišťuje ukládání, a především využívání dat ze všech uvedených služeb do plánování a do kontinuálního zlepšování produktů. A to nejen v rámci životních cyklů výrobků současných, ale i odvozených budoucích.

- Logistika a dodavatelský řetězec

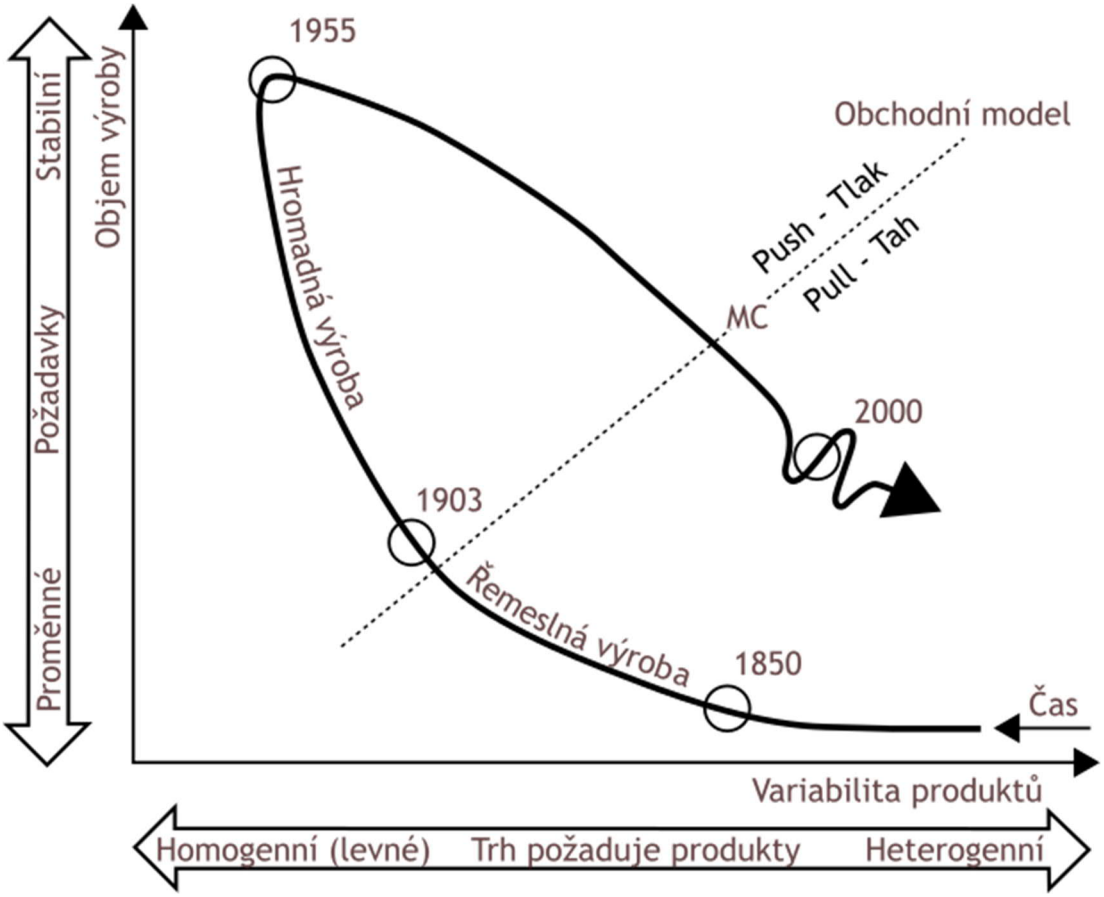
Logický dopad MC na dodavatelský řetězec a logistiku směrem do závodu vlivem flexibilních objednávek a snížení skladových zásob je zřejmý. Nicméně ostatní důsledky přinášejí nemenší výzvy, a přitom už tak zřejmé nejsou. Zde je možné uvést příklad ze společnosti Kompan, kde jednou z výzev je balení řádově stovky položek spojovacího materiálu, příchytek a dalších drobných komponentů, které se v produktech vyskytují v obtížně předikovaném množství v počtech kusů, řádově desítky až tisíce a jsou využívány až při montáži u zákazníka. Na druhou stranu na celém pracovišti kapacitně stačí pouhých 8 pracovníků. Výpočet efektivity návratnosti balící linky vyžadující servis a údržbu, tak musí zohlednit i cenu za reklamace, které jsou způsobena chybou operátora při počítání kusů, aby byl tento výpočet vůbec rozumný.

- Výrobní IT

Velmi důležitou součástí je bezchybná integrace všech systémů a dat. Toto zahrnuje v první řadě softwarové aplikace pracující na síťové infrastruktuře, za účelem výměny dat. Za druhé jsou to chytré prvky internetu, věci jako snímače pohybu, měřiče hodnot a další mobilní zařízení, které musejí být všechny spolehlivě integrovány do logiky systému řízení.

2.2 HROMADNÁ ZÁKAZNICKÁ VÝROBA

Jedním z důsledků implementace iniciativy Průmyslu 4.0 je vytvoření podmínek pro mnohem flexibilnější výrobní proces, který zase vytváří prostor pro naplňování individuálních požadavků zákazníků. Portfolio zákaznické až hromadné výroby známé, již z časů počátků firmy Ford doplňuje hromadná zákaznická výroba neboli Mass Customization (dále v textu MC). Tento termín představil Davis v knize "Future perfect" z roku 1987 (Davis 1987).



Obr. 2.2 Vývoj podmínek výroby (Boër et al. 2013)

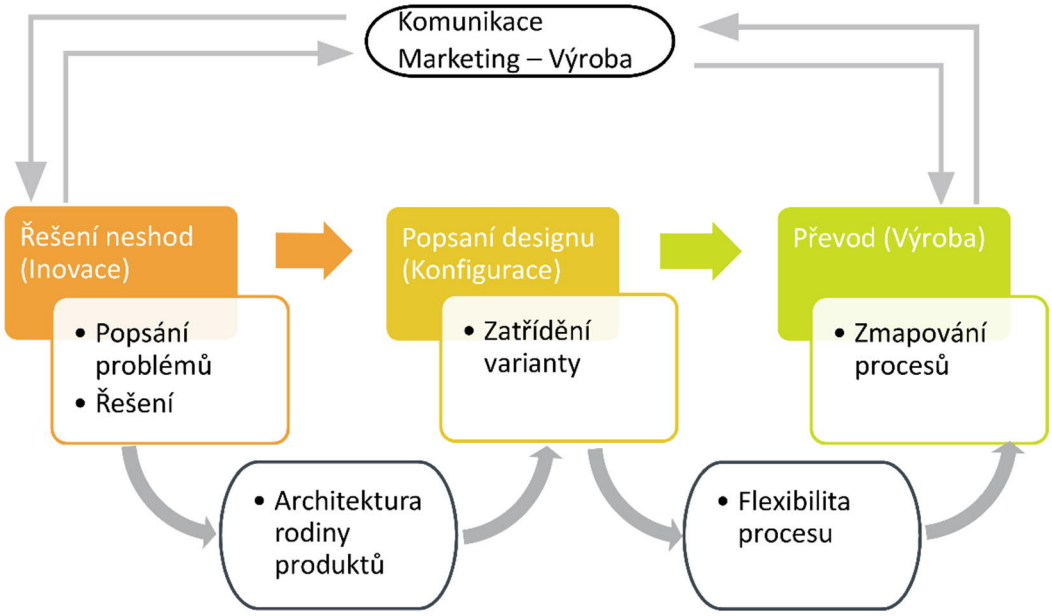
Jedná se o strategii, která vytváří přidanou hodnotu z vyšší interakce mezi zákazníkem a firmou. Částečně to souvisí s postupnou změnou obchodního modelu z Push na Pull. Na první pohled jsou obě koncepce stejné. Využívají průzkum trhu k identifikaci potřeb a přání zákazníků, snaží se budovat silné a energické značky, investují do reklamy i jiných prostředků komunikace, hrají si s cenami a propagací ve snaze ovlivnit úroveň poptávky. V reálném životě se s ryzím příkladem žádného z těchto přístupů nesetkáte. Přesto obě staví na jiných osách přitažlivosti zákazníka. Poptávkový neboli pull marketing klade velký důraz na to, aby dodával zákazníkům přesně to, co chtějí, a používá nejrůznější prostředky komunikace, aby na svou snahu klientelu řádně upozornil. Nabídková (push) koncepce se naopak snaží využít marketingu k prodeji produktů. Firmy, které ji používají, chápou zaměření se na zákazníka poněkud jinak: snaží se vytušit ty nejlepší emocionálně-racionální motivy, které zákazníky povedou ke koupi.

Nic více uspokojujícího než vysoce customizovaný výrobek si ani zákazník přát nemůže, navíc jeho cena nemůže být o tolik vyšší, protože s ním má firma srovnatelné náklady a pracnost. Někdy je tato možnost odměněna v podobě poplatků za individuální customizaci, jindy jen pouze jako konkurenční výhoda. (Coletti & Aichner 2011)

Takové prostředí klade extrémní nároky na kvalitu a rychlost předávání informací, což lze řešit prakticky jediným efektivním nástrojem a to informačním systémem, protože se jedná o jedinou možnost, jak zjistit aktuální stav tak složitého procesu.

Je potřeba zmínit, že zároveň s rapidním nárůstem strojů s určitou úrovní inteligence, dochází k nárůstu požadavků na zákaznické modifikace veškerých produktů. Pro vlastní práci je důležité, že se MC uplatňuje ve výrobě strojů samotných. Právě zde tvoří ideální kompromis mezi výrobou hromadnou jednoduchých strojů a konstrukcí strojů na míru, jejichž dodací lhůta pak neúměrně narůstá. Tyto požadavky se řešily, a ještě stále řeší systémem ETO, tedy zákaznické konstrukce na míru nebo prostě nákupem více jednoduchých strojů místo jednoho univerzálního.

Ve své nejjednodušší podobě to může znamenat, že zákazník přes obchodníka nebo jiný konfigurátor posílá BOM a úkolem podniku je objednat a připravit tyto položky k expedici. Což je varianta nejjednodušší. Nicméně existují varianty, kde dochází ke vzniku nových předtím nepoznaných položek nebo k dílčím konstrukčním pracím. Obecně to popisuje generický model níže.



Obr. 2.3 Obecný model MC dle (Spring & Dalrymple 2000)

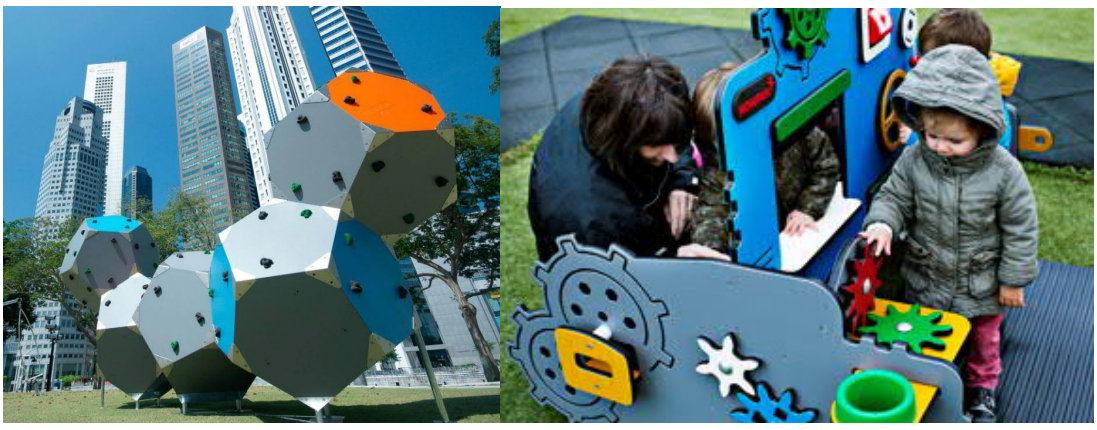
Lze shrnout 2 hlavní směry změn, které jsou nezbytné pro přechod na MC, přičemž oba vyjadřují v jistém směru extrém. Jedná se o transformaci hromadné výroby a dále zákaznické konstrukce, kde bylo definováno 5 hlavních směrů, na které má tato změna dopad: (1) Variabilita produktů (2) Pohled zákazníka (3) Náklady výroby (4) Obchodní účely (5) Konfigurace (Haug et al. 2009).

Přechod na mass customization z jiných výrobních strategií		
	Z hromadné výroby	Ze zakázkový vývoj (ETO)
1) Variabilita produktů	Zvýšit variabilitu	Snížit variabilitu
2) Pohled zákazníka	Varianty zvyšující hodnotu	Nezbytné varianty
3) Náklady výroby	Mírně rostou	Klesají
4) Obchodní účely	Zvýšené prodeje	Zlepšené procesy
5) Konfigurátory	Uživatelské rozhraní	Budování portfolia

Tab. 2.1 Srovnávací tabulka výrobních strategií

Ve vztahu k dizertační práci je důležitý zejména bod 3, jehož důsledky nejsou v tabulce výše řešeny, nicméně mají zásadní vztah směrem k tématu práce. V této souvislosti jsou myšleny veškeré náklady na splnění požadavků výroby, včetně ceny technického návrhu. Přechod z hromadné výroby na MC vytváří požadavky na flexibilitu výrobu a plánování. Záleží na náročnosti těchto požadavků, nicméně jeden ze znaků kvalitní implementace MC je dosažení ceny blízká ceně hromadné výroby i za těchto složitých podmínek.

Výše zmíněná problematika, byla diskutována s pracovníky společnosti Kompan Czech republic s.r.o. v Brně (dále jen KOMPAN), která od přesunu výroby do České republiky v roce 2007, prodělala růst množství a komplexity vyráběných produktových řad dílů společně s procentuálním nárůstem zákaznických variant. CNC obráběné komponenty na těchto produktových řadách jsou stále složitější, což lze vidět na obrázku níže (Obr. 2.4). Průměrný strojení čas připadající na zpracování metru plochy polotovaru se zvýšil více než dvojnásobně z 6 minut na 17 minut. Rovněž se zvýšil počet dílů jednak rozšířením portfolia a jednak větším množstvím barevných variant. Očividně protikladem jsou společnosti, praktikující zakázkový vývoj (ETO) a přecházející na MC, kde by mělo být dosaženo snížení požadavků na komplexnost úkolů výrobního oddělení, tedy i procesů a ve výsledku i kratší výrobní časy a nižší cena produktu.



Obr. 2.4 Zvyšování složitosti dílů obráběných z HDPE[2]

Z hlediska ceny jsou důsledky přechodu z hromadné výroby nebo zakázkové výroby na MC opravdu protichůdné případy, kdy v jednom případě (KOMPAN) náklady mírně rostou a v druhém dramaticky klesají, avšak z hlediska souvislosti s analýzou a

[2] High density polyethylene - Polyethylen s vysokou hustotou

monitoringem stroje je situace jiná. V obou případech dochází k přerušení stávajících zpětných vazeb z výroby zpět do procesu a místo těchto musí být vytvořeny nové. V případě přechodu z hromadné výroby je toto způsobeno očividnou eliminací možnosti jednoduchého zpracování, porovnání výstupů. Konkrétní příklad z praxe je, že vinou prohnutého materiálu bylo na 2 kusy velmi malé zákaznické varianty standartního produktu, spotřebováno 16 kusů polotovaru. Nicméně dále bylo vyrobeno dalších několik stovek kusů standartního provedení a to bezchybně. Vzhledem k tomu, že standartní výrobek a zákaznicky modifikovaný mají různá interní čísla, přesto že jsou až na malý detail identické, objevil se modifikovaný výrobek v rámci měsíčního výpisu TOP10 nejkritičtějších položek, přestože při zahrnutí standartní výroby by to tak kritické zdaleka nebylo. Ve statistice hromadné výroby k mystifikaci tvrdými daty dochází mnohem obtížněji, což opět dokazuje, že nástroje, které umožní inteligentně zpracovávat velká nesetříděná data a vytvářet z nich věrohodné výsledky jsou a budou velmi důležité.

Seznam překážek MC:

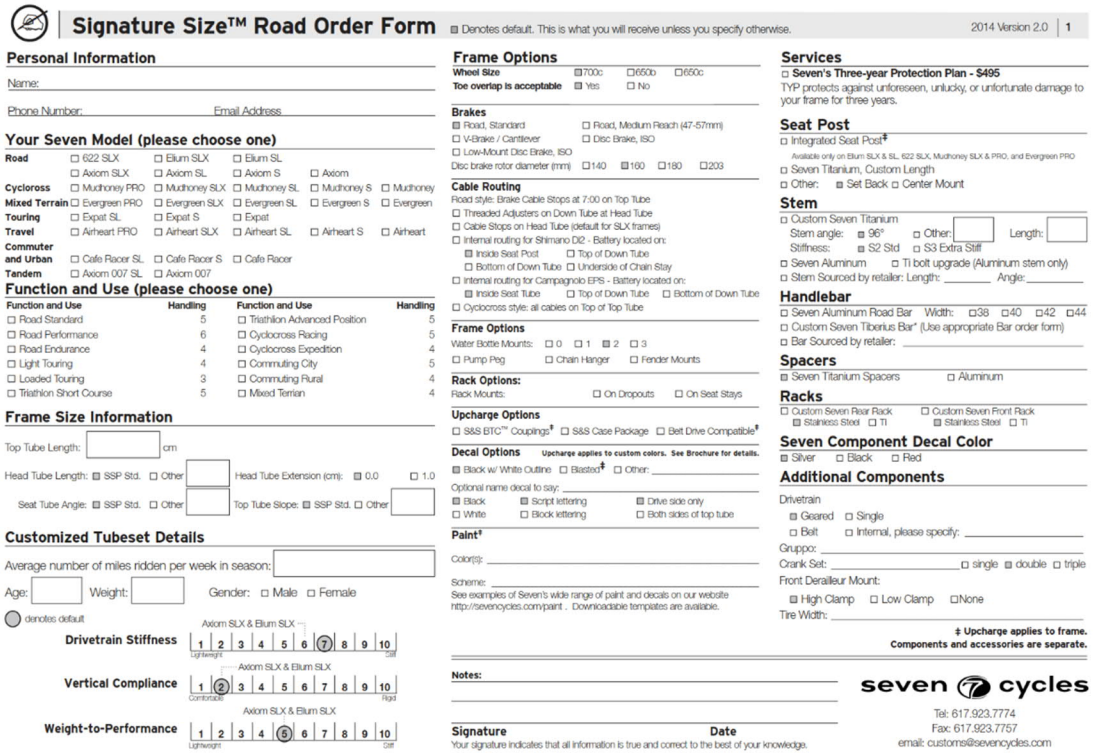
- Kusovník generovaný z neznámých položek.
- Plánování kapacit z hrubých dat.
- Obtížné předpovědi spotřeb, dodavatelský řetězec musí mít online přehled o příchozích objednávkách kusu, který dodává.
- Řetězec musí být připraven, že MC je nutné zavést u všech dodavatelů. Například i lakovna musí podporovat časté změny. Toto s sebou nese problémy spojené s logistikou menších dávek.
- Schopnost přizpůsobovat pracoviště a linky množství a diverzitě příchozích zakázek.
- Proměnlivost tvarů materiálů, nárok na přípravky, lepící prostředky, skladovací prostory.
- Vyšší náklady na jakoukoli automatizaci dané širším portfoliem.
- Dokumentace balení a montáže.

V prostředí, kdy není známý tvar výrobku, se může dramaticky lišit náročnost jeho výroby, každá součást není přesně nanormovaná a jsou-li součásti vyráběny společně (přířezy, výpalky, frézování z desky), může to vyžadovat obtížně predikované nároky. V této situaci, kdy nejsou známy přesné nároky na výrobu, je obtížné určit navazující profese a potřeby. Ať už lidské zdroje nebo materiální. Zatímco energetická náročnost sériové výroby s nízkou variabilitou je plně předvídatelná nejvýše s využitím elementární matematiky, zákaznická výroba vyžaduje jiný přístup. Z hlediska dodavatelského řetězce nároky na zlepšování komunikace a sdílení informací nejen v reálném čase, ale navíc i formou kvalitních forecastů[3], založených na zkušenostech podniku. Z tohoto úhlu pohledu je důležité, že zde nejsou myšleny jen komponenty a součásti nezbytné pro výrobu, ale také veškeré nakupované komodity. Cílem technologie inteligentní sítě (Smart Grid) je úspora energie, snížení ceny a zvýšení spolehlivosti. Prostředkem ke splnění cílů jsou inteligentní měřiče, které místo registrace spotřeby v daném místě, monitorují i průběh. V momentě, kdy budou podniky schopny dávat předpověď této spotřeby s předstihem a umožnit elektrárnám reakci na náhlé špičky, budou elektrárny schopny hledat efektivní řešení, jak tyto

[3] V češtině by se dalo nazvat předpověď, jedná se obvykle o odhad založený na zkušenostech a datech z předchozích let.

extrémy pokrýt, zatím co dnes, musí hledat pouze rychlá řešení (Vijayaraghavan & Dornfeld 2010).

Dost často se v literatuře objevuje pojem BOM, což je termín označující v anglické literatuře kusovník, resp. rozpisku, tedy tabulku položek, ze kterých se produkt skládá. Zajímavé na MC je, že se předpokládá přijetí objednávky na míru zákazníkovi, tedy v extrému objednávky neznámých dílů. Více lze vidět na formuláři níže. V hromadné výrobě si zákazník objedná v podstatě BOM rámu kola + příslušenství a jedná se tedy a množství skladových položek. Hromadná customizace znamená, že se nejméně jeden komponent (v tomto případě rám), vyrábí na míru, takže musí být od začátku do konce výroby označen individuálním číslem součásti. Na příkladech, které vytváří sice omezené, zato obrovské množství kombinací, lze vysvětlit i složitější procesy, kdy nelze výsledný produkt popsat jinak než výkresem nebo 3D modelem.



Obr. 2.5 Formulář pro objednání kola na míru (Seven Cycles 2017)

V tomto směru funguje například automobilka Ferrari. Přijímají objednávky do výrobní fronty často značnou dobu před započetím výroby a samotná konfigurace probíhá přímo v Maranellu ve speciálním ateliéru, kde si auto čtyři měsíce před výrobou konfigurují. Nicméně nejde jen o konfiguraci, ale o speciální postupy hromadné customizace. Na míru například tvarují speciální anatomické sedačky. Zákazníci si ale vybírali nové auto mnohem dřív a jen podle obrázků. Mnohdy auta objednávají ještě před jejich oficiálním představením. (Boër et al. 2013)

Všechny výzvy MC, zmíněné výše, již jsou v publikacích řešeny (Fogliatto et al. 2012), avšak více než na úsporu z rozsahu (managing economies of scale and economies of scope), by bylo dobré se zaměřit na udržitelnost obecně a speciálně na enviromentální udržitelnost. Je zde tedy souvislost s pojmem Ecodesign, což je inteligentní výrobní proces zahrnující optimalizaci a sebekonfiguraci za účelem dosažení vyšší efektivity.

2.3 SOUČASNÝ STAV PRŮMYSLU

Požívání IT v průmyslu není důsledek implementace výzvy Industry 4.0, jedná se o logický vývoj, který nicméně naráží na hranice nikoli technické, protože ty jsou obrovské a stále rostou, ale naráží na hranice lidské představivosti a uvažování. Implementace ERP[4] a jiných systémů řízení výroby a dat již dosáhla v řadě případů téměř dokonalosti. Již neexistují jednoduché zásahy, které udělají výrazný posun vpřed. Toto nastalo právě ve chvíli, kdy dochází k masivnímu rozvoji SW a HW pro virtuální realitu a s tím souvisejícím poklesem ceny. Aby bylo možné dosáhnout opravdového průmyslového rozvoje, nestačí jen připravené demonstrátory. Musí být k dispozici naprosto samozřejmá a 100 % integrace vizuálních dat a ostatních systémů. Toto může být důvodem, proč se velcí hráči na poli zpracování dat a CAD systémů rozhodli své služby obohatit o tyto prvky a dotáhnout jejich integraci na výše zmiňovanou úroveň. Například v roce 2011 SAP, hlavní hráč na poli ERP, koupil společnost Rigth Hemisphere, která se zabývala pokročilou vizualizací CAD dat (SAP 2011). Produkt integrovali do portfolia ani ne rok po akvizici. V tento moment je již tato aplikace nedílnou součástí rodiny produktů a poskytuje více než jen obrázek produktu v ERP. Poskytuje možnost kompletní virtuální prohlídky, tedy potenciál, který je budován dnes, aby byl plně využit v blízké budoucnosti. Například společnost Autodesk udělala to stejné s produkty společnosti Opticore AB a PI-VR a rovněž zaintegrovala tyto produkty do své rodiny. A takto to udělalo mnoho a mnoho dalších důležitých korporací.

Za těmito kroky lze opět hledat hypotézu, nikoli data (3D model, point cloud[5], NURBS[6] a podobně), ale informace jsou to, co bude rozhodovat. Rozdílný je pouze čas, který operátor ušetří tím, že nemusí informace hledat v těchto datech, ale dostane tuto informaci naturálně, pokud ji potřebuje ke splnění úkolu.

Vývoj v oblasti poskytování informací, v prostředí vytvořeném s podporou počítačové grafiky, probíhá stále ve 2 hlavních směrech. Jednak je to rozšířená realita, která byla již dříve definována jako technologie kombinující reálné a virtuální objekty v reálném prostředí, to vše pochopitelně v aktuálním čase. Díky zvyšujícímu se počtu aplikací a pokroku, je možné říct, že umožnuje také interakci reálných, virtuálních objektů a naopak. Největší výzvou je kalibrace nebo zaměření pozice kamery vůči prostoru, a nejčastěji se z technických úloh, tedy mimo herní průmysl, řeší úlohy virtuální montáže, servisu a medicínských zákroků. Druhý hlavní směr je virtuální realita, kde je uživatel plně vtažen do virtuálního prostředí, v tomto směru lze studovat množství publikací zaměřené na prezentaci strojů, událostí a dat.

2.4 VYUŽITÍ VIZUALIZACÍ V PRAXI

Mnoho světových lídrů a velkých firem se intenzivně zabývá otázkou vývoje zařízení pro vizualizaci, komunikace a obecně podporou výzvy Industry 4.0. Například nadnárodní korporace Bosch Rextroth se vývojem v tomto směru zabývá ve spolupráci s universitou (Obr. 2.6). Není snadné najít odpověď na otázku, co vede nadnárodní korporace, které normálně používají komerční softwary a systémy, vyvíjet jejich vlastní

[4] Enterprise Resource Planning je označení pro podnikový informační systém.
[5] Data tvořená velkým množstvím jednotlivých bodů. Jejich nahromadění pak vytváří dojem prostoru
[6] Non-uniform rational basis spline je matematický model běžně používaný v počítačové grafice pro generování a reprezentování křivek a ploch.

řešení. Nicméně je možné alespoň nastínit možnosti na základě logického chování v podobných případech.

Jestliže je společnost schopná zakoupit funkční produkt, je obvykle její prioritou platit poplatky s údržbou software, než provádět vlastní vývoj a následně údržbu. Pokud je tento předpoklad správný, pak pravděpodobně bude platit jedna z následujících možností nebo jejich kombinace. Tyto je vhodné analyzovat a nejlépe se při formulaci řešení vyhnout všem těmto možnostem nebo navrhnout opatření, která by jim předcházela a tím i případným odmítavým postojům k navrženému řešení.

- Datová politika

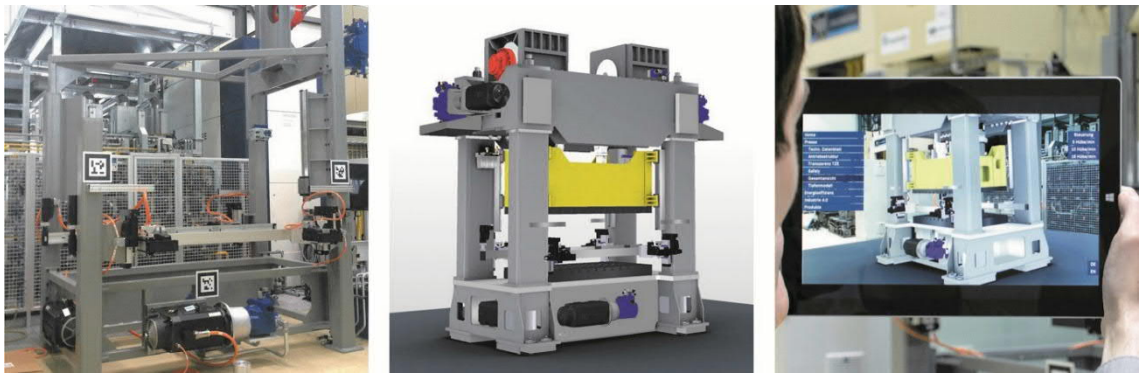
Pro opravdové nasazení by měl systém umožnovat zpracovávání dat ze širokého množství oddělení a nejlépe v cloudu, jak již bylo zmíněno. Pro velké korporace s extrémně přísnou politikou ochrany dat, mezi které například Bosch Rexroth patří, není ale vůbec přijatelné zvažovat řešení využívající cloud, přístup na server mimo firmu, a jejich IT kodex považuje takové šíření dat za nepovolené. Jednak by implementace a propojení všech možných serverů a služeb byla extrémně náročná a také by to znamenalo, že se do jednoho „bodu“ informačního systému soustředí přístupy na veškerá data firmy a na ně se nainstaluje software dodavatele. I pro menší firmy by bylo nezbytné při každé výměně dat použitých pro tuto práci, podepisovat dohodu o mlčenlivosti.

- Nedostupnost

Jednoduše není řešení, které by odpovídalo požadavkům těchto firem a neexistuje ani podobné řešení, které by se dalo těmto požadavkům jednoduše přizpůsobit.

- Vlastní obchodní záměry

Společnosti vyvíjejí řešení, aby je pak dále nabízely třetí straně a využily ho tak pro svoji propagaci nebo další prodej licencí.

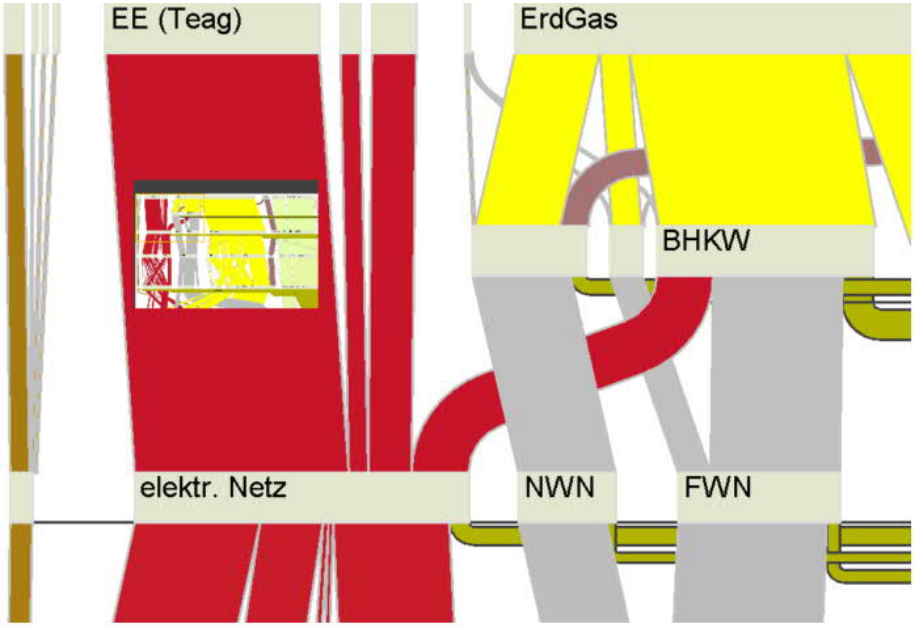


Obr. 2.6 Produkt s markery a vizualizace na tabletu (TU Chemnitz 2015)

Pro vlastní práci není důležité to, který z výše uvedených důvodů stojí za tím, že firmy vyvíjejí řešení pro využití virtuální reality v praxi ve vlastní režii. Důležité je to, že korporace s obrovským přehledem a množstvím finančních prostředků investují do tohoto nového a z výše uvedených důvodů i jistě důležitého odvětví. Publikací z oblasti analýzy dat, vizualizace, virtuální reality, Smart factory nebo Industry 4.0 je nepřeberné množství a tvoří ucelený základ dalších výzkumů a experimentů, nicméně jednotlivě se týkají práce buď okrajově, nebo jen částečně. V následujících odstavcích jsou popsány podle toho, jakým způsobem se týkají vlastní práce.

2.4.1 VISUALIZACE INFORMACÍ

Možnosti, jak graficky zobrazit pomocí animace průběh toků veličiny ve 2D prostoru se jistě datují do dávné historie. Z různých přístupů byly zajímavé Sankey diagramy spolu s využitím počítačové podpory na volbu úrovně detailů, které mají být zobrazeny. Úroveň detailů je dána nejmenším prvkem grafiky, který lze rozlišit, lze mluvit též o rozlišení. Energetické uzly, které mají být zobrazeny v aktuálním pohledu, jsou dané filtrováním. V případě obsáhlých dat s řadou souvislostí jako je distribuce energie ve městě (Obr. 2.7) (Riehmann et al. 2005) je možné díky proměnnému rozlišení na monitoru zobrazit vždy jen to, co je schopno rozlišit lidské oko. Zato díky filtrování je možné zobrazit to, co je operátor schopen ještě zahrnout do souvislostí. Díky kompromisu mezi rozlišením a filtrováním se dokáže operátor soustředit na jednotlivé větve a částečně i na vztahy mezi nimi.

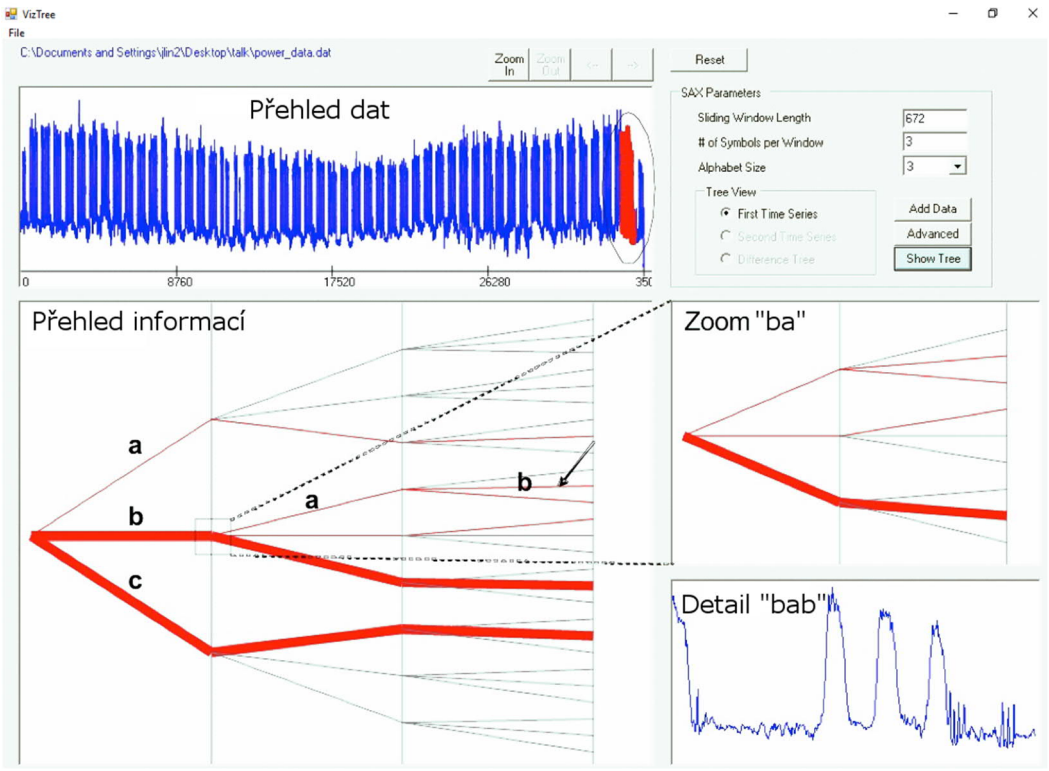


Obr. 2.7 Sankey diagramy s distribucí energie ve městě, zvětšení

Z hlediska přístupu k vizualizaci informací má nejblíže k zadání této práce řada prací autorů, vycházející z poznatků popsaných na Univerzitě Maryland, pod vedením prof. Shneidermana. V dnešní době známé principy popsal v roce 1996 Mantrou vizuálního hledání informací: „Overview, zoom & filter, details-on-demand" přeloženo „Nadhled, přiblížení a filtry, detaily na vyžádání". Mantra proto, že v jeho díle ji napsal přesně desetkrát pod sebe, a to přesně jednou za každý projekt, ve kterém se přistihl při znovuobjevování uvedeného principu. (Shneiderman 1996). Je potřeba zopakovat, že mantra pochází z doby, kdy nejdražší mobilní telefon zrovna přišel o teleskopickou anténu a měl dvouřádkový displej. Jednou po tom, co objevil důvod nepochopitelné odchylky statistiky nemocniční pohotovosti z důvodů, chybně vyplněného data narození a stáří 8 pacientů nastaveného na 999 let, řekl „Mnoho lidí ve světě statistiky a data miningu se ani nepodívá do dat".

Velmi zajímavé jsou nové přístupy týkající se rozpoznávání netriviálních vzorů v datech s dlouhou časovou základnou (Lin et al. 2005), jenž také staví na stejných základech. Autorka v něm popisuje softwarové řešení určené pro analýzu telemetrických dat v průběhu zkoušek před vysláním sond do kosmu, jako součástí projektů zastřešených Ministerstvem obrany USA. Řada sledovaných parametrů musí

být vzájemně porovnávána, a to jak v dlouhém časovém období, z hlediska stability, tak i přímo před okamžikem startu. Kontrolní místnosti startu jsou údajně opravdu stejné jako v Hollywoodských filmech, tedy plné lidí, kteří sledují hodnoty a vydávají povolení ke startu. Její aplikace využívá „slovního popisu“ dat. Jednotlivé signifikantní data - špičky dané odchylkou od střední hodnoty, popisuje písmeny a z nich pak skládá slova. Graf (Obr. 2.8) zobrazuje data ze spotřeby zaznamenávané každých 15 minut v roce 1997, celkem se tedy jedná o 35040 datových bodů, kdy bylo použito nastavení plovoucího okna na 672, tedy na jeden týden, a počet segmentů a znaků abecedy shodně na 3. Tenké čáry v grafu zobrazují abnormality v týdenní spotřebě závodu. Tenká čára označené větve označuje abnormalitu v podobě týdne, kdy byl čtvrtek a pátek volný. Ostatní tenké větve jsou týdny, kdy byl jeden den volný z důvodu státního svátku ve Velké Británii. Tyto větve vycházejí z důvodu filtru nastaveného na hodnotu 3 ze standartních 5 denních týdnů.



Obr. 2.8 Anomálie ve spotřebě daná zkráceným týdnem během Vánoc

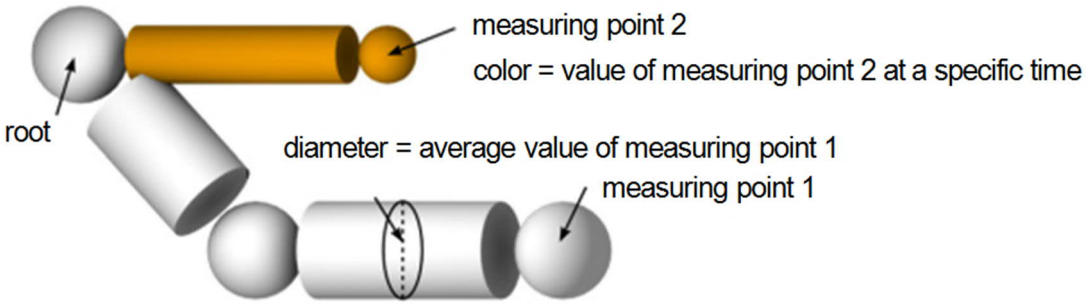
2.4.2 VIRTUÁLNÍ REALITA VE VIZUALIZACI

Využití imerzní virtuální reality pro podporu práce s daty, resp. pro úlohy analýzy rozsáhlých soborů technických dat, kde jako pracovní prostředí je využita virtuální místnost CAVE[7], se již autoři zabývali v minulosti (Wijayasekara et al. 2011). V tomto případě je využito pokročilé zpracování množství rozsáhlých databází o několika úrovních. Systém jako celek byl verifikován na datech, které mapují podmínky a výkony větrných elektráren a využívá pokročilých systémů zpracování dat známých jako data mining[8], které považuje za stále více nepostradatelné s tím, jak roste objem

7 Počítačově řízené virtuální prostředí.
8 Analytická metodologie získávání netriviálních skrytých a potenciálně užitečných informací z rozsáhlých souborů dat.

a komplexnost dat, které musí být zpracovány. Vizuální vyhodnocování informací vytěžených z dat, pak považuje za pokus zahrnout člověka do procesu vyhodnocování. Autor zdůvodňuje použití imerzní složky tím, že pokud se toto řeší zjednodušením do 2D prostoru, může to znamenat zásadní ztrátu důležitých prostorových a topologických informací. Autoři elegantně využili výpočetní sílu CAVE, do které integrovali modul pro zpracování dat. Tato myšlenka je zásadní v tom, že vedle sebe staví dvě stejně důležité části, nezbytné pro úspěšnou analýzu, zpracování dat a vizualizaci dat. Zatímco pro zpracování dat je potřeba výkonný procesor, tak pro vizualizaci je potřeba dostatek grafického výpočetního výkonu. Vzhledem k verifikaci na rozsáhlých datech týkajících se energetických toků je možné částečně považovat tyto zkušenosti za částečně inspirativní.

Další autoři vytvořili definici standardů pro vizualizaci dat z měření energetických toků (Obr. 2.9), konkrétně využitím virtuální reality pro analýzu energetické efektivity strojů. V první části je rozebrána transformace 2D vizualizace pomocí Sankey do 3D a výhody tohoto řešení ve srovnání s jinými přístupy. Autoři patří k prvním, kteří navrhují zobrazení naměřených dat stroje ve 3D, za účelem jejich vizualizace v imerzní virtuální realitě, přičemž pro reprezentaci využívá tzv. Sankey diagramů. Autoři používají 3D vizualizaci jen jako náhradu pro 2D vizualizaci, kterou sami považují za příliš abstraktní. Přestože jejich návrh poskytuje velmi přímý přístup k analýze rámcových souvislostí mezi měřenými proměnnými díky jejich symbolickému znázornění, neumožnuje dostatečně detailní inspekci ani žádným jiným způsobem neusnadňuje hledání extrémů a jejich souvislostí mezi extrémy. V tomto směru existuje prostor pro navržení komplexního softwarového řešení, s cílem řešit různě velké a komplexní soubory dat a jejich vzájemné souvislosti.

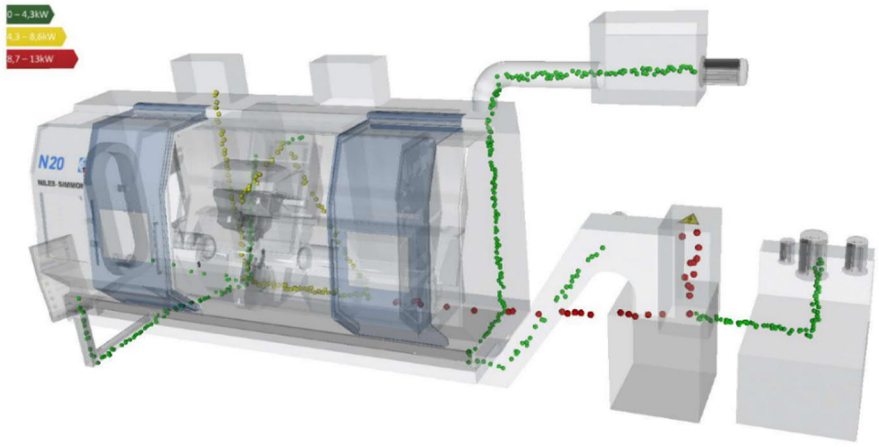


Obr. 2.9 Vizualizace s využitím Sankey diagramu (Neugebauer et al. 2011)

Výzkumná skupina ECOMATION (Schlechtendahl et al. 2013), se zabývala komunikací, která je požadována pro energeticky optimální stav zařízení. Dále jsou rozebírány způsoby předávání informací o spotřebě souběžně s předáním informace o činnost spotřebiče – stroje. V závěru jsou tyto informace sbírány z různých strojů a zařízení pro řešení optimalizace celého závodu. Autoři definovali efektivní komunikaci na úrovni stroj – linka. Využili k tomu obousměrný komunikační systém, který kontroluje po stránce spotřeby všechny spotřebiče výrobního závodu. V případě, že se stroj dostane do poruchy, systém managementu spotřeby automaticky posílá informaci do řídicího systému linky. Z uvedeného postupu, plyne jednoznačný závěr nezbytnosti obousměrné komunikace. Pro potřeby kvalitního zpracování dat spotřeby elektrické energie, hluku i vibrací jsou potřeba nejen informace o průběhu měřené veličiny, ale i

informace které umožní dohledat stav stroje a aktuální běžící proces ke každému dostatečně malému časovému úseku.

Zajímavý přistup je vizualizace energetických toků pomocí fyzického pohybu na lokální bázi a množství elementů, který vizualizaci skutečně reprezentuje (Obr. 9 Dudarev et al. 2013). Toto řešení využívá potenciál virtuální reality ve výpočetním výkonu při simulaci částic a umožnuje zajímavou a přínosnou symbolickou vizualizaci a monitoring.



Obr. 2.10 Vizualizace energetických strojů pomocí částic

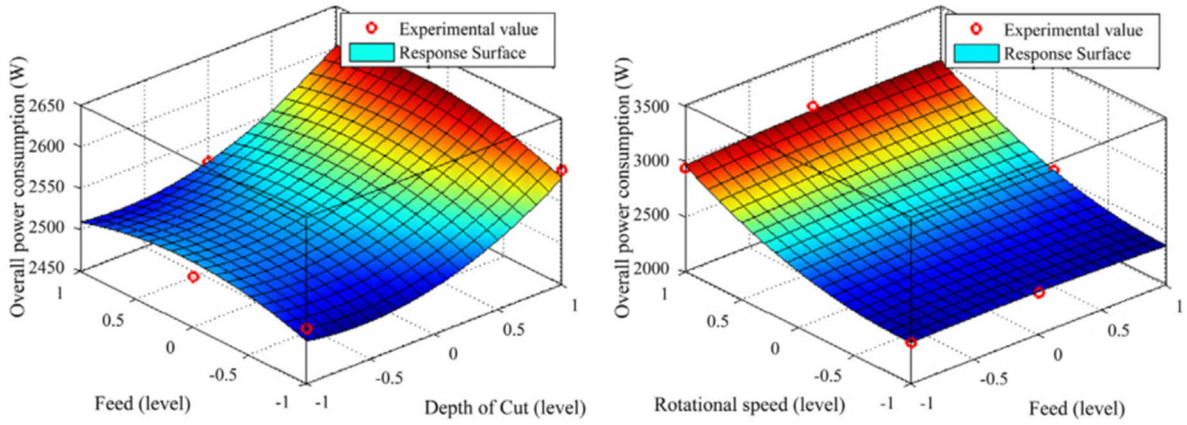
Již v roce 2014 se výzkumná firma v projektu spolufinancovaném NASA[9] (Donalek et al. 2014) zabývá konkrétně tím, jak využít analýzu ve virtuálním prostředí ve spojení s Big Data[10]. Zajímavý experiment, kde se vědci rozdělení do skupin potýkali se stejným úkolem, spočívajícím v překreslení pozic sondy pohybující se po povrchu Marsu do 2D mapy. Jedna skupina měla podporu virtuální reality spočívající v okamžitém přístupu k mapě a fotkám s pozicí, zatímco druhá postupovala konvenčně. Ne zcela jednoznačné výsledky, kdy objektivní parametry byly mírně lepší, zatímco subjektivně to výhoda pro uživatele nebyla, dávají prostor k dalšímu vylepšování i diskuzi. Je zde potřeba podotknout, že virtuálně nebyly prezentovány virtuální data, ale digitalizované. Autoři tvrdí, že je jejich cílem maximalizovat vrozenou schopnost rozpoznávání vzorů nebo vizuálního objevu použitím vznikajících technologií na bázi pohlcující virtuální reality. Popis, je velmi obsáhlý, ale v zásadě se jedná o podporu u činnosti a dějů spojených se získáváním informací jakéhokoli charakteru. Tato oblast virtuální reality bude dále v práci nazývána Časový vizualizační protokol (ČVP).

2.4.3 VIZUALIZACE HODNOT STROJE

V literatuře lze nalézt velké množství vizualizací proměnných měřených na stroji. Značnou část z nich spojuje vyobrazení ve dvourozměrném prostoru. Z hlediska předpokládané doby, po kterou měřený proces poběží, kompletnosti, orientace na výkyvy a v neposlední řadě předpokladů integrace většího množství grafů do jednoho prostoru, tento přístup není vždy nejvýhodnější. Z daleka nejproblematičtější se ukázala vizualizace více grafů v jednom prostoru. Přesto, že se jednalo o jednotná

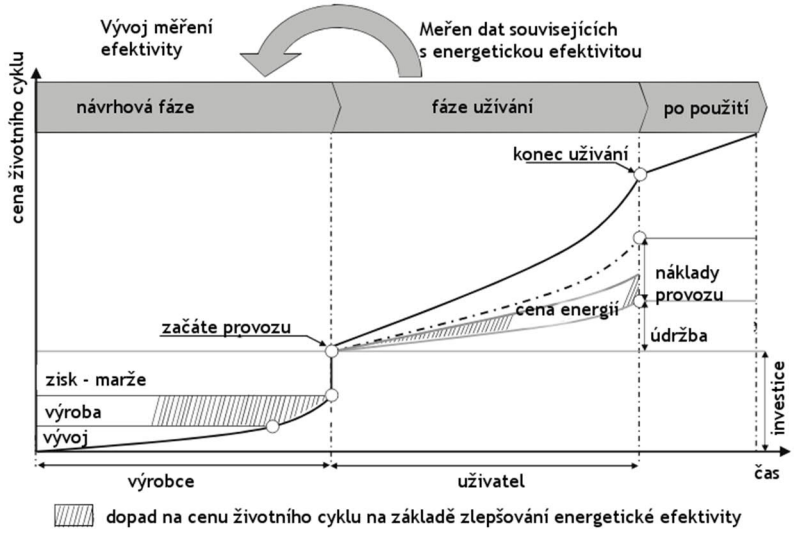
[9] Národní úřad pro letectví a kosmonautiku v USA.
[10] Velký množství často nesetříděných dat, které je možné zpracovat pouze zvláštními přístupy.

data – spotřeby os, jsou jejich vzájemné hodnoty z pochopitelných důvodů značně nepoměrné. Jeden z možných přístupů je graficky zobrazen na obrázku níže (Obr. 10 Yoon et al. 2014). Ten zobrazuje 14 různých experimentálních podmínek (bodů) pro 3 proměnné ve 3D prostoru.



Obr. 2.11 Vizualizace změřených závislých hodnot v prostoru.

Rozborem opatření k optimalizaci spotřeby strojů (Böhner et al. 2014) (Obr. 2.12) a přesnou specifikací budoucího využití stroje. Svým pojetím propojuje různé přístupy, a to jednak přístup orientovaný na stroj resp. operaci a přístup orientovaný na výrobní systémy. Tedy nejde jen o konkretizaci kusu, materiálu a operací, ale i o pozici stroje ve výrobním procesu. Využívají tzv. informační smyčku s cílem zpřesnění opatření pro zvýšení energetické efektivity stroje v návrhové fázi, a to na základě zpětné vazby z nasazení stroje resp. měření energetické efektivity na relevantních datech. Díky dobré znalosti vztahu mezi vytížením stroje ve výrobním procesu a spotřebou elektrické energie v klidu a při práci, lze zjistit v grafu energetické optimalizace oblasti, které nelze bez analýzy komplexního procesu jinak zjistit. Z toho lze vyvodit závěr pro vlastní práci a totiž, že optimalizace energetických toků obráběcího stroje by měla být prováděna na datech, které maximálně simulují podmínky využití stroje v reálném provozu nebo pomocí Discrete Event Simulation, tyto data pro vizualizaci vytvořit simulací přes modely (Turner et al. 2016).

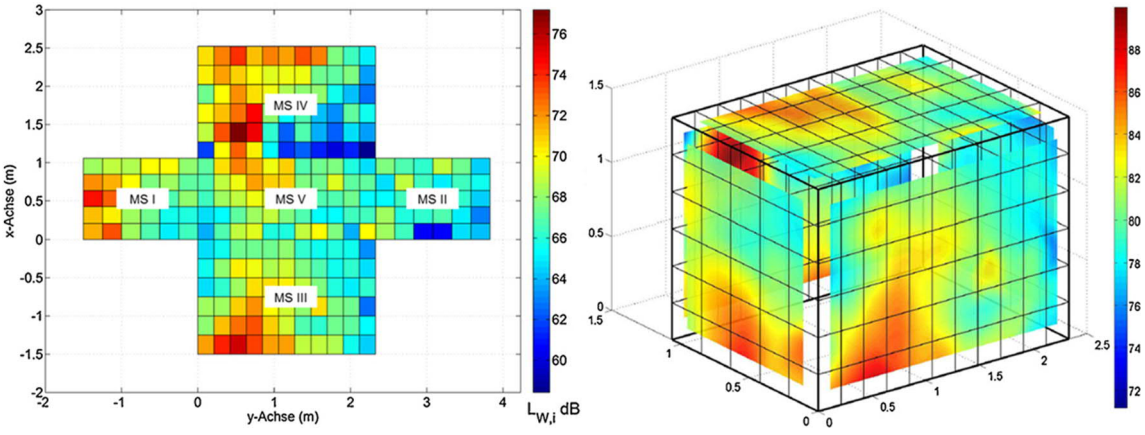


Obr. 2.12 Náklady na energie vyjádřené na grafu životního cyklu

2.4.4 VIZUALIZACE HLUKU A VIBRACÍ

Vizualizace akustických dat za účelem analýzy akustiky místnosti (Tapio & Nenonen 2006) má podobné vstupy i průběh zpracování jako vizualizace za účelem posouzení akustických vlastností stroje za provozu. Jedná se o jedny z prvních autorů, kteří využívají propojení analýzy a vizualizace v tomto případě v prostředí CAVE. Vzhledem k dataci článků se jedná o počátky postprocesingu dat v prostředí imerzní virtuální reality. Autor zmiňuje limitaci výkonem virtuálního prostředí, proto je jeho přínos především v nastínění cest pro výpočetní řešení šíření hluku, a také myšlenky pro vizualizaci zvukových charakteristik vnitřních prostředí v tomto případě, uměleckých. Jako potenciál rozvoje autor zmiňuje například možnost, kdyby mohly být dodatečně produkovány emise hluku a sledován jejich vliv na simulované prostředí. Tuto myšlenku považuji za velmi zajímavou a aplikovatelnou i pro strojírenství. Tímto způsobem je možné virtuálně přidávat, resp. přesouvat stroje a zařízení (emitory hluku a vibrací) a sledovat dopad těchto změn na plnění příslušných norem.

Využití nejnovějších vizualizačních nástrojů pro vizualizaci hluku je na obrázku níže (Obr. 2.13) (Aurich et al. 2012). Definují mapu z naměřeného hluku, kterou lze virtuálně procházet v prostředí imerzní virtuální reality. K tomu je využitá technologie označená jako Photon Tracing[11]. Využívá se interpolace dat emise hluku, při znalosti hodnot z dostatečného počtu míst. V tomto případě algoritmem, který je běžně využit k výpočtu osvětlení v počítačové grafice. Výsledná úroveň hluku na určitém místě je tak vypočítána na základě emisí intenzit okolních zdrojů hluku. Výhodou tohoto přístupu je relativně nízká náročnost na výpočetní výkon, díky silným a dobře definovaným algoritmům. Velkou nevýhodou použitého postupu je eliminace vlivu materiálu povrchu, která se může výrazně projevit na zkreslení výsledků analýzy.



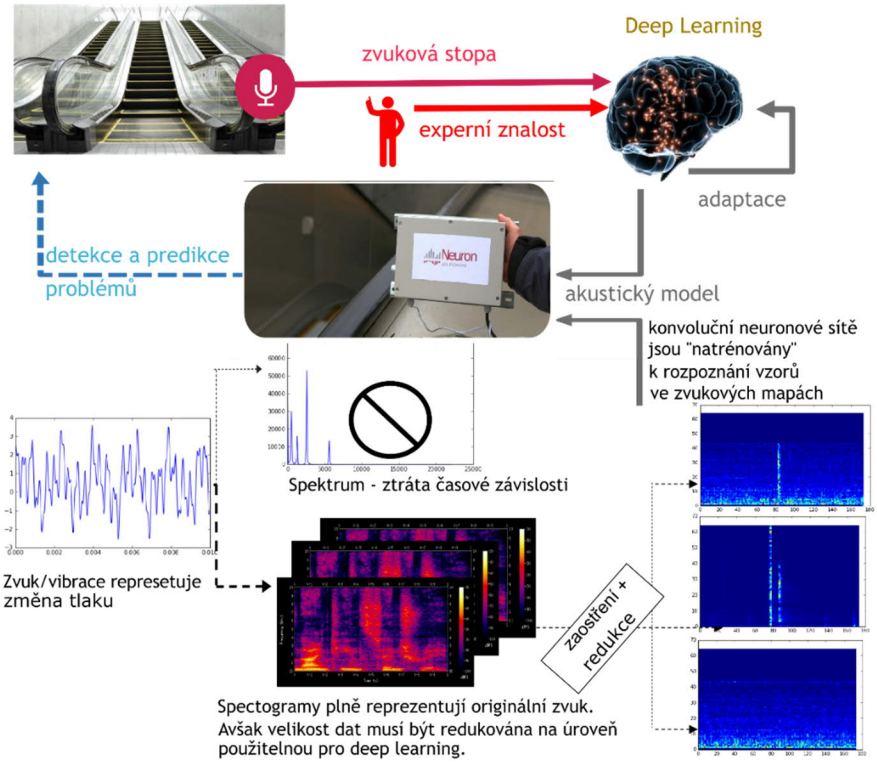
Obr. 2.13 Vizualizace úrovně hluku ve 2D a 3D prostoru

Zjevná spojitost mezi akustikou a měřením hluku v prostoru a čase, je důležitá pro návrh prostorové vizualizace šíření hluku ze strojů. (Ajaj et al. 2008). Architektura softwarové komponenty systému pro vizualizaci a analýzu akustiky v místnosti, zejména pro koncertní haly**.** Dále byla ověřena hypotéza nezbytného dělení vizualizace do modulů, které sdílejí koherentní geometrické a akustická data. Z části mohou být tyto moduly postaveny s využitím volně dostupných knihoven, resp. pod

[11] V počítačové grafice se rozumí algoritmus pro výpočet globálního osvětlení. Paprsky zdroje a kamery jsou nezávisle sledovány, dokud není splněno určité kritérium. Poté jsou spojeny za účelem získání intensity osvětlení.

různými druhy volných licencí. Konkrétní softwarové řešení v článku postrádá komparaci s ostatními dostupnými systémy.

Další příkladem zpracování dat hluku a vibrací na informace, může být nově vznikající společnost Neuron Soundware, která pracuje s nekomprimovanými krátkými zvukovými nahrávkami. Z množství těchto nahrávek se pak buduje neuronová síť. Následně firma dodá hardwarovou desku, která umožňuje predikovat nestandartní chování stroje.



Obr. 2.14 Platforma Soundware společnosti Neuron

2.5 ANALÝZY A INTERPRETACE NA BÁZI REŠERŠE

Překotný vývoj, který prodělává počítačová grafika, resp. virtuální realita v posledních letech, díky neustálému zvyšování technických možností a rostoucím výkonům výpočetní techniky, umožňuje nejen zpracování rozsáhlých dat, ale i jejich souběžnou vizualizaci a postprocesing (Häfner et al. 2014). Tato technicky orientovaná oblast již dávno není výsadou několika málo lidí z vybraných firem, ale naopak se postupně stává součástí běžného života a otevírá prostor pro vytváření cest, jak se můžou její možnosti integrovat do malých a středních podniků a být využívány každodenně širokým spektrem jedinců.

Z teoretických prací i dalších dokumentů a norem je zřejmé, že požadavky na analýzy z oblasti environmentálních aspektů, mezi které patří analýza energetických toků i plnění norem pro hluk a vibrace, neustále rostou (Holkup 2012). Stejně jako to, že existuje více možných řešení, jak dosáhnout zlepšení uvedených hodnot. Proto je nezbytné, hledat univerzální řešení vhodné pro analýzu dat obecně souvisejících s počítačově řízenými stroji. Například tedy prostorová interpolace neznámých bodů v rámci analýzy hluku, již nezapadá do rámce této práce. Samotný modul pro výpočet šíření, je totiž soudě podle rešeršní práce, samostatný vědní úkol a celkový přínos pro

ověření otázek týkající se použitelnosti analýzy dat ve virtuálním prostředí by tomu neodpovídal. Vstupním bodem tedy budou vždy vytěžená nebo částečně předzpracovaná data.

2.6 VYMEZENÍ CÍLE PRÁCE

Na základě rešerše především zdroje (Ajaj et al. 2008), byl vyvozen závěr nezbytného dělení software do modulů, které řeší zpracování a vizualizace rozsáhlých datových souborů pro různé typy datových souborů. Vzhledem k rozsahu práce a složitosti jednotlivých úkolů, se problematika řešená v rámci práce omezuje na sběr, postprocesingu, analýzu a vizualizaci dat do jednoho souhrnného výstupu nazývaného časový vizualizační protokol stroje (ČVP).Na základě (Böhner et al. 2014) byl vyvozen závěr nezbytné optimalizace z pohledu procesu, resp. konkrétního úkolu (např. obrobení vnější kontury), místo jednotlivých operací (přejezd, nájezd do záběru), tak aby byly vždy zachovány souvislosti, tak jak definuje vizualizační mantra (kapitola 2.4.1). Tento úhel pohledu umožnuje zacílit optimalizaci výrobního procesu dle jeho charakteru. Experimentální ověření je vhodné provést na kusové výrobě s velkým seřizovacím časem. U této výroby je nutné mnohem obtížnější optimalizovat požadované parametry stroje, jako jsou energetické toky nebo rychlost práce stroje v klidu. U velkosériové výroby je možné a ještě efektivní stroj manuálně odladit na jednotlivé součásti, u kusové musí vše fungovat samočinně v rámci procesu.

Cíle práce jsou:

- Vytvoření definice časového vizualizačního protokolu stroje, který bude zobrazovat časový průběh hodnot vybraných veličin a bude umět porovnávat různé dosažené výsledky stejného procesu.
- Vytvořit a následně ověřit algoritmy pro vyhledávání a zpracování anomálií v datech s nesouměrnými kmity a střední hodnotou, jejichž výstupy budou graficky zobrazeny.
- Ověření analýzy dat ve virtuálním prostředí pomocí časového vizualizačního protokolu.

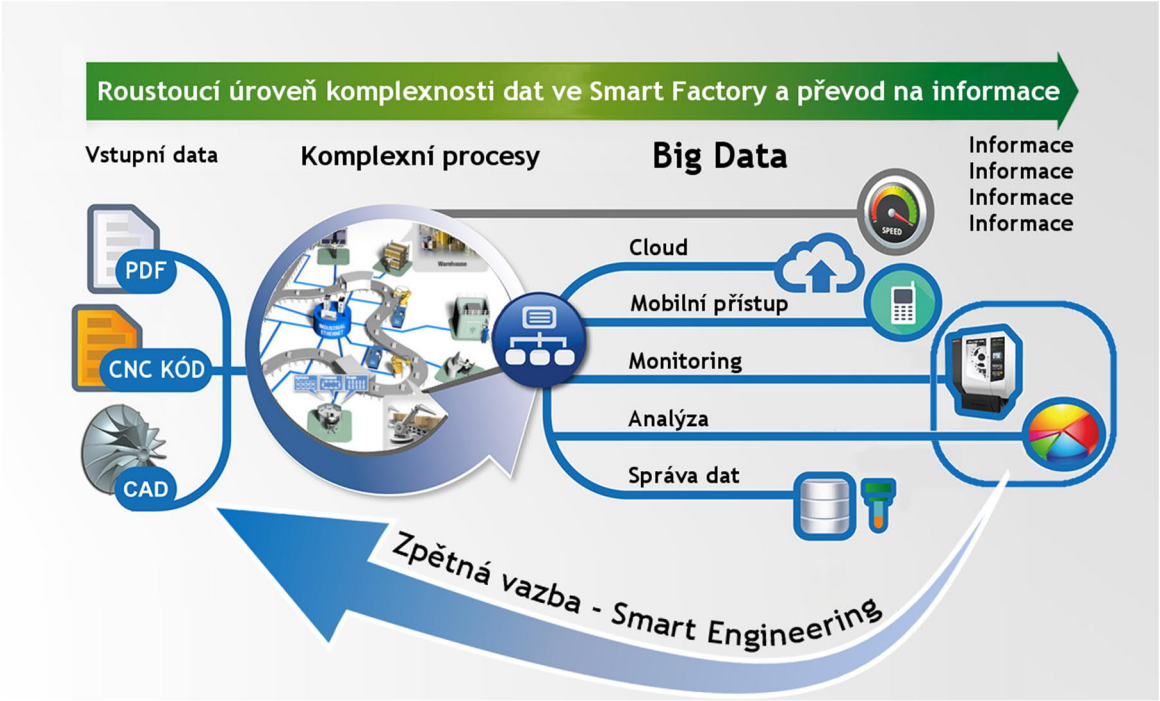
2.7 NÁVAZNOST PRÁCE NA ŘEŠENÉ VaV PROJEKTY

- Ecodesign ve stavbě obráběcích strojů (FR-TI3/655, 2011-2013, MPO/FR)
- Byl vyvinut měřící systém pro měřené energetické spotřeby vybraných spotřebičů na stroji. Data z měření na demonstrátoru jsou využity v rámci přípravy dizertační práce a bude proveden návrh na jejich převedení do podoby protokolu ČVP.
- Environmentální a bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů (FSI-S-11-5)
- GREEN PRODUCTION – PRODUCTION MACHINEs AND EQUIPMENTs (FSI-S-14-2401)
- Zaměření budoucí disertační práce na Ecodesign návrhu strojů a environmentální aspekty provozu obráběcích strojů je v souladu s výše uvedenými VaV aktivitami a tématy, řešenými na UVSSR, ať již se jedná o projekty ukončené nebo navazující aktivní projekty.
- Podpora vývoje způsobilých strojů (FR-TI3/780)
- Téma vlastní dizertační práce navazuje na výsledky projektu, mimo jiné na Jednoduchý informační systém umístěný na webových stránkách http://jis.uvssr.fme.vutbr.cz. Navržený software pro měření hluku a vibrací bude reflektovat odkazy na normy resp. zprávu Měření hlučnosti obráběcích strojů – metodika, normativy.
- NETME Centre Nové technologie pro strojírenství (CZ.1.05/2.1.00/01.0002)
- NETME Centre PLUS (LO1202)
- Pro řešení tématu vlastní dizertační práce jsou a budou využívány zařízení a přístrojové vybavení pořízené v rámci výše uvedených projektů. Z těch klíčových se jedná o využití CAVE pro vizualizaci ve virtuální realitě a demonstrátor KOVOSVIT MAS MCV-754 QUICK.

Z hlediska návazností jsou výsledky této práce použitelné pro řešení úloh monitoringu a vizualizace energetických toků, ergonomických parametrů, jako je šíření hluku a vibrací u strojů a obecně všech dalších časově závislých veličin měřených i strojů.

3 ČASOVÝ VIZUALIZAČNÍ PROTOKOL

Na základě dat získaných rešeršní činností byl definován virtuálně podporovaný proces. Takový proces musí umožnit zobrazování informací, které musí být velmi jednoduše čitelné. V předcházejících publikacích (Augste et al. 2014) byla řešena možnost využití interaktivních Sankey diagramů pro vizualizaci energetických toků. Tato funkce bude nyní povýšena na základě principů pro virtuální schvalování Virtual Commissioning (Oppelt & Urbas 2014). Souhrnně se tedy jedná o Časový vizualizační protokol (ČVP), kdy v rámci této práce jsou řešeny vybrané provozní vlastnosti stroje, nicméně obecně může být časový vizualizační protokol vztažen i k procesu nebo zařízení.



Obr. 3.1 Datové schéma Smart Factory

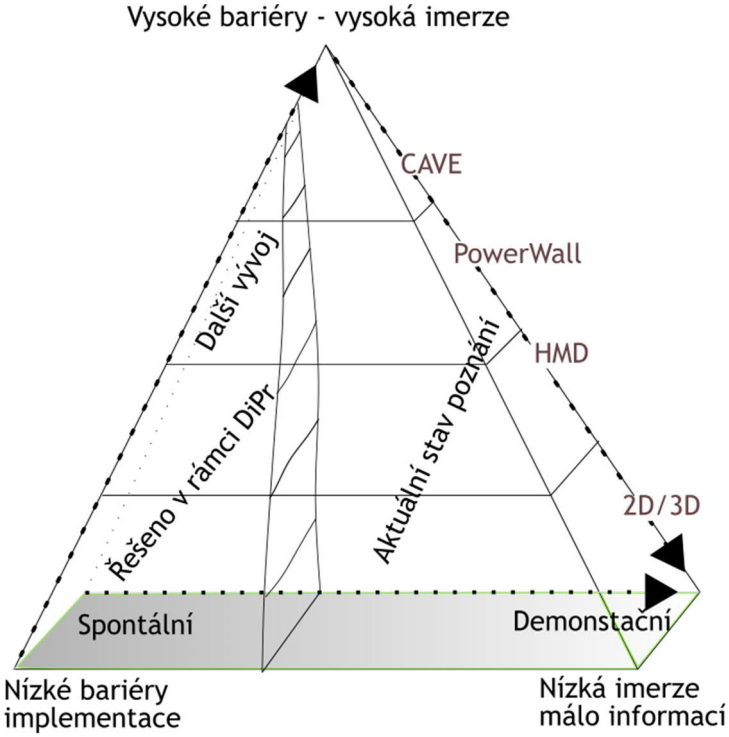
V případě ČVP s podporou imerzní virtuální reality jde stále o virtuální podporu procesu. Zásadní rozdíl mezi virtuální podporou a plně virtuálními technologiemi je v účelu i velikosti bariér pro implementaci. Podporovaný proces není z virtuálního prostředí přímo řízen, postrádá interaktivitu ale ne zpětnou vazbu pro uživatele. Nevyžaduje akce pro běh ve fyzickém prostředí, ale také neumožnuje běh korigovat. Proto je snadnější na implementaci, jeho podstatou je synergie se systémem kontinuálního zlepšování. Podpory virtuální reality je možné využít více způsoby. V prostředí virtuální reality pro potřeby výuky a školení zaměstnanců a jejich přezkoušení. Stejně tak je možné nebo pro hledání rozdílů, vyhodnocování a práci s daty, které byly zaznamenány během předcházející realizace. Nicméně pro práci s imerzním ČVP je vstupní podmínkou, že operátor úlohu zvládne bez zpětné vazby a soustředí se na práci. Tuto interaktivitu postrádá virtuální systém především proto, aby nerušil uživatele od plynulého a plnohodnotného plnění svého účelu a cíle, kterým je poskytovat informace, které jsou v danou chvíli a na daném místě potřebné.

Inspirací pro aplikaci těchto technologií v průmyslu mohou být vizualizace během živého přenosu sportovního utkání, kde divák jakožto operátor dostává online

doprovodné údaje o linii offsidu, nicméně tyto informace se nepoužívají pro vlastní hodnocení hry, protože to není efektivní, zajímavé, nezbytné a podobně. Zde je oceněna především poskytnutá informace a výhoda spočívá právě v její jednoduchosti a vizuálním pojetí. Nejvýhodnější na tomto pojetí je, že získání informace, která se predikuje jako užitečná, nevyžaduje žádnou další aktivitu ze strany diváka. Triviální formulace, nicméně její dodržování není ani triviální, ani samozřejmé. Pokud nemá vizuální dokonalost extrémní dopad na měřitelný výstup a v případě, že se jedná o technickou aplikaci, měl by mít technický přínos přednost před úrovní imerze-realističnosti, a to i přesto, že samotná imerze je velmi důležitá.

Další rozdíl, který lze popsat je, že u ČVP není cílem řídit proces na základě informací, ale zjednodušit, zpřesnit rozhodování, kde je nezbytné mít klíčové informace v předzpracované podobě, což znamená, že těchto informací může být méně, ale zato musí být mnohem exaktnější. Rovněž je nezbytné označit data, která k rozhodování nejvíce přispěla. Pokud bychom tyto možnosti popsali z hlediska sumy toku dat, tak zatím co ve virtuální realitě teče nejvíce dat mezi operátorem a systémem, u ČVP teče v tomto směru dat nejméně.

Jako v mnoha jiných případech i zde nemusí být rozhraní mezi výše uvedenými technologiemi úplně jasné a jednoznačné. Často dochází k prolínání, proto byl na základě rešeršní práce sestaven graf, který názorně popisuje výše uvedené informace. S tím, jak je pyramida vyšší se zvyšují i bariéry pro implementaci. Ty mohou být především finanční, ale také praktické. Mohou být jednorázové (investice, školení, negativní dopady implementace) a dlouhodobé (pravidelné licenční poplatky, servis, poruchovost). V další ose, a to zleva doprava se zvyšuje složitost příprav od vzniku požadavku do zahájení analýzya rychlost získání hodnověrných výstupů. Technologie označované jako spontánní, lze použít okamžitě na libovolnou charakteristickou úlohu, zatímco plně demonstrační úlohy vždy potřebují nějaký čas na zpracování a nedovolí všechnu práci udělat takzvaně za pochodu.



Obr. 3.2 Pyramida imerze

Pro možnost zapojení vizualizace ve výzvě Industry 4.0 je důležité nadefinovat framework (rozhraní) s možností variability měření v případě měření na jednom stroji, s možností zahrnutí a porovnání výsledků v globálním pohledu v případě měření procesu nebo výrobní linky.

Možnosti interaktivních vizualizací veličin proměnných v čase a různých procesů byly představeny dříve (Riehmann et al. 2005). Stejně tak se již podrobněji kolegové zabývali využitím virtuální reality pro analýzu rizik (Niesen et al. 2016). Plošné řešení vizualizace je na první pohled naprosto dostačující, nicméně imerze ve virtuální realitě umožnuje nad tyto data postavit ještě jeden rozměr, který dává silnou zpětnou vazbu, a proto se následující část práce věnuje právě přechodu od plošné vizualizace k virtuální realitě.

3.1 SPONTÁNNÍ SCÉNÁŘE

Vlastní definice bude postavena na vysvětlení pojmu technologický demonstrátor. Ten se pochopitelně mnohem častěji využívá k rychlejšímu vývoji. Poskytuje totiž lepší představu o cíli vývoje. Pro technologický demonstrátor je úloha připravena předem nebo je známý její průběh. Jeho koncepce závisí především na postprocesingu a vyhodnocení. Informace o požadavcích uživatele jsou předem zadány, a pokud ne, tak se vybírají z přichystaných variant a scénářů. Pro plné nasazení inteligentního IT v průmyslu je nezbytné rozpracovat i koncepty přesných protipólů technologických demonstrátorů. Následující kapitola se z tohoto důvodu zabývá, definicemi utváření takových scénářů, aby jejich testováním vznikl sice také demonstrátor, nicméně postavený naprosto univerzálně, bez zanedbání hlavních parametrů a ignoraci naprosto nedostupných technologií. Výhody, resp. nezbytné podmínky spontánních technologií:

- Nezávislosti na stroji, prostředí, okolnostech
- Rychlé zaučení operátora
- Nízké bariéry implementace
- Podpora machine learning[12]

Určitou míru spontánnosti představuje mobilní rozšířená realita, a i když dochází k vývoji například v podobě projektu Google Tango, za účelem snížení nároků a zvýšení výdrže baterie, je stále obrazové zpracování poměrně náročnou aplikací. (Wagner et al. 2010). I v jeho vlastní práci se ukázalo jako problematické pokrýt stroj značkami – markery, jen za účelem sledování polohy, což navíc potvrzují i další studie (Kerpen et al. 2016). Je nezbytné navrhnout možnost, jak budou tyto problémy řešeny při vytváření spontánních scénářů. Výhodou je, že z hlediska orientace je možné spolehnout se na kontinuální obrazový tok, a tak využít intersticiální složku navigace. Naopak systémy generující data absolutně, typu Marker Tracking [13] nebo GPS, jsou vhodné pro určení polohy ve specifických případech, protože jsou energeticky hodně náročné (Azuma et al. 2001).

Spontánnost ale spočívá i v osobě operátora, jehož kvalifikace musí být co nejnižší možná, aby způsob práce mohl odpovídat realitě. V této souvislosti se dají definovat některé požadavky na obsluhu, která má být:

- Plně zaškolena a zkušená v problematice týkající se obsluhy předmětného zařízení, stroje nebo procesu. V případě CNC stroje to může být například seřizovač.

[12] Strojové učení
[13] Technologie, která rozpozná v každém snímku videa značky, z jejich pozic určuje polohu

- Pracuje 8 hodin denně, bez ohledu na to, jak často je virtuální podpora využívána. Jakákoli nezbytná přestávka snižuje procentuální vyjádření produktivity, tzn. suma normovaných časů již dokončené výroby dělená časem stráveným výrobou.
- Musí překonat bariéry implementace, takže jednotlivé úlohy musejí být splněny v kratším čase nebo se subjektivně a objektivně menším vynaloženým úsilím.

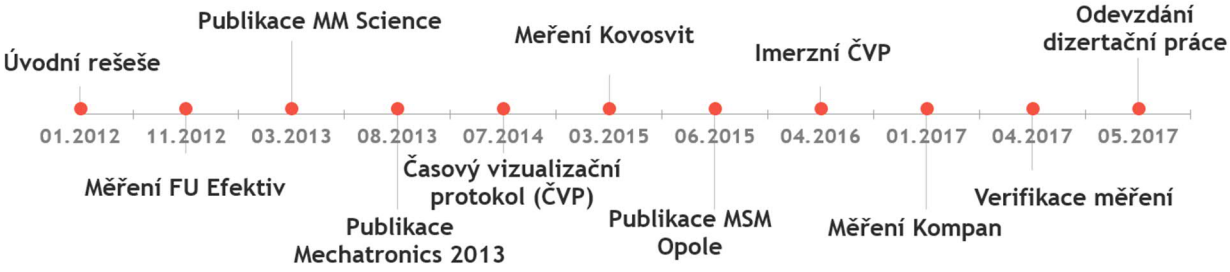
Informace, poskytované operátorovi musí odpovídat jeho:

- Pracovní pozici
- Lokaci
- Stavu

Data, resp. informace z nich generované musí být udržována v aktuální podobě, nezávisle na tom, jaká úloha je prováděná na sledovaném objektu, vzájemné pozici a orientaci uživatele a stroje. To znamená, že jsou tyto informace generované synchronně z dat do databáze a operátor je dostává s drobným zpožděním daným délkou zpracování v zásobníku nebo je systém generuje automaticky po dokončení celé operace. Z hlediska průběhu, vůči tomu co je operátor schopen z vizualizace vnímat, mohou být analyzované procesy rychlé nebo pomalé. V rámci vizualizace rychlých procesů (obrábění, práce robotů) bude nezbytné pozastavit přehrávání dat z monitoringu nebo se vrátit a využití přerušení k hlubší analýze. Naopak u velmi pomalých procesů může být využito zrychlené přehrávání. Při využití ČVP se proto nepředpokládá využití vizualizace v reálném čase práce stroje.

3.2 ČASOVÁ OSA PRÁCE

Pro přehlednost je uveden kompletní přehled provedených kroků a měření v časové ose. Závěry prezentované v této práci nevznikly najednou, ale byly formulovány postupně návazně, na základě výstupů přecházejících a je tedy důležité je prezentovat chronologicky. Dílčí výsledky byly průběžně zveřejňovány k diskuzi vědecké obce.



Obr. 3.3 Časová osa dílčích výstupů

Z hlediska měření byla provedena tato dílčí měření a využita následující data:

- Měření FU EFEKTIV (kapitola 3.3)
- Měření KOVOSVIT (kapitola 3.4)
- Měření KOMPAN (kapitola 3.5)

V rámci řešení vlastní dizertační práce byly vytvořeny, za účelem analýzy měření, následující demonstrátory, které budou objasněny v souvislosti s měřeními, pro které byly vytvořeny. V následující části textu budou jednotlivé výstupy popsány chronologicky včetně jejich souvislostí.

Pro postprocesing a analýzu:

- Generování modelu stroje pro potřeby vizualizace
- Práce na problematice Ecodesign obráběcích strojů
- EcoCAx Demonstrátor pro optimalizaci energetických toků
- ČVP – software s plným využitím virtuální reality

Pro potřebu analýzy měřených dat byly navrženy následující software:

- ECO flow – extrakce dat průtoku tlakového vzduchu a chladicí kapaliny, vytvořeno společně s kolegy z ÚVSSR.
- Video flow – odhad pohybu os stroje z videozáznamu. Vhodné pro starší stroje, které tento výstup neumožňují z řídicího systému.

Z hlediska výstupu byly vytvořeny následující kategorie výstupů:

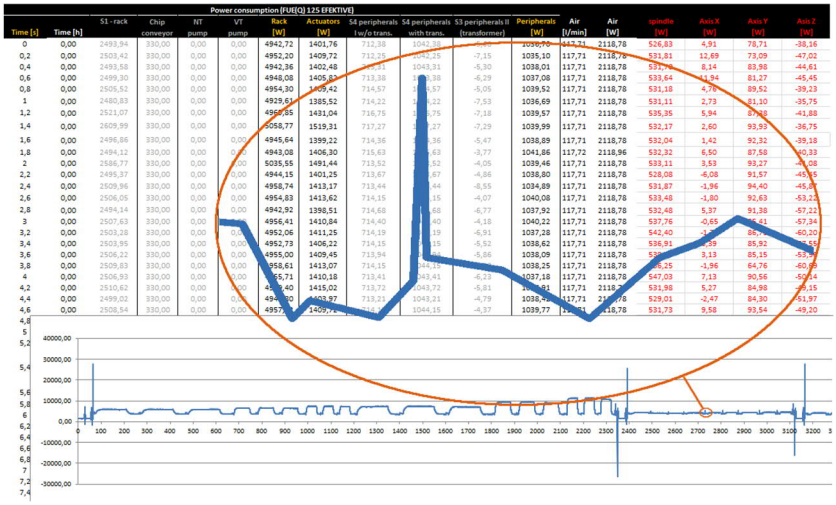
- Publikace
- Analýza měření ve společnosti Kompan
- Analýza měření školního stroje

3.3 MEŘENÍ FU EFEKTIV

Během úvodní rešeršní práce byla získána data naměřená na stroji FU EFETIV (Obr. 3.4). V této podobě se jednalo o úvodní měření a o vytvoření postupů a návrhu, jak s daty vůbec pracovat.

Obr. 3.4 FUE(Q) 125 EFEKTIV v TOS Kuřim

Datový soubor je obsáhlý a s vizualizací pomocí grafu v programu Microsoft Excel i výpočetně náročný. Na obrázku níže (Obr. 3.5) je vizualizace dat naměřených v rámci tohoto monitoringu. Na tomto příkladu je patrné, že v použitém rozlišení nelze z obrázku snadno vyvodit závěry. Dokonce ani při zásadní změně měřítka, nemusí být snadno rozpoznatelné jednotlivé operace obrábění. Se stejným problémem se potýkali pochopitelně i ostatní autoři (Holkup et al. 2013). Přehled a jednoduché zvětšení respektující vizualizační mantru (2.4.1) je náročné až nemožné. Bylo potřeba hledat jiné a alternativní cesty, jak data zpracovat. Za tímto účelem byla realizována intenzivní rešeršní práce (kapitola 2.4). Nicméně jednoznačné odpovědi na otázky nalezeny nebyly.



Obr. 3.5 Změřená data spotřeby pohonů

3.3.1 POSTUP ANALÝZY

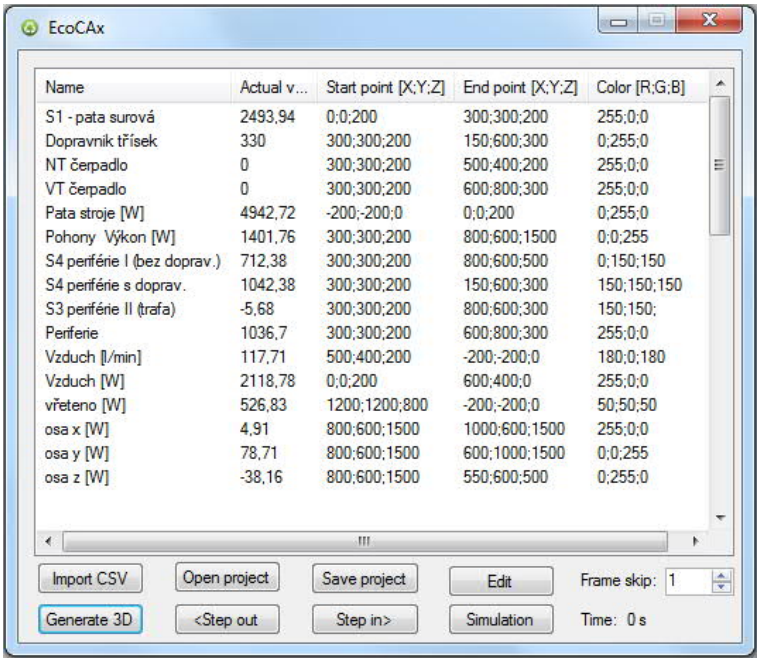
Vhodný návrh 3D Sankey diagramů pro využití v Ecodesignu byl již diskutován v předcházející kapitole (2.4). Na základě rešeršní činnosti a modifikací během vlastních experimentů bylo vytvořeno okno aplikace s využitím OpenGL knihovny pro zobrazování 2D Sanky diagramů. Celá aplikace pak byla programovaná v C# a využívá rozhraní interop pro připojení se do CAD aplikace Autodesk Inventor. Volání sloužící v programu C# a připojení do běžící instance aplikace Autodesk Inventor je uvedena níže.

```
private Inventor.Application invApp=
System.Runtime.InteropServices.Marshal.GetActiveObject
("Inventor.Application");
```

Vstupy do vytvořené aplikace ECO Design mohou být 3D modely obráběcího stroje, které by představovaly nejvyšší stupeň zobrazení, nižším stupněm je sestavení zjednodušeného 3D modelu stroje (Obr. 3.7) Dalším vstupem do systému jsou data, získaná z měření, doplněná o umístění jednotlivých nebo seskupených měřených elektrických spotřebičů, dle elektroschématu jejich zapojení. Z těchto schémat vznikne dále síť sledovaných energetických toků na obráběcím stroji.

Postup práce se při vytváření samotné vizualizace pro jednotlivé výše uvedené varianty, svou složitostí příliš neliší. V případě, že jsou k dispozici detailní 3D konstrukční data, je ve většině případů vhodné jejich použití. Ovšem ve většině případů musí být tato data před aplikací upravena do zjednodušené podoby. Drobné detaily, totiž mohou být z pohledu inspekce dat spíše kontraproduktivní.

Pokud tato data nebyla výrobcem zařízení poskytnuta, je potřeba zvážit některou z alternativních možností, a to zejména s ohledem na časové nároky a kvalitativní požadavky. Proto jsou navrhovány dvě varianty úrovně propracovanosti, které se liší poměrně zásadně v časové náročnosti na vytvoření 3D modelu.

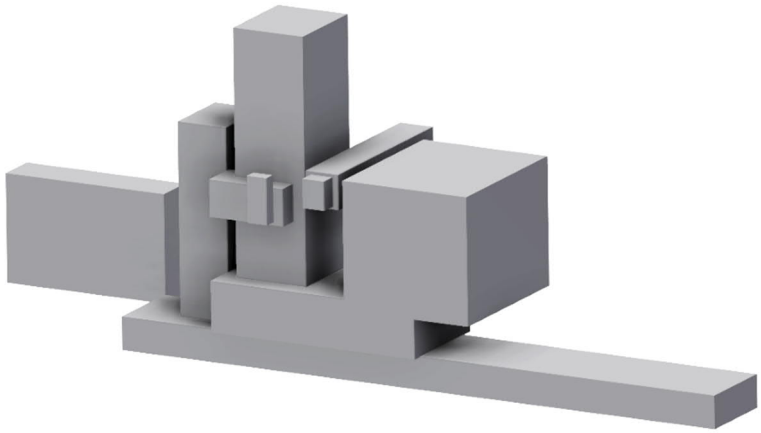


Obr. 3.6 Vstupní okno aplikace EcoCAx

3.3.2 ZJEDNODUŠENÝ 3D MODEL STROJE

Ve stroji jsou vhodně zvoleny energetické uzly, zpravidla odpovídající částem, na kterých proběhlo měření. Každý z nich reprezentuje spotřebič, který má určitou mechanickou konstrukci. Dále jsou zahrnuty konstrukce nezbytné pro instalaci spotřebiče. Všechny tyto konstrukce jsou v rámci zjednodušení, převedeny na primitivní tělesa pomocí substituce hraničními kvádry. V dalším kroku jsou stejným způsobem vytvořeny části, z pohledu simulací energetických toků sice nezajímavé, nicméně důležité pro správné pochopení topologie stroje.

Využití principu hraničních kvádrů, v literatuře často nazývaných bounding box (Wang et al. 2012), je také v případě, že sice byly poskytnuty kvalitní 3D data, avšak je potřeba v rámci inspekce chránit know-how výrobce. Bylo ověřeno praktickým testem, že i velmi jednoduchá reprezentace stroje (Obr. 3.7) je dostatečná pro technickou analýzu.



Obr. 3.7 Zjednodušený 3D model stroje

3.3.3 DETAILNÍ 3D MODEL STROJE

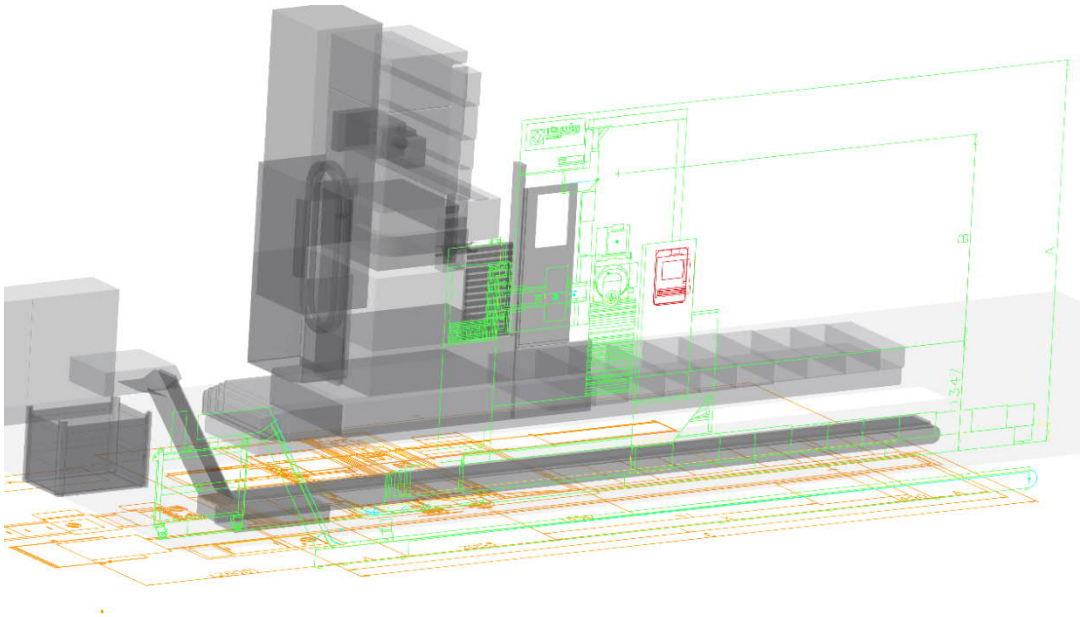
Vyšší úrovně vizualizací vyžadují pro realizaci detailní 3D data. Tyto však nejsou velmi často k dispozici a stejně tomu bylo i v případě stroje použitého pro experimentální měření. V souvislosti s tím byl vytvořen a aplikován postup tvorby 3D modelu stroje.

K vytvoření byly použity výkresové pohledy (nárys, půdorys a případně bokorys) ve formátu CAD čárové grafiky a software Autodesk Inventor. Na základě společných bodů pohledů, jsou tato data správně orientována v prostoru, čímž lze vytvořit 3D model v dostatečné úrovni detailů.

Tak, jako v případě testovaného stroje, nemusí být vždy ani 2D data ve formátu čárové grafiky vždy dostupná. Jedná se zejména o případy starších strojů, kde se dělají analýzy před nebo po rekonstrukci. Ty lze extrahovat alternativně například z katalogů ve formátu PDF, a to pouze za předpokladu, že výkresová data jsou v katalogu ve vektorovém formátu. K extrakci dat z PDF, byl použit open source[14] vektorový grafický editor Inkscape, který umožňuje načítat PDF soubory v nastavitelné kvalitě a exportovat je do CAD formátu DXF. Ve stejném softwaru je také možné

[14] Software šířený pod jednou z licencí, která je zdarma a umožnuje svobodně software používat i upravovat.

převést bitmapovou[15] grafiku na vektor. Tento přístup, ač se může na závěr zdát triviální, umožnil odstranění bariér pro implementaci ČVP, a pomocí aplikačního využití výše zmíněných programů, vytvořit experimentální studii energetických toků stroje FUE(Q) 125 EFEKTIV instalovaného v závodě TOS KUŘIM – OS, a.s. v Kuřimi.

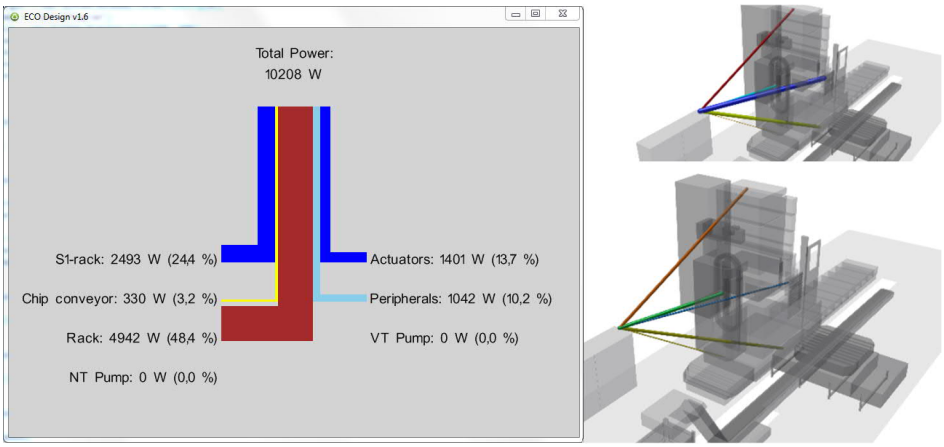


Obr. 3.8 Tvorba 3D dat z 2D pohledů extrahovaných z katalogu

3.3.4 ZÁVĚR

Výstupem z této série měření byla aplikace ECO Design 1.0. publikovaná jako funkční vzorek a dále prezentována v rámci publikací. Nejdůležitějším výstupem, ale byla zpětná vazba od kolegů resp. z akademického světa, která na jednu dobu kvitovala možnost vizuální analýzy specifického tématu energetické efektivity obrábění. Na druhou stranu byla nalezena negativa, v podobě používání CAD softwaru – prostředí pro vizualizaci, jako neefektivní a nepraktické. Právě v této době byly navrženy závěry analýzy, převedení energetických toků do intenzivně rozvíjející se virtuální reality, které toto řešení dosud rovněž neumožňovalo.

[15] V bitmapové grafice je celý obrázek popsán pomocí jednotlivých barevných bodů, ve vektorové pomocí geometrických obrazců.



Obr. 3.9 Rozhraní aplikace ECO Design v1.6

3.4 MĚŘENÍ KOVOSVIT

Pro analýzu na stroji Kovosvit bylo již zvoleno řešení umožňující zobrazení pomocí stereoskopické projekce resp. imerzní virtuální reality. Data byla změřená na demonstrátoru přímo situovaném na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, jedná se o obráběcí stroj KOVOSVIT MAS MCV-754 QUICK. Kromě spotřeby naměřené pro jednotlivé osy a na patě stroje, se měřily i spotřeby tlakového vzduchu a chladicí kapaliny v litrech za minutu. Obrobek (Obr. 3.10) použitý pro analýzu obrábění, byl ve spolupráci s kolegy z ústavu navržen tak, aby vyžadoval různé frézovací operace na stroji, zároveň maximálně využil a prověřil mechanické vlastnosti stroje.

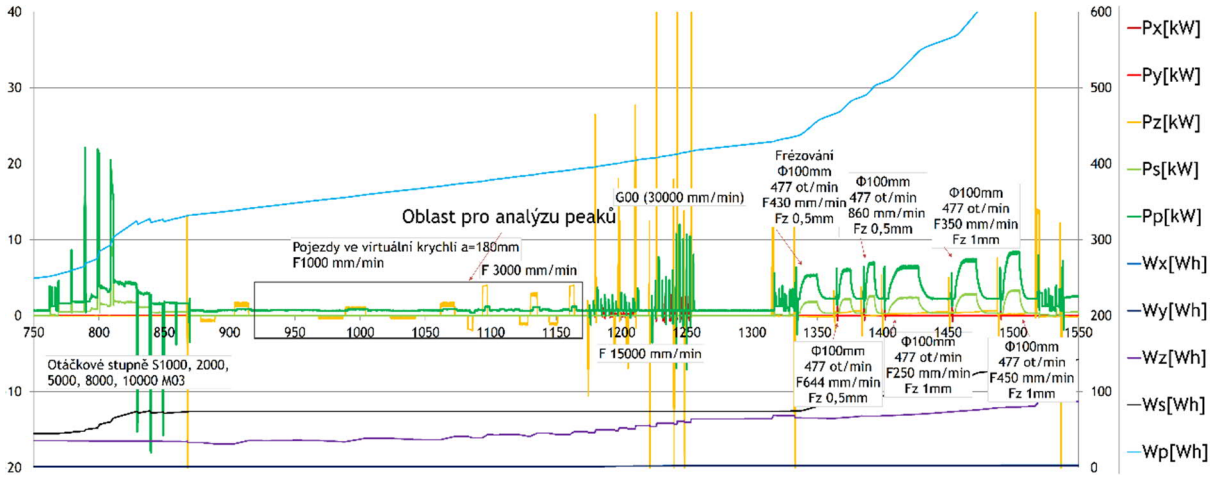
Obr. 3.10 Obrobek a měření příkonu testovací cyklu na demonstrátoru

Základní skupiny spotřebičů ve stroji jsou:

- CNC řídící systém včetně hlavního vřetene a motorů posuvů.
- Kompresor tlakového vzduchu.
- Čerpadlo chladicí kapaliny.
- Napájené sekundární komponenty (CNC řídící systém).

Na obrázku níže (Obr. 3.11) jsou zobrazena data z energetických toků stroje a mimo to již zjištěný problém s vizualizací detailů (kapitola 3.3). Nastal problém s vizualizací různých veličin a jejich vzájemnou komparací programem. Přesto, že jsou v tomto grafu nakonec zobrazena pouze data týkající se toků elektrické energie, je velmi nepřehledný a to z důvodů velkých rozsahů v průběhu měřených veličin.

Bodem k další analýze a diskuzi je srovnání využití průběhu okamžité spotřeby na ose a celkové odebrané energie ze sítě pro vlastní analýzu. Lze totiž vysledovat, že díky rekuperacím, jsou zde rozdíly, které mohou být důležité pro vlastní analýzu, a to zejména pro komfort. Tyto skutečnosti jsou diskutovány v dalších kapitolách (kapitola 3.4.2).



Obr. 3.11 Naměřená data a oblast vybraná pro analýzu

3.4.1 POSTUP ANALÝZY

Pro grafický výstup byl využit program Instant Reality Framework. Je jedním z prohlížečů formátu určeného pro data virtuální reality VRML[16]. Právě tento framework se aplikačně používá pro budování počítačem podporovaného virtuálního prostředí označovaného CAVE[17]. Software vznikl na známém Frauhoferově institutu v Německu a zahrnuje moduly od renderingu po komunikaci, podporu smart kamery, trackování a dynamické editace scén[18]. Tedy veškeré nezbytné moduly pro realizaci analýzy energetické efektivity v prostředí virtuální reality. Výhodou je vysoký výpočetní výkon, možnost využívání a volná dostupnost pro univerzity.

```
// Připojení do instant reality z C# aplikace
System.Net.IPAddress address= System.Net.Dns.GetHostAddresses("localhost")[0];
Vrml.EAI.Browser browser = Vrml.EAI.BrowserFactory.GetBrowser(address, 4848);
// Pověření prohlížeče volat metodu OnBrowserEvent v případě události
browser.BrowserEvent += OnBrowserEvent;
```

Připojení do aplikace se provádí přes adresu lokálního hostování, tedy na stejném počítači. Je potřeba pouze zajistit, aby pro konkrétní událost byla použita patřičná

[16] Virtual Reality Modeling Language – jazyk modelů pro virtuální realitu. Popisuje model včetně akcí a interakcí, takže model je poté v podstatě kompletní program úlohy. Umožnuje hotové modely různě a využívat podprogramy, takže je velmi flexibilní.
[17] Cave Automatic Virtual Environment
[18] Uvedené termíny se týkají zpracování vstupů ve formě videa nebo hodnot a jejich interakce se zobrazenou scénou.

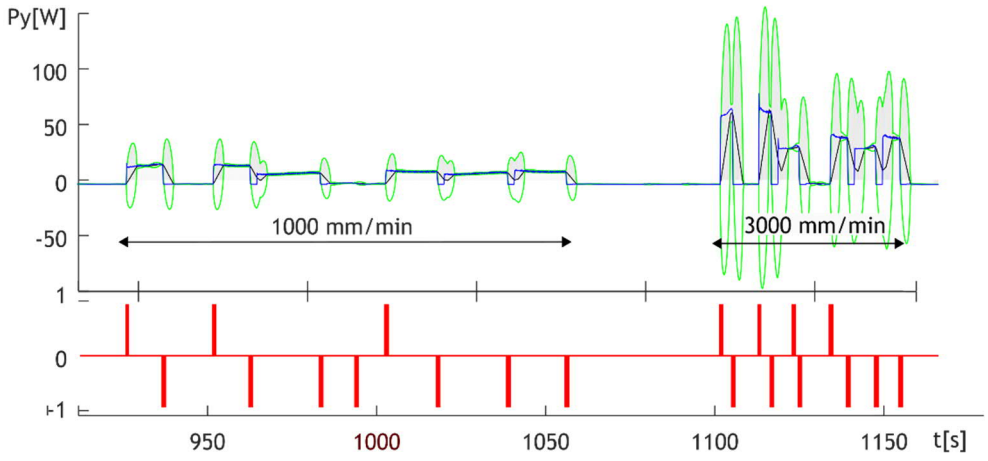
metoda prohlížeče. Bez dalších nástrojů je možné porovnávat pouze významné části programu především vztažené k času (například délka výměny nástroje a spotřeba vzduchu během výměn). Na základě zjištění byla zařazena postprocesingová funkce analýzy peaků. Cílem postprocesingu je, následným zpracováním stávající sady dat, získat nové informace. V tomto případě se autor zaměřil na drobné odchylky, které je možné analyzovat v rámci vlastního měření nebo je používat pro porovnání obráběcího procesu vůči referenci. Na základě toho byl navržen přístup pomocí komparace výkonových špiček, a to nejen v absolutních, ale v podstatě ve všech odchylkách od konstantních průběhů okamžité spotřeby – v literatuře a dále v této práci označované jako peaky. Ovšem nejen změna v konstantním průběhu je důležitá, jelikož i minimální spotřeba v řádech wattů může být rozhodující, a proto je nezbytné hodnotit i absolutní průběh spotřeby.

3.4.2 ANALÝZA PEAKŮ

Možnost pro snížení odběru stroje, nezbytného pro vykonání určité úlohy, se skrývá v efektivním managementu spotřeby. V rámci řízení spotřeby, mohou být některé specifické, aktuálně neproduktivní komponenty, vypnuty. Zatímco vypnutí a zapnutí je extrém, který lze snadno rozpoznat bez detailní analýzy, ostatní důležité změny nemohou být rozlišeny, pokud není analyzován menší interval dat. Pro analýzu peeků byl použit přístup, který je popsaný níže a byl vytvořený na základě obecných doporučení dalších autorů (Vijayaraghavan & Dornfeld 2010). V rámci pracovního procesu může nastat několik scénářů, jejichž vyhledání a analýza by měla být podporována softwarem.

- Redukce celkového odběru energie založená na analýze grafu odběru během stacionárních a neprodukčních časů stroje (Kübler et al. 2013).
- Identifikace poškození povrchu součásti založená na špičkách výkonu.
- Sledování stavu stroje založené na srovnávání dříve naměřených dat spotřeby na stejném kusu.
- Množnost reportu o dopadech na životní prostředí pro jednotlivé součásti, přesným vyjádřením spotřeby energie z její výroby.
- Oznámení peaku ve spotřebě energie, jako například zvýšení celkové spotřeby v po sobě jdoucích operacích, které mohou naznačovat odchylky a nesrovnalosti plánu procesu.
- Zjistit odchylky spotřeby jako například rozdíl, resp. zvýšení spotřeby při opakované výrobě stejných součástí, které může být indikací problému ve výrobním procesu.

Vzhledem k tomu, že jsou v tomto případě měřena různá data, a tedy jejich průběh je nepředvídatelný, musí navržený postup analýzy zajistit možnost spontánní práce (kapitola 3.1). Musí tedy poskytnout informace o hlavních špičkách u libovolné měřené veličiny. V rámci vývoje analýzy peaků byly diskutovány dva druhy průběhů měřené veličiny, okamžitý odběr a spotřeba od začátku práce stroje. V případě průběhu okamžité spotřeby dochází k prudkým nárůstům měřené veličiny. Pro vlastní práci byla jako zájmová oblast zvolena část grafu, která by měla zobrazovat pojezdy ve virtuální krychli různou rychlostí posuvu. Na celkovém grafu (Obr. 3.11) není v označené zájmové oblasti (červená čára, která zobrazuje spotřebu osy Y), nic vidět, a to především proto, že poměr spotřeby této osy je v porovnání s ostatními velmi nízký. Graf (Obr. 3.12) zobrazuje detail okamžité spotřeby a je možné vizuálně rozpoznat rozdíl nejen ve spotřebě, ale i v rychlosti provedení stejné operace strojem při různých rychlostech posuvu.



Obr. 3.12 Průběh okamžité spotřeby osy Y

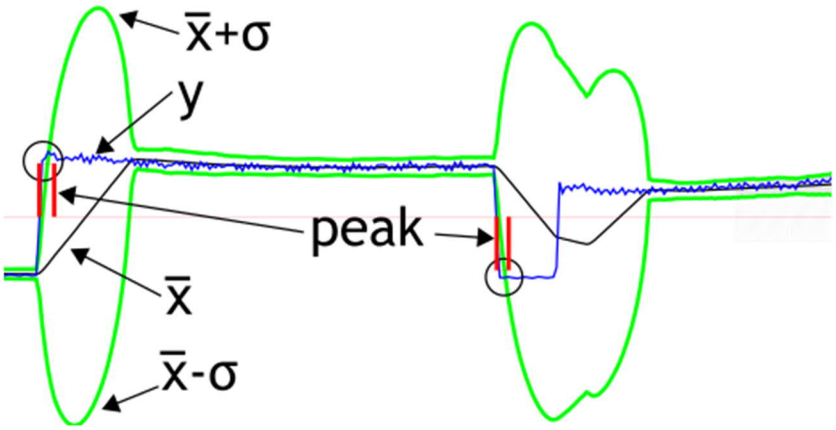
Vstupem do analýzy peaků je tabulka hodnot měřené proměnné y, rovnoměrně rozložených v čase. Seznam použitých proměnných je:

- Okno – délka intervalu, na kterém je provedena analýza
- Průměr (Mean) $\bar{x}(i) = \frac{y_f(i-okno)+\cdots+y_f(i)}{okno}$
- Filtrování (inf)
- Směrodatná odchylka (stdDev) $S_x(i) = \sqrt{\sum_{i-okno}^{i}(y_f(i) - \bar{x}(i))^2}$
- Práh – koeficient násobení směrodatné odchylky
- Kde y_f je filtrovaná hodnota $y_f = inf * y(i) + (1 - inf) * y_f(i-1)$
- Tabulka peaků (peaks)

```
if (Math.Abs(y[i] - Mean[i - 1]) > práh * stdDev[i - 1]
{
if (y[i] > Mean[i - 1]) peaks[i] = 1; else peaks[i] = -1;
yf[i] = inf * y[i] + (1 - inf) * yf [i - 1];
}
else yf[i]=y[i];
```

Slovně lze popsat, že je-li absolutní hodnota rozdílu veličiny a průměrné hodnoty v rámci okna větší než směrodatná odchylka v rámci okna násobená prahem, tak se přiřadí do tabulky peaků hodnota 1 nebo -1 a to na základě toho, zda je aktuální hodnota y větší nebo menší než průměr okna.

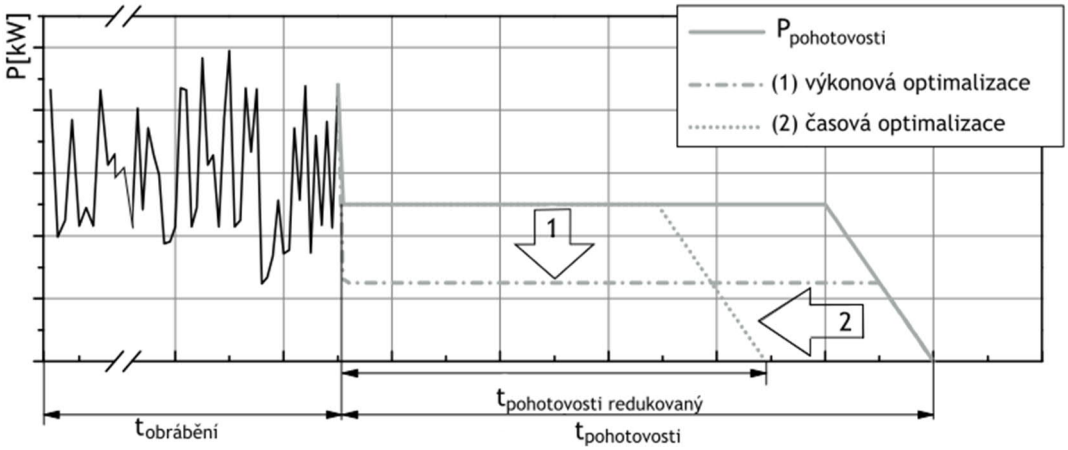
Grafické vyhodnocení průběhu lze vidět na obrázku níže (Obr. 3.13). Výhodou je, že využitá funkce je vhodná jak pro okamžitou spotřebu s velkými změnami a pulzy, tak pro analýzu celkové spotřeby, kde jsou extrémy vyobrazeny nejčastěji plochými peaky. Výhodné je rovněž použití okna, které umožnuje flexibilně měnit úroveň zobrazených detailů v souladu s informacemi získanými v rámci rešeršní práce (kapitola 2.4.1).



Obr. 3.13 Grafické vyhodnocení analýzy peaků

Pro snížení spotřeby během pohotovostního režimu stroje, může být použita buď redukce příkonu, nebo redukce doby, po kterou se nachází stroje v režimu pohotovosti (Obr. 3.14). Jedním z faktorů ovlivňující spotřebu během klidu, je i zajištění bezpečnosti resp. požadavky na její zajištění (Zahálka et al. 2014). Mimo ověření správnosti přístupu pro definici ČVP byly zmapovány příklady optimalizací, jejichž dopad může být v softwaru vyhodnocen:

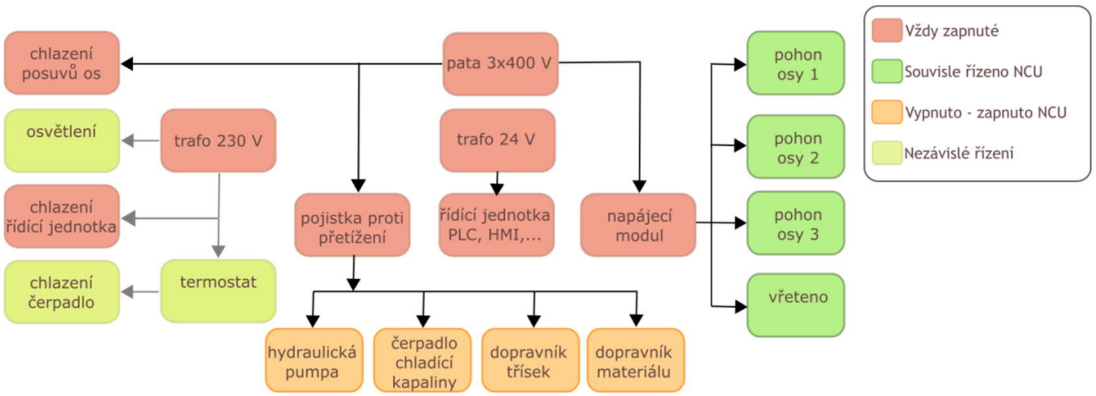
- Redukování spotřeby u vrtání a čelního/stranového obrábění, pomocí nastavení řezných podmínek na dostatečně vysokou hodnotu. I za podmínky požadavku na změnu nástroje. Úsporou může být zkrácení doby, po kterou je nutné nechat zapnuté externí komponenty (např. čerpadlo a systém řízení).
- Spotřeba vrtání hlubokých děr může být redukována pomocí adaptivního cyklu vrtání s výplachem[19], pokud je tento cyklus prováděn podle potřeby snímáním řezné síly.
- Spotřeba může být také redukována synchronizací akcelerace a deakcelerace vřetena s posuvem os rychloposuvem.



Obr. 3.14 Základní přístupy pro redukci spotřeby během klidu stroje

[19] Způsob vrtání hlubších otvorů, kdy nástroj po vyvrtání části hloubky odjede plně ze záběru rychloposuvem. To umožnuje přesušení třísky, vyčištění otvoru a ochlazení nástroje. Následně se cyklus opakuje tak dlouho, až je dosaženo plné hloubky otvoru.

Dalším z potenciálně zajímavých částí managementu spotřeby stroje je odložení vypnutí některých zařízení, příkladem jsou čerpadla chladicí kapaliny, protože může být energeticky efektivnější, je ponechat zapnuté, než jej krátce vypínat a zapínat. Za tímto účelem je vhodné sestavit energetický model stroje nejdříve ve 2D prostoru (Verl et al. 2011) a až následně vytvářet 3D provedení.

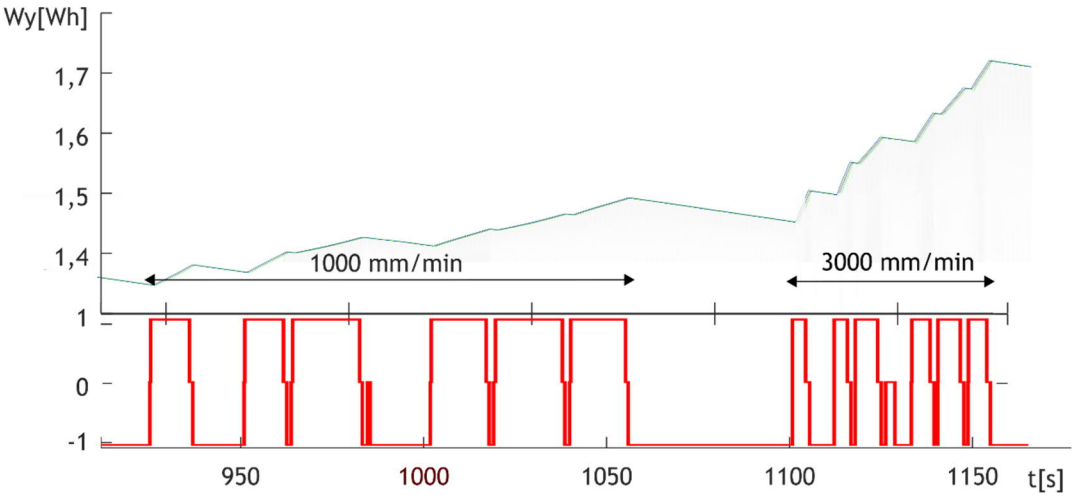


Obr. 3.15 Obecné stroje podle zapojení v energetickém managementu

3.4.3 ZÁVĚR

Na základě kritických studií (Neugebauer et al. 2011) bylo navrženo 3D provedení Sankey diagramů. Pro identifikaci jednotlivých spotřebičů stroje je použitá statická barva, přičemž intenzita barvy je využita pro indikaci růstu a pomocí průhlednosti se definuje její průměrná hodnota. Průměr 3D objektu a vizualizace pomocí šířky 2D grafu jsou použity pro poměrovou indikaci hodnoty. Ta umožnuje spolu se zobrazením exaktní číselné hodnoty porovnávat v rámci osy, tak i v rámci stroje.

Software využívá možnosti předčítat data dopředu a zobrazovat jak hodnoty aktuální v číselné podobě, tak nadcházející v podobě grafu špiček. Je tedy možné rozeznat, zahrnout do úvah a porovnání teprve nadcházející peaky. Zároveň tak lze velmi dobře sledovat vzájemné souvislosti. (Obr. 3.17).

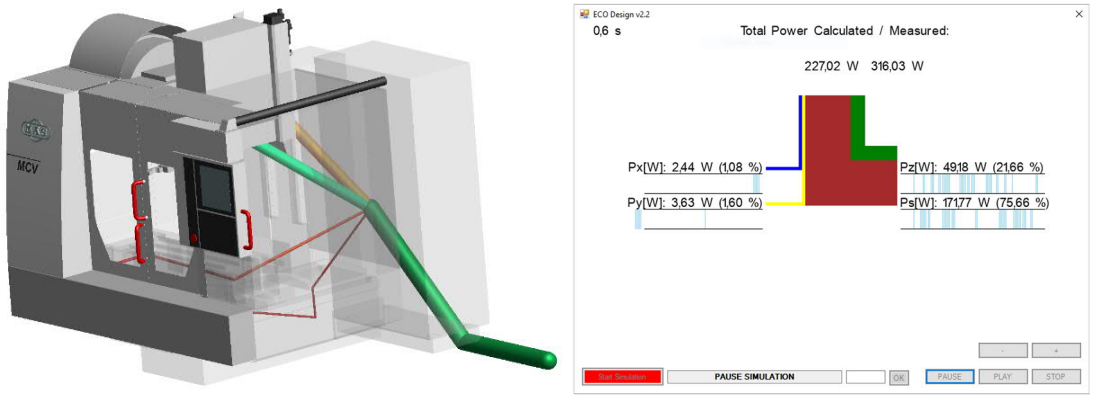


Obr. 3.16 Vývoj spotřeby stroje v závislosti na čase

Při porovnání tohoto přístupu s vizualizací rozdělenou do několika diagramů v aplikaci Excel, s téměř nemožnými změnami měřítka pro správné vyhodnocení peeků, se jedná o řešení mnohem efektivnější. Interní experimenty v rámci ÚVSSR ukázaly, že navržený přístup je možné použít pro analýzu a má pozitivní dopad na dobu zpracování. Jedná se tedy o virtuálně podporovaný proces, kdy je cílem, pomocí jiného zobrazení, dosáhnout stejných výsledků ve větším komfortu. Zobrazovací software využívá statickou barvu pro identifikaci každého pohonu. Pro dílčí indikace změny jsou použity tyto vizualizace:

- Intenzitu sytosti barvy pro indikaci růstu (Směrodatná odchylka).
- Průhlednost je použita pro vyobrazení průměrné hodnoty veličiny.
- Průměr, resp. šířka ve 2D je využívána pro vyobrazení aktuální hodnoty.

Dříve publikovaný program ECO Design 1.0 resp. 1.6 byl obohacen o funkci propojení s frameworkem virtuální reality a dále označován jako ECO Design 2.0 resp. 2.2. Jeho pracovní okna jsou vyobrazena na obrázku níže (Obr. 3.17). Celý systém umožňuje jednodušší orientaci v grafech energetické spotřeby v porovnání s vizualizací závislostí v několika oddělených diagramech. Funkce pro infikaci růstu umožnuje uživateli predikovat extrémy dříve, než nastanou.



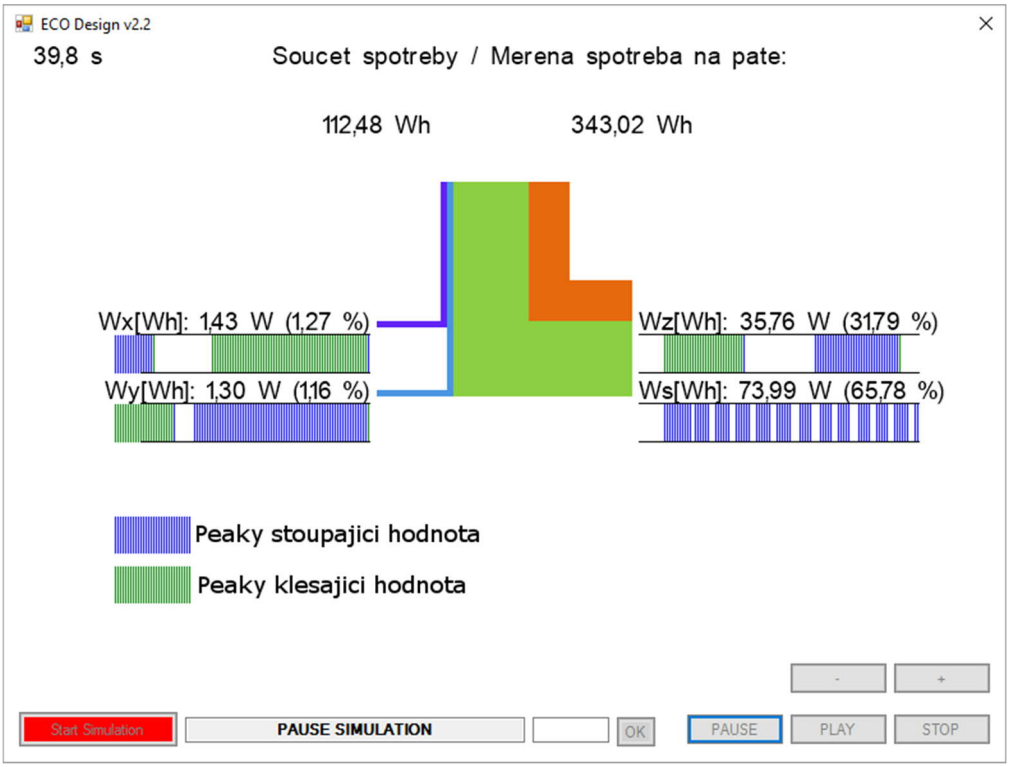
Obr. 3.17 Kompletní vizualizace pomocí 2D a 3D Sankey diagramů

Na základě provedených testů byly výsledky analýzy peaků na záznamu okamžité spotřeby (Obr. 3.12), nahrazeny vhodnějším provedením analýzy peaků na průběhu celkové spotřeby. Výstupní data jsou pak snáze čitelná a jsou odstraněny falešné extrémy, které se vyskytovaly v měřených datech. Na obrázku níže (Obr. 3.18) je názorně vidět přechod z růstu hodnoty (modrá barva) do konstantní hodnoty (bez vykreslení) až po klesání (zelená barva). Graf dále zobrazuje součet spotřeby v měření zahrnutých spotřebičů a celkovou spotřebu na patě stroje.

Motory posuvu os s vřetenem spotřebovávají průměrně pouze 40 % z celkové spotřeby. Z pohonů os vykazuje nejvyšší spotřebu osa Z, kde je průměrná spotřeba určena z velké části požadavkem na udržení osy v poloze. U všech os se krátké špičky objevují pouze, pokud je potřeba akcelerace.

Během hrubování měly motory posuvných os průměrnou spotřebu cca 240 W. U pohonu hlavního vřetene byla naměřena průměrná spotřeba 2100 W. U vrtání byla průměrná spotřeba na patě 2900 W, přičemž vřeteno se podílelo 700 W.

Na závěr lze říci, že motory posuvu os se podílejí na celkové spotřebě pouze malým dílem, a proto je vhodné se primárně věnovat spotřebě ostatních součástí stroje, jejich spotřeba není přímo dána výkonem nezbytným pro vlastní obrábění.

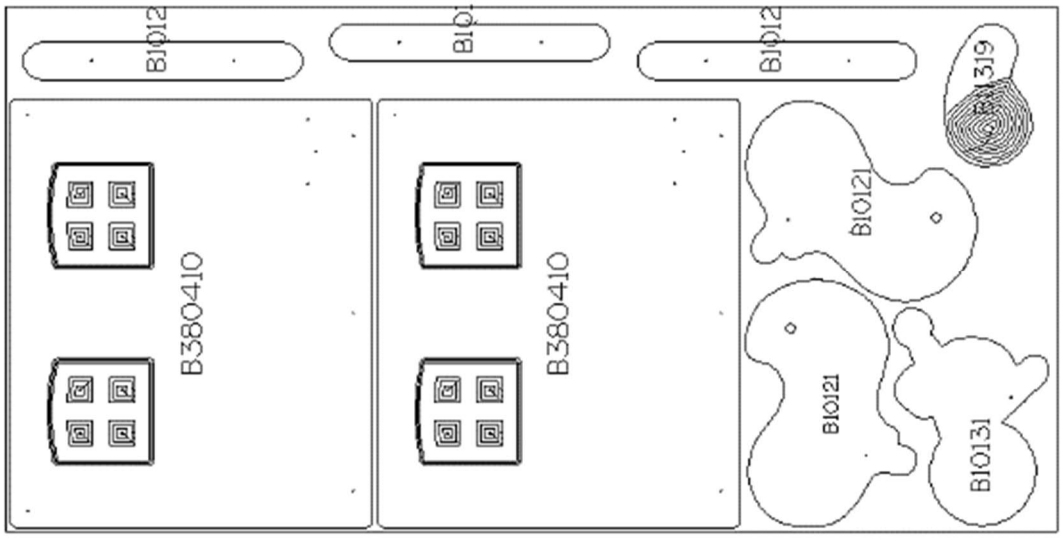


Obr. 3.18 Vizualizace spotřeby

3.5 MĚŘENÍ KOMPAN

Jen málokterý průmysl se může pochlubit tím, že jeho výrobky jsou stále jednoduššího tvaru, s méně detaily a vyrobeny s využitím jednodušší technologie. Každopádně ani odvětví hřišť a sportovišť, reprezentované firmou Kompan, mezi ně nepatří. V úvodní části byly prezentovány některé výrobky a jejich rostoucí složitost (Obr. 2.4). Kromě vzrůstajícího množství designových detailů, je výzvou také to, že celý podnik již několik let pracuje na principech MC (Odstavec 2.2). Složité svařence jsou povrchově upravovány žárovým zinkováním. Následuje případná finální barevná úprava práškovým lakováním, dle požadavku zákazníků. Důvodem je zkrácení a zjednodušení operací před vlastní expedicí. Stejně tak obráběné díly tvz. panely nejsou cíleně vyráběny po sériích do skladu, ale na zákaznický požadavek. Neumožňuje to široká variabilita barvených provedení finálních produktů. Výroba dílů je postupně plánována, tak aby jejich dokončení proběhlo 3-10 dní před vlastní expedicí. Pro případnou kontrolu oddělením kvality, jsou pak díly připraveny v zásobníku vždy alespoň 1 den před expedicí. Poměr případů při dodržování těchto požadavků je vyhodnocován ve firmě jako KPI[20]. Díly je potřeba vyrábět maximálně efektivně, tedy s minimálním procentem odpadu. Proto jsou sady dílů umísťovány automaticky s ruční verifikací do plochy polotovaru. Tento proces se nazývá nesting. Pokud vznikne v rámci rozměru polotovaru volný prostor, je vyplňován malými díly s vysokou spotřebou, tak aby odpad, ale i doba skladování byly co nejmenší (Obr. 3.19). Množství odpadu je opět vyhodnocováno jako KPI.

Stroje a klíčové indikátory výkonnosti ve firmě jsou, i přes změny a vysokou orientaci na MC, v posledních letech stejné, a proto se otevírá prostor pro další inovace. Ty ale vyžadují monitoring a analýzu, aby mohly být efektivně zacíleny na místa s největšími možnostmi úspor.



Obr. 3.19 Rozvržení panelu zobrazující jednotlivé díly

[20] Key Performance Indicator – Klíčový Indikátor Výkonnosti, vybraná měřitelná hodnota reprezentující úroveň práce podniku

V minulosti bylo ve firmě provedeno hned několik pokusů o analýzu obráběcího procesu. Všechny spojovala, s trochou nadsázky, použitá technologie, která odpovídala předpokládanému výstupu. Nedostatek detailů na vstupu se pak samozřejmě projevil i na výstupu, nedostatkem konkrétních nálezů se pak kruh uzavřel a výstupem nebyly konkrétní opatření. Právě proto nebyly předcházející výsledky dále reflektovány a celková dosavadní práce by se tak dala bagatelizovat do formulace „začínáme znovu a hledáme, co je špatně“. V souvislosti s tím je potřeba, připomenout význam odhození zátěže starých zkušeností při implementaci něčeho tak nového a inovativního jako je ČVP s využitím virtuální reality. Cílem tedy byla celková analýza a návrh optimalizace procesu CNC obrábění, přičemž se jedná o velmi obtížnou aplikaci.

V předcházejících výstupech bylo citováno mnoho publikací zabývajících se energetickou efektivitou, nicméně v tomto kontextu je potřeba, zmínit pojem úspora v rozsahu a zdůraznit analýzu nezbytnosti všech pohybů, které stroj vykonává. Pokud nejsou nezbytné, tak nehledě na jejich vlastní energetickou efektivitu, která je nepochybně důležitá, se jedná o plýtvání. V tomto směru je téměř nutností vytvořit rozsáhlejší analýzu a předem definovat požadované výstupy a indikátory (Ghadimi et al. 2014).

V obrobně firmy Kompan se nachází celkem čtyři CNC frézky různých koncepcí. Tři z těchto strojů jsou popsány v tabulce níže (Tab. 3.1). Firma Kompan projevila zájem o monitoring a analýzu strojů z následujících důvodů, jejich společným jmenovatelem je potřeba rozšířit kapacity obrobny.

- Stroje popsané v přehledu strojů níže, vykazují odlišné pracovní časy ve srovnání s ostatními stroji.
- Definovat prostory pro kontinuální zlepšování.
- Získat data pro definici resp. mapu ideálního stroje. Z něj chce mít podnik patrné různé varianty nového stroje a jejich dopad na cenu a efektivitu práce stroje.

Cílem je tedy vytvořit více než jen specifikaci předávacího kusu.[21] Cílem je stanovit konkrétní lokální analýzu, která prokáže, že nový stroj bude skutečně splňovat zvolený poměr cena a výkon pro vybraný zkušební panel, pro všechny ostatní současné panely a pokud možno i pro všechny budoucí panely. Protože, jak již bylo v úvodu tohoto odstavce zmíněno, některé prvky jsou otázkou dlouhodobého a zřejmého trendu, proto je možné jej do analýzy rovněž predikovat.

Polotovar je založen do stolu a upnut pomocí snížení tlaku generovaného vývěvou. Kompletní výroba panelů se skládá ze dvou programů pro každou stranu. Při oddělování kontur se frézuje z každé strany drážka hlubší než polovina tloušťky panelu. Rovněž průchozí otvory jsou rovněž vrtány oboustranně, protože panel musí z důvodů upínání ležet přímo na stole.

[21] Zkušební díl pro prověření garantovaných parametrů stoje v praxi. Dodavatel nabízí stroj s předem poptanými kvalitativními parametry (čas obrobení a kvalita povrchu) určitého kusu a tyto jsou fyzickým ověřeny v rámci předání stroje.

Interní označení	Technické parametry	Rychloposuv
CNC3	Řídicí systém: OSAI 2 vřetena Výměna nástrojů: Revolver pro každé vřeteno 2 nezávislé stoly Ruční zakládání a otáčení obrobku	X = 36m/min Y = 36m/min Z = 15m/min
CNC2	Řídicí systém: Fanuc 180i 3 vřetena (18000 otáček) Výměna nástrojů: Buben pro každé vřeteno 2 nezávislé stoly Ruční zakládání a otáčení obrobku	X = 36m/min Y = 36m/min Z = 15m/min
CNC5	Řídicí systém: OSAI series 10 1 obráběcí vřeteno (12000 otáček) Výměna nástrojů: Buben 1 stůl Strojní zakládání a otáčení obrobku	X = 100m/min Y = 100m/min Z = 30m/min

Tab. 3.1 Tabulka strojů řešených v rámci analýzy

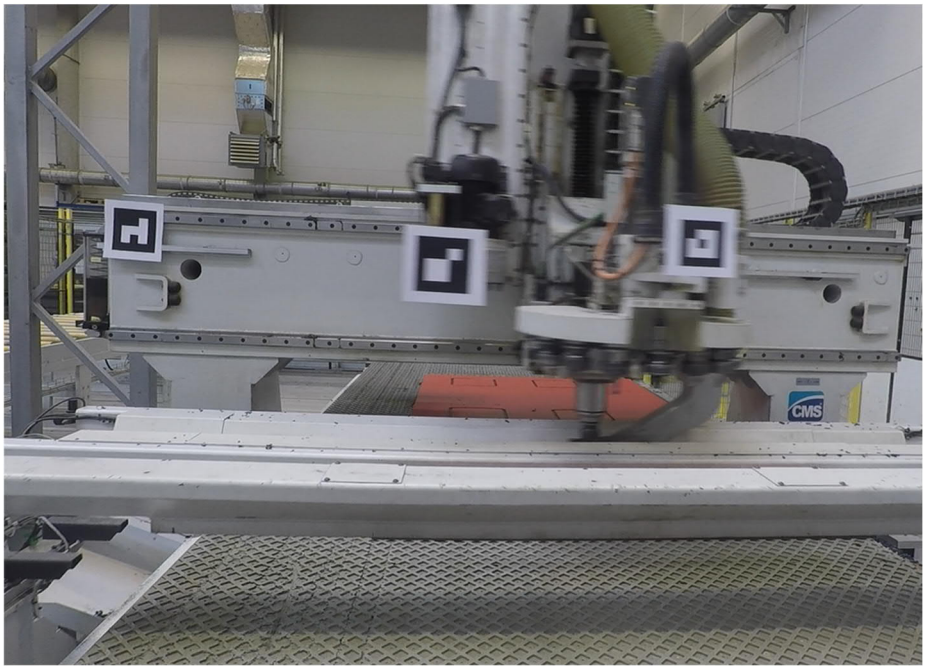
3.5.1 SBĚR DAT

Situace ve společnosti Kompan není pro získání dat a následnou analýzu úplně vhodná, protože stroje neumožnují vyčítání dat z řídicího systému, nicméně tento problém může zatěžovat více uživatelů ČVP, a proto bylo potřeba hledat nové a alternativní řešení. Do této možnosti bylo investováno značné úsilí, protože za předpokladu přechodu na Smart Factory je nezbytné mít možnost tyto údaje vyhodnotit, a to nejen v rámci této firmy.

Obr. 3.20 Příprava stroje CNC2 pro monitoring

Pro monitoring nových strojů je možné využít výstup do datové sítě. U strojů starších by mělo být nezbytné, pro vysoce přesný spolehlivý výstup, instalovat nějaký způsob odměřování přímo na pravítka stroje, nicméně podmínky nepřetržité výroby a rizika velkých škod neumožnují zásahy do strojů. Nakonec byl z důvodů značné jednoduchosti pro instalaci využit systém pro rozpoznávání peaků polohy rychlosti nástroje z vizuálních dat.

Původní záměr využít pro monitoring extrakci značek z obrazu nebylo možné uskutečnit z více důvodů. Ukázalo se jako velmi obtížné pokrýt stroj značkami tak, aby byly vždy kompletně viditelné, často docházelo k překrytí značek hadicemi médií nebo vlastní konstrukcí stroje. Vzhledem k rozsahu pohybu os a velkému zrychlení, které má i přes dobré osvětlení a rychlou závěrku vliv na ostrost, by musely být značky velmi velké, aby je software rozpoznal. Navíc by se muselo po úpravách natočit celé obrábění znovu s nejistým výsledkem, což není ekonomicky přijatelné ani v rámci experimentu. Jakákoli nestabilita výsledků, spolu s nutností opakování a ručních zásahů, pak také vytváří vysoké bariéry pro spontánní nasazení (Obr. 3.2).

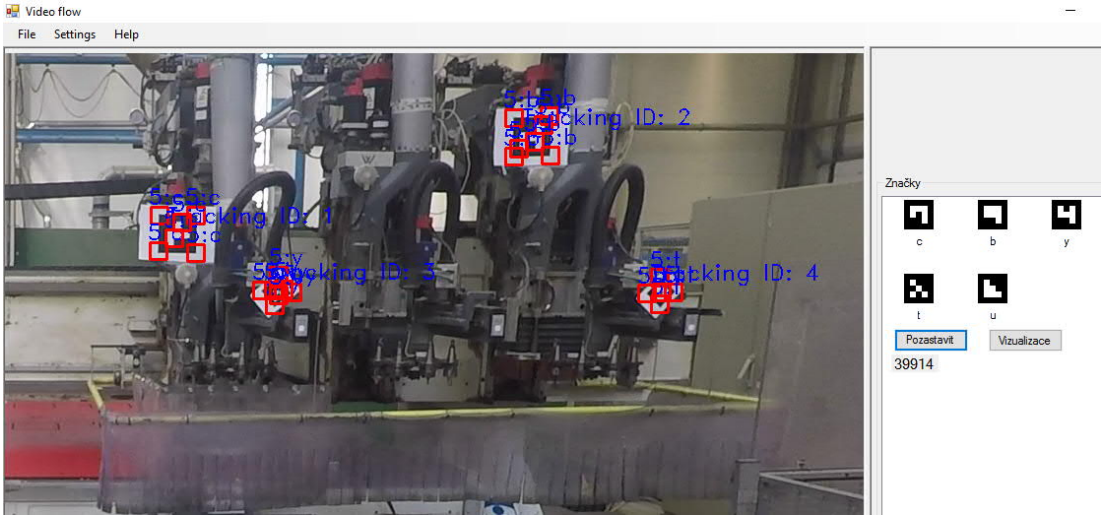


Obr. 3.21 Rozmazání značek vlivem velké rychlosti stroje

Proto bylo nakonec od využití jádra pro rozpoznávání z knihovny GRATF (Kirillov 2012) upuštěno a využity principy, které jsou založeny na kontinuálním sledování videa, kdy bylo využito grafické knihovny pro strojové učení ACCORD respektive jejího rozšíření ACCORD.NET extensions (Jurić 2017). Místo rozpoznávání značek, tak byly sledovány rohy a hrany, které značky obsahovaly, tak aby mohlo být využito stávajícího měření. Jednotlivé rohy byly v programu přiřazeny do třídy, která tvoří značku. V této třídě se rovněž sleduje historie polohy značky, tak aby mohla být na závěr procesu uložena do souboru ve formátu CSV[22]. Nejmenší počet bodů pro sledování značky jsou 3. Nicméně je, ale vhodné jich zvolit více, aby byl software schopný poskytovat výstup i v případě překrytí jednoho z bodů.

[22] Comma-separated values, hodnoty oddělené čárkami

Z hlediska spojitého sledování polohy jednotlivých bodů fungoval software spolehlivě i v případech, kde sledování značky selhávalo vlivem rozmazání. Aby bylo možné označit měřící zařízení za způsobilé, je v následujících kapitolách vyhodnocena opakovatelnost metody a její opakovatelnost a reprodukovatelnost (Kapitola 0).



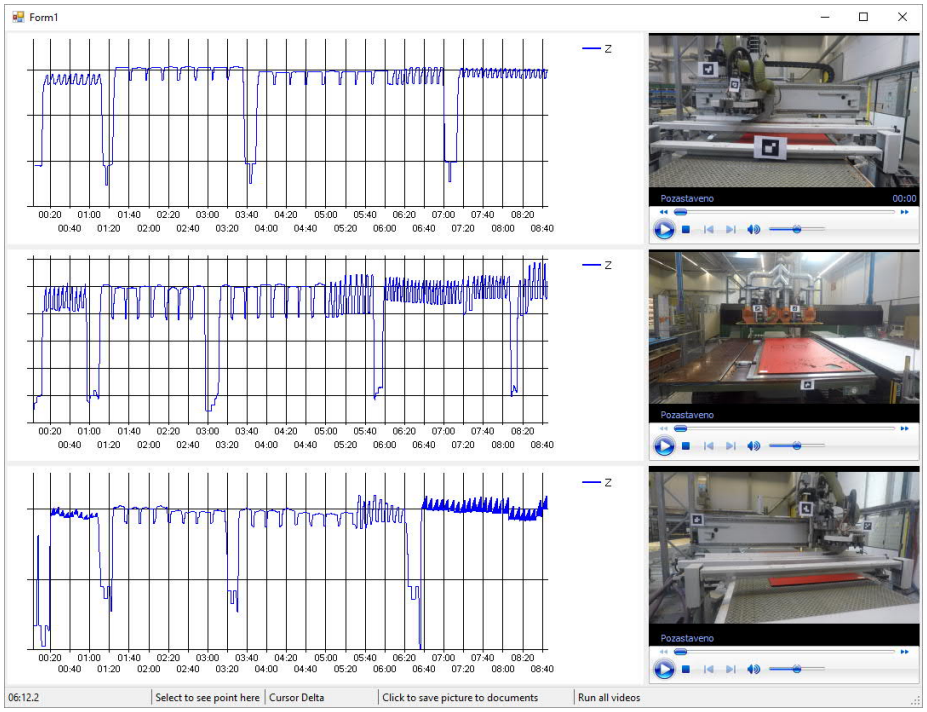
Obr. 3.22 Vizualizace značek v programu Video flow

3.5.2 KONZERVATIVNÍ ANALÝZA

Vizualizace dat byla provedena nejprve konzervativním způsobem, tedy pomocí 2D diagramů, avšak s inovacemi na základě rešeršní práce a s využitím veškerých výstupů z rešerše kapitoly 2.4.1 a závěrů z předcházejících měření v kapitolách 3.3. a 3.4. Stejná data pak byla podrobena analýze ještě jednou, a to s využitím důležitých poznatků ohledně imerzního ČVP v následující kapitole (kapitola 4.2). V obou těchto měřeních byla využita analýza peaků a ověřená její použitelnost pro úpravu úrovně detailů dat, která mohou být poměrně nepřehledná (Obr. 3.23). V rámci konzervativního přístupu byla graficky porovnána celková délka obrábění panelu, která je uvedena v tabulce níže (Tab. 3.2). Výsledky jsou překvapivé, stroj CNC3, který je podstatně starší a z hlediska posuvových rychlostí i papírově pomalejší, byl vyhodnocen jako celkově nejrychlejší. Tento vstup byl důležitou informací k zacílení dalšího postupu. Rozdíly mezi operacemi jsou na první pohled nepodstatné a všechny tři stroje se pro různé operace střídavě nacházejí mezi nejrychlejšími i pomalejšími. Časový úsek zobrazený na obrázku níže (Obr. 3.23) je pouhá pětina z celkového strojního času, nehledě na to, že musí dojít k otočení panelu v průběhu obrábění, což může dle koncepce zabrat až minutu.

Stroj	Horní strana	Dolní	Celkový čas	Výpočet systémem[23]
CNC3	0:19:14	0:17:50	0:37:04	0:34:12
CNC2	0:22:17	0:22:18	0:44:35	0:34:12
CNC5	0:22:04	0:20:12	0:42:16	0:34:12

Tab. 3.2 Předběžné vyhodnocení celkových časů obrábění



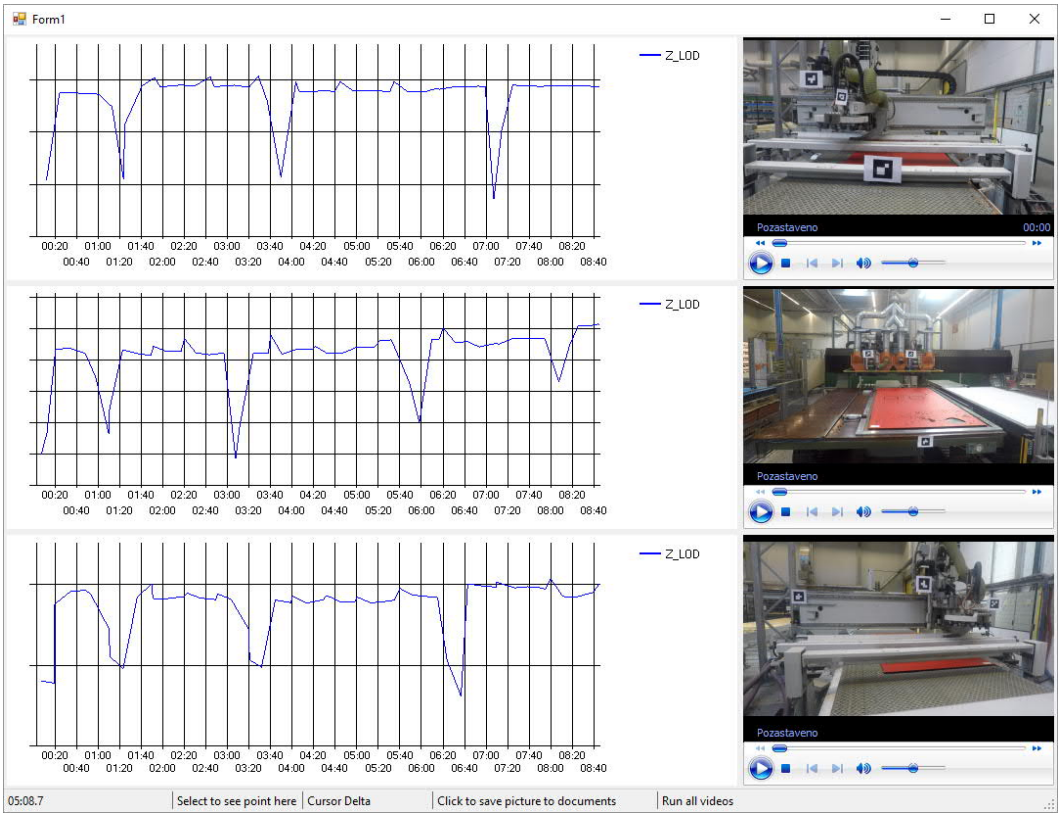
Obr. 3.23 Komparační diagram průběhu na ose Z a tabulka časů

[23] Doba kalkulovaná informačním systémem, vytvořená součtem obráběcích časů jednotlivých panelů. Tyto časy vznikly simulací softwarem. Přejezdy jsou pochopitelně zanedbány.

3.5.3 VIZUALIZACE PEAKŮ

Samotné grafy obsahují velké množství bodů, které jsou neustále vykreslovány, čím jsou kladeny zbytečně velké nároky na výpočetní výkon, aniž by zobrazení takto malých detailů v tomto měřítku mělo nějaký přínos. Za tímto účelem byla vylepšena dříve vyvinutá technologie analýzy peaků, která navíc odpovídá mantře zobrazování informací (kapitola 2.4.1). Proto byla navržená technika snižování úrovně detailů založená na výstupech z analýzy peaků (kapitola 3.4.2). Zjednodušeně lze popsat práci části programu uvedené níže tak, že v rámci vykreslování grafu ze všech bodů (i) při momentálním hodnocení na intervalu okna o velikosti (j), přičemž tato velikost je vztažená k úrovni zvětšení, resp. počtu aktuálně zobrazených bodů na časové ose, je pro každé takové okno vyhledána hodnota s nejvyšší směrodatnou odchylkou, kde zároveň program vyhodnotil peak. Tato hodnota je pak přičtena k bázi průměrné hodnoty a zobrazena.

```
if (i + j < StdDev.Length && StdDev[i + j] > maxStd && peaks[i + j]!=0)
{
max = i + j;
maxStd = StdDev[i + j];
Graf.Points.AddXY(Time, (Mean[max] + maxStd * peaks[max]));
}
```



Obr. 3.24 Komparační graf s redukovanou úrovní detailů

Bylo provedeno měření s cílem zjistit rozdíly mezi prací s daty s plnou a sníženou úrovní detailů (Obr. 3.24). Pro vlastní analýzu by vybrán proces vrtání 33 otvorů. Změření délky procesu v sekundách bylo provedeno celkem 10krát v každém ze dvou párů dat, kterými jsou první a druhé měření s plnou a sníženou úrovní. Pro vyhodnocení vlivu byla využita rozšířená nejistota měření.

$$u_A = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{kde,} \qquad (3.1.)$$

u_A je standardní nejistota typu A,

s_x je směrodatná odchylka,

n je počet naměřených hodnot,

x jsou naměřené hodnoty,

$\bar{x}$ je aritmetický průměr naměřených hodnot.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (3.2.)$$

S pravděpodobností 95% leží pravá hodnota v intervalu, jehož šíře je daná rozšířenou nejistotou $\Delta_A \bar{x}$.

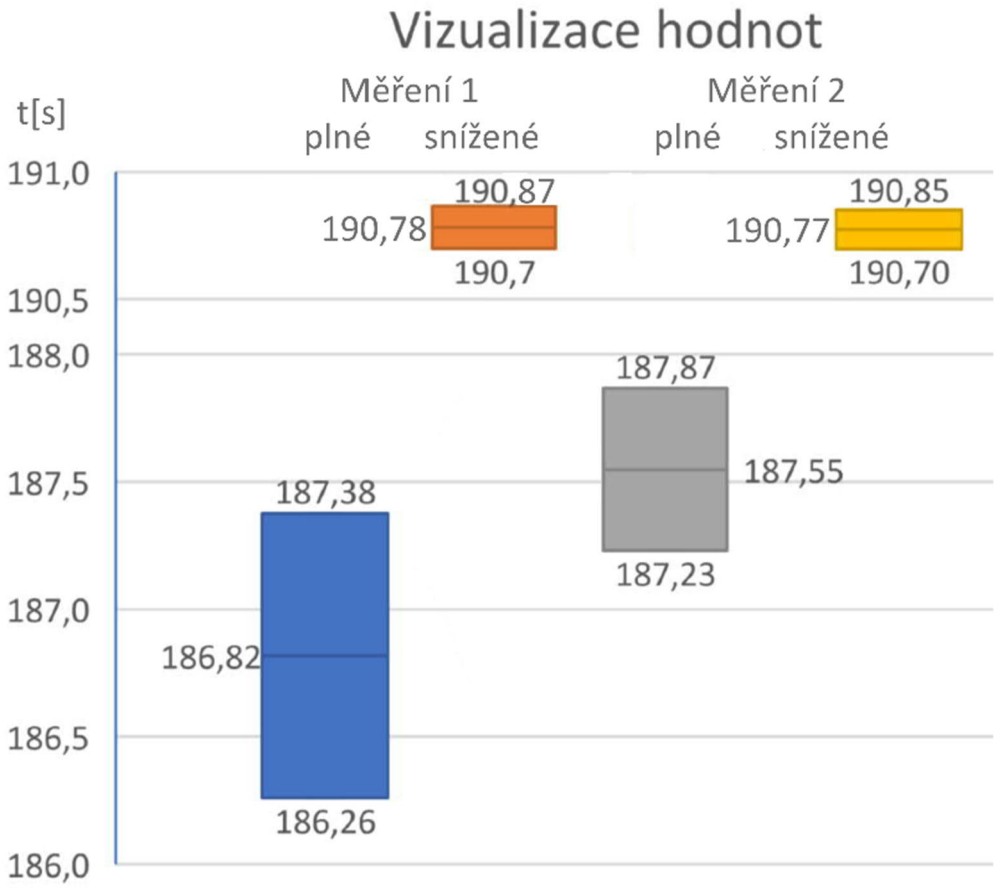
$$\Delta_A \bar{x} = k \cdot S_x \quad \text{kde,} \qquad (3.3.)$$

součinitel k pro konfidenční 95% interval pravděpodobnosti pro 10 měření je 2,26.

Záznam a vyhodnocení opakovaných měření [s]				
	Měření 1, detaily		Měření 2, detaily	
x_i	Plné	Snížené	Plné	Snížené
1	186,94	191,02	187,72	190,70
2	187,72	190,70	186,96	191,00
3	186,22	190,82	187,72	190,70
4	187,74	190,70	186,94	190,90
5	185,46	190,70	187,74	190,70
6	187,74	190,90	187,72	190,82
7	186,22	190,70	187,72	190,70
8	186,96	190,70	187,72	190,70
9	186,96	190,88	186,96	190,70
10	186,22	190,70	188,28	190,82
$\bar{x}$	186,82	190,78	187,55	190,77
u_A	0,25	0,037	0,14	0,034
$\Delta_A \bar{x}$	0,56	0,083	0,32	0,077
$\frac{\Delta_A \bar{x}}{\bar{x}}$	0,3%	0,04%	0,2%	0,04%
	Plné / Snížené 98%		Plné / Snížené 98,3%	

Tab. 3.3 Tabulka měření časového intervalu

Na základě provedeného Dean-Dixonova testu hodnoty nejsou odlehlé. Závěrem analýzy přesnosti použité metody je, že hodnoty změřené na datech s plnou i sníženou úrovní detailů, jsou vzájemně odpovídající. Průměrná hodnota se sníženou úrovní detailů je odlišná o 2%, což je dáno rozdílem mezi subjektivním určením a vypočteným začátkem peaku a nepřesností vzniklou snížením úrovně detailů. Tato hodnota je pro symbolickou analýzu dostatečná. Zajímavým zjištěním je, že práce s daty se sníženou úrovní detailů vykazuje výrazně nižší nejistotu.



Obr. 3.25 Vizualizace nejistoty změřených hodnot

3.5.4 OPAKOVATELNOST A REPRODUKOVATELNOST METODY

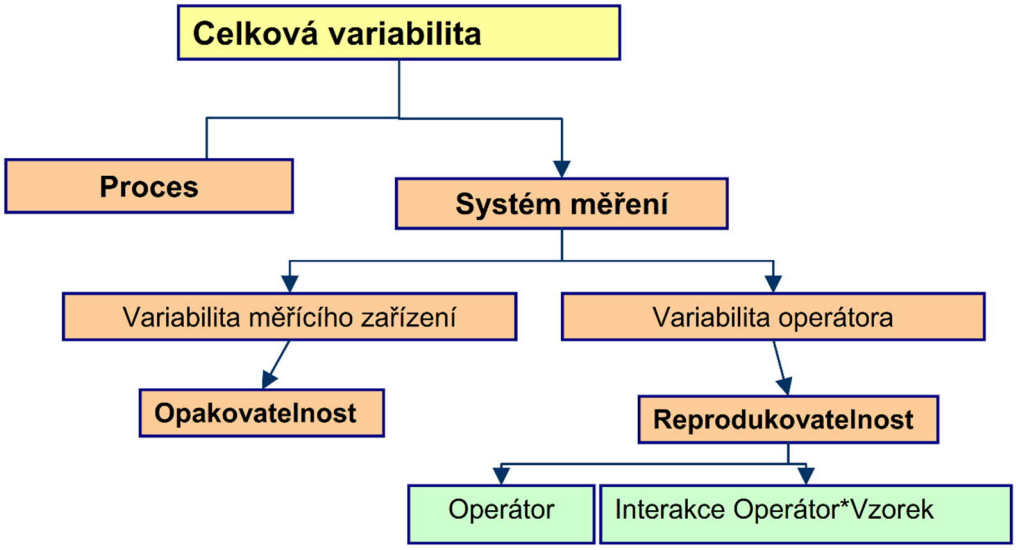
V rámci této kapitoly je zjišťována opakovatelnost a reprodukovatelnost měřící metody a to na datech s plnou úrovní detailů, aby byly eliminovány případné vlivy zjednodušení, které byly na základě předcházející kapitoly zjištěny. Cílem je porovnat zda zjištěné délky trvání významných peaků vytvořených na základě stejného CNC programu získané bez dodržení podmínek opakovatelnosti, kterými jsou

- Tatáž metoda,
- identické zkušební jednotky,
- táž laboratoř,
- tentýž operátor,
- totéž vybavení,
- krátké časové rozpětí mezi opakovanými pozorováními.

Při praktické realizaci měření většinou nelze zajistit neměnné podmínky měření (podmínky opakovatelnosti). Skutečné podmínky měření se obvykle mění (nejčastěji se jedná o změnu pracovníka, který měření provádí), a proto se provádí hodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření (R&R – Repeatability & Reproducibility). Jedním z přístupů k hodnocení R & R je metoda průměru a rozpětí v souladu s metodikou QS 9000 MSA 4. vydání (ČSPJ 2011), jejíž aplikace probíhá v následujících krocích:

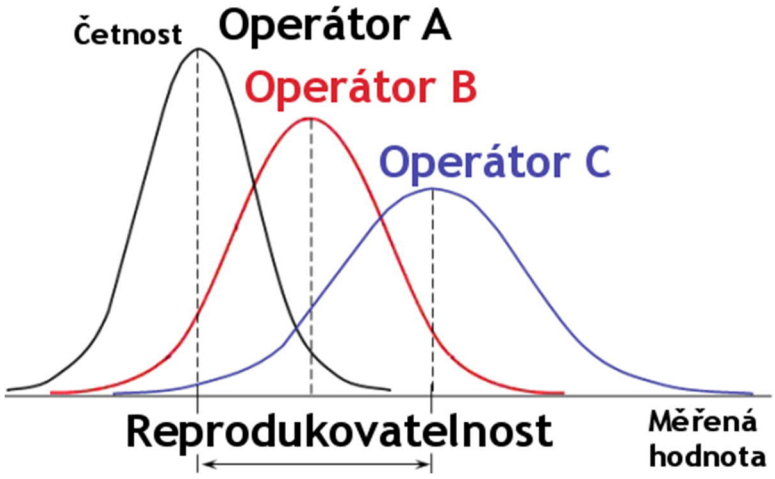
- Přípravná fáze.
- určení měřené veličiny, měřícího zařízení s dostatečnou rozlišovací schopností, poštu operátorů, počtu měřených kusů a počtu opakovaných měření,
- vlastní měření.

MSA (Measurement Systems Analysis), tedy v překladu analýza měřicího systému byla vytvořena ve spojených státech automobilkami Ford, General Motors a Chrysler nebo analýza systému měření. Jedná se o sadu postupů pro hodnocení jak samotného měřidla (např. kalibrovaného měřidla), tak na posouzení celého systému měření. Sama o sobě je MSA analytická technika pro posouzení systému měření, která je však součástí nějakého systému řízení jakosti – buď podle zmiňovaného standardu QS 9000, nebo jiné normy či celostní metody řízení kvality (TQM, SixSigma).



Obr. 3.26 Rozdělení celkové variability zaznamenaných dat (Bednář 2007)

Vyšetření způsobilosti se provádí na několika skutečných výrobcích. Výrobky plní z pohledu této metody role etalonů. Skutečné hodnoty etalonů však není potřeba zjišťovat – nemají žádný vliv na výsledek. Metoda spočívá v opakovaném měření jednoho rozměru několika různých kusů stejného výrobku několika pracovníky (každý pracovník měření hodnot skupiny výrobků několikrát zopakuje), zjištění opakovatelnosti EV (variability měřicího zařízení při opakovaném měření jedním pracovníkem), reprodukovatelnosti AV (variability hodnocení při opakovaném měření různými pracovníky) a celkové variability měření R&R% vyjádřené v procentech vzhledem k toleranci výrobku nebo vzhledem k proměnlivosti procesu (variabilitě výrobku). Opakovatelnost a reprodukovatelnost je možné pomocí této metody posuzovat individuálně. (Bednář 2007)



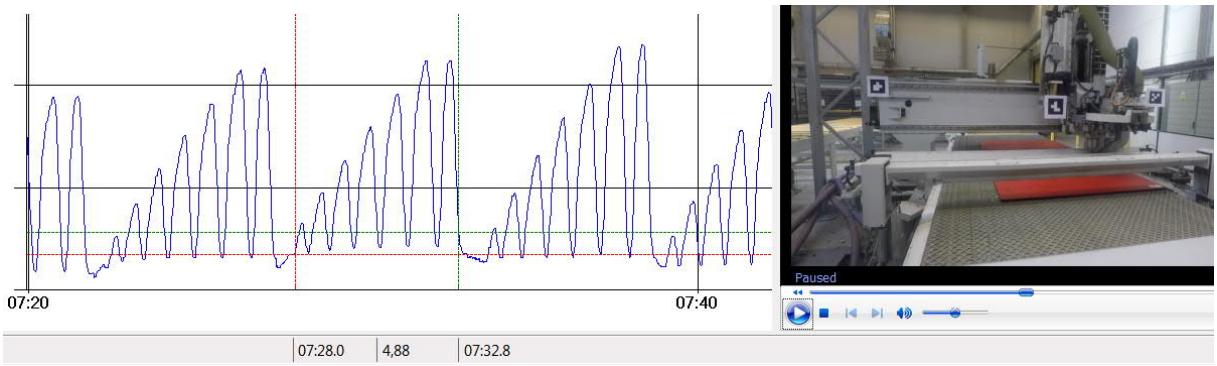
Obr. 3.27 Vizualizace reprodukovatelnosti

- Provádí se v místě používání měřidla a všichni operátoři by měli používat stejný postup měření. Měření se provádí v náhodném pořadí. Naměřené hodnoty se zaznamenávají.
- Vyhodnocení analýzy

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

Tab. 3.4 Hranice pro přípustnost R&R měřidla vzhledem k procesu

Obrábění bylo provedeno celkem třikrát a pokaždé pořízen záznam dat. Dvakrát byl panel obroben stejným CNC programem z důvodů ověření opakovatelnosti a reprodukovatelnosti metody a následně byl stejný panel obroben CNC programem upraveným na základě přecházejících zjištění a to pro následné porovnání výsledků. Při měřeních opakovatelnosti a reprodukovatelnosti byla kamera umístěná záměrně odlišně, aby se ověřil vliv jiného nastavení. Snímková frekvence videozáznamu pořízeného kamerou GoPro HERO 4 je 50 snímků/s, a tak lze odečítat hodnoty po 0,02 s.



Obr. 3.28 Opakované měření délky stejného peaku

Operátor	Měření	Změřené hodnoty pro peak číslo [s], tolerance 0,4 [s]										Průměr [s]
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A	1	4,95	4,94	4,94	4,86	4,92	4,95	4,86	4,92	4,93	4,86	4,913
	2	4,95	4,93	4,94	4,87	4,92	4,95	4,87	4,93	4,94	4,87	4,917
	3	4,95	4,94	4,94	4,86	4,92	4,93	4,86	4,93	4,94	4,86	4,913
Průměr		4,95	4,937	4,94	4,863	4,92	4,943	4,863	4,927	4,937	4,863	$\bar{X}_A$ = 4,914
Rozsah		0	0,01	0	0,01	0	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	$\bar{R}_A$ = 0,008
B	1	4,93	4,94	4,92	4,86	4,95	4,95	4,86	4,92	4,97	4,87	4,917
	2	4,94	4,95	4,94	4,88	4,93	4,95	4,88	4,91	4,97	4,88	4,923
	3	4,93	4,96	4,94	4,87	4,92	4,94	4,87	4,92	4,97	4,87	4,919
Průměr		4,933	4,950	4,933	4,870	4,933	4,947	4,870	4,917	4,970	4,873	$\bar{X}_B$ = 4,919
Rozsah		0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0	0,01	$\bar{R}_B$ = 0,0149
Průměr součást		4,942	4,943	4,937	4,867	4,927	4,945	4,867	4,922	4,953	4,868	$\bar{\bar{X}}$ = 4,917 R_p = 0,0866
$\bar{\bar{R}} = \frac{\overline{R_A} + \overline{R_B}}{\text{počet operátorů}}$												$\bar{\bar{R}}$ = 0,0115
$R_0 = \text{Max}\,\bar{X}i - \text{Min}\,\bar{X}i_i$												R_0 = 0,00533

Tab. 3.5 Změřené hodnoty operátorů A a B

Vyhodnocení se provádí na základě tolerance výrobku a v tabulce níže (Tab. 3.6) označeno jako A nebo na základě celkové proměnlivosti výrobku TV (variability výrobního procesu) v tabulce níže jako varianta B.

Vyhodnocení	Ozn.	Hodnoty [s]	A [%]	B [%]
Opakovatelnost	EV	0,00679	10,19	23,99
Reprodukovatelnost	AV	0,00356	5.34	12,57
Opak. a reprod.	R&R	0,00767	11.51	27,08
Proměnlivost kusu	PV	0,02727	40.90	96,26
Proměnlivost celková	TV	0,02832		
Počet rozlišitelných kategorií	ndc	5,01 [-]		

Tab. 3.6 Tabulka vyhodnocení

$$EV = \sigma_e = \bar{\bar{R}} \cdot K_1$$
$$EV_A[\%] = 100 \cdot \frac{EV}{TOL/6} \qquad (3.4.)$$
$$EV_B[\%] = 100 \cdot \frac{EV}{TV}$$

kde,

σ_e - směrodatná odchylka opakovatelnosti odhadována pomocí průměrného variačního rozpětí,

K_1 - tabulkový koeficient závislý na počtu opakování měření,

TV - proměnlivost celková.

$TOL/6$ – síře tolerančního pole daná požadavky zákazníka.

$$AV = \sqrt{\sigma_0 - \frac{EV^2}{n \cdot r}} = \sqrt{R_0 \cdot K_2 - \frac{EV^2}{n \cdot r}}$$
$$AV_A[\%] = 100 \cdot \frac{AV}{TOL/6} \qquad (3.5.)$$
$$AV_B[\%] = 100 \cdot \frac{AV}{TV}$$

kde,

σ_0 - směrodatná odchylka reprodukovatelnosti,

R_0 - variační rozpětí průměrů opakovaných měření jednotlivých kusů jednotlivými operátory,

K_2 - tabulkový koeficient závislý na počtu operátorů.

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \qquad (3.6.)$$

kde,

$$PV = R_p \cdot K_3 \qquad (3.7.)$$

kde,

K_3 - tabulkový koeficient závislý na měřených součástí.

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2}$$ (3.8.)

kde,

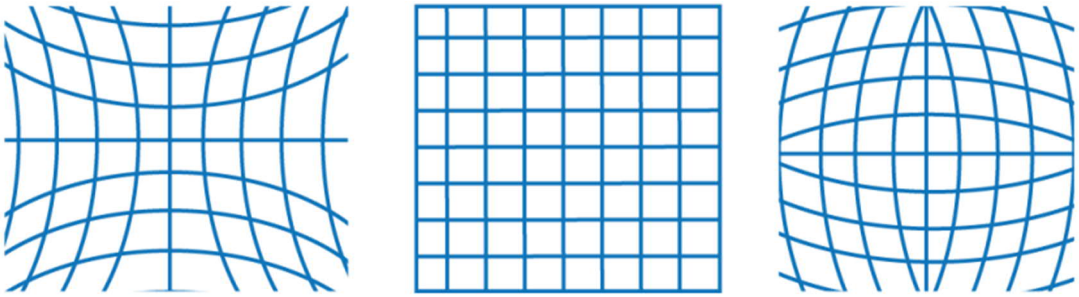
$$ndc = 1.41 \cdot \frac{PV}{R\&R}$$ (3.9.)

kde,

Variabilita systému měření je vzhledem k procesu i k požadavkům zákazníka podmíněně způsobilá. Rozdíly mezi opakovatelností a reprodukovatelností jsou přijatelné.

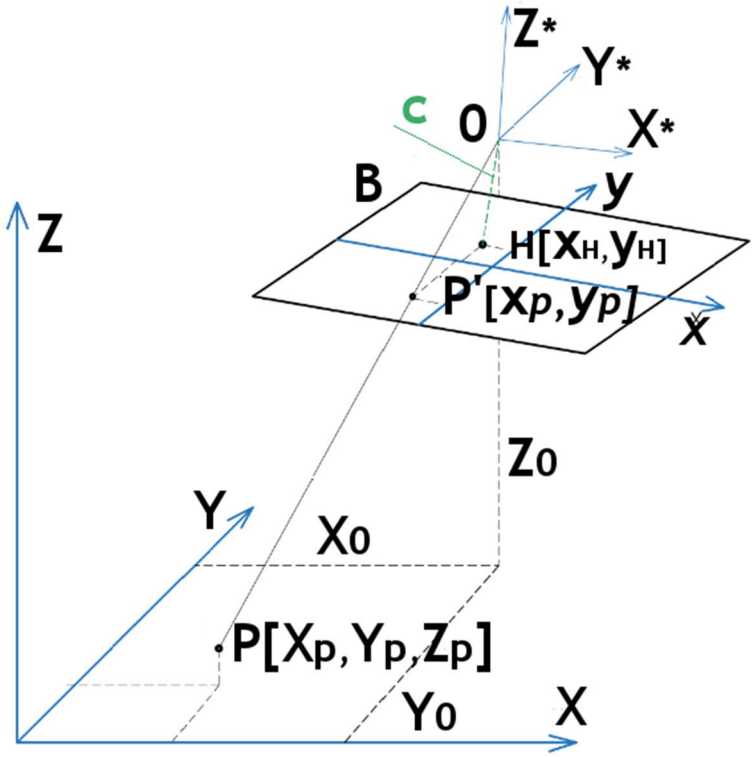
3.5.5 STANOVENÍ DRÁHY NÁSTROJE

V rámci práce byly vyzkoušeny různé postupy rekonstrukce snímkových souřadnic na objektové, vycházející z principu fotogrammetrie (Obr. 3.30). Nejlepších výsledků je pak dosaženo při zaostření a zaclonění na fixní vzdálenost, kdy je možné model kamery považovat za konstantní. V závislosti na použité kameře mohou být tyto parametry velmi důležité, protože u širokoúhlých objektivů je již zkreslení značné.



Obr. 3.29 Vliv radiální distorze – negativní, žádná a pozitivní.

Zanedbáním zkreslení optických členů kamery, tedy radiální a tangenciální distorze, lze snímkování objektu považovat za centrální projekci viz obr. 3.2. Platí principy paprskové optiky, a tedy, že objektový bod P (X_P, Y_P, Z_P), jemu odpovídající snímkový bod P´ (x_p, y_p) a projekční centrum O (X_o, Y_o, Z_o) leží na jedné projekční přímce P.



Obr. 3.30 Centrální projekce snímkových a objektových souřadnic

X, Y, Z - souřadný systém objektu

X_*, *Y*, Z** - pomocný souřadný systém

X_O, Y_O, Z_O -souřadnice středu promítání v souřadném systému v souřadném systému objektu

X_P, Y_P, Z_P - souřadnice měřícího bodu P v souřadném systému objektu

x, y - souřadný systém snímku

x_H, y_H - souřadnice ohniska v rovině snímku

x_P, y_P - souřadnice měřícího bodu P promítnutého do roviny snímku

B - rovina snímku

c – konstanta kamery (ohnisková vzdálenost)

Vztah mezi souřadnicemi bodu P v souřadném systému objektu a souřadném systému snímku lze vyjádřit takto:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z_p^*} \begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \quad \text{kde,} \tag{3.1.}$$

$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix}$ - distorze objektivu,

$\begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \\ Z_p^* \end{bmatrix}$ - souřadnice v pomocném souřadném systému bodu P,

$$\begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \\ Z_p^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad \text{kde,} \tag{3.2.}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad \text{kde,} \tag{3.3.}$$

R - ortogonální matice rotace.

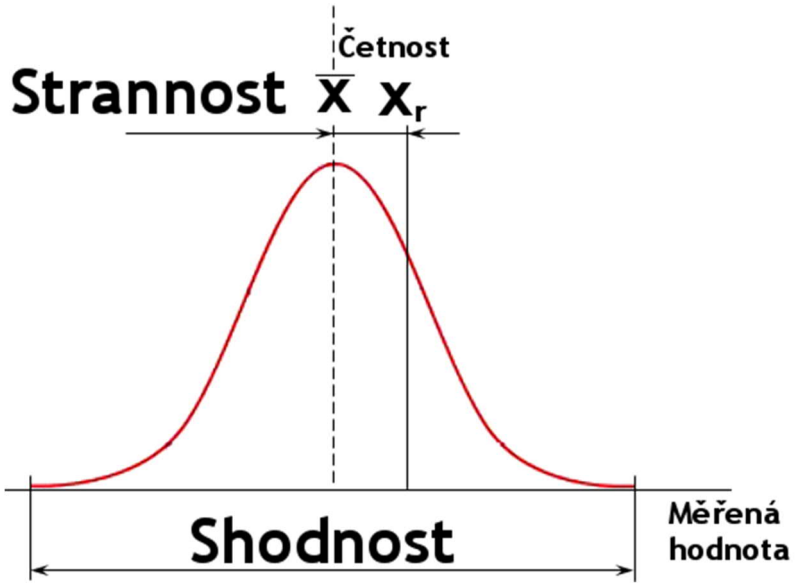
Objektové souřadnice je nutné následně převést na délkové pomocí reference o přesně známé délce. I tento výpočet má určitou nejistotu a dosažené přesnosti s využitím jedné kamery jsou mnohem nižší než standartní přesnosti obráběcích strojů**.** Proto byly pro hodnocení způsobilosti stroje (kapitola 0) převzaty data z CNC programu.

Pro stroje, kde je možný výstup z řídicího systému stroje je, má-li stoje dostatečnou přesnost pří obrábění, lepší využití těchto exaktních dat. Lze totiž uvazovat, že přesnost polohování obráběcího stroje, může být popsána jedním z následujících vyjádření:

- Ověřené a verifikovaná pomocí měřícího zařízení.
- Dostatečná potřebám uživatele, aniž by byla známá odchylka.
- Nedostatečná a pak je nezbytné před vlastní analýzou a optimalizací provést měření přesnosti a na jeho základě navrhnout a realizovat opatření pro to, aby přesnost byla dostatečná.

3.5.6 HODNOCENÍ ZPŮSOBILOSTI MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU

Pomocí postupů c_g, c_{gk} lze kvantifikovat statistické veličiny jakosti měřidla, a to strannost a opakovatelnost. Indexy c_g , c_{gk} určují, zda výsledek měření kontrolního etalonu leží pravděpodobností 99,73% ve zvoleném pásmu tolerance měřidla. Hodnoty těchto indexů určují způsobilost měřidla pro daný účel, ke kterému má sloužit na základě na základě velikosti tolerance měřeného rozměru. Tabulka na konci kapitoly (Tab. 3.8) určuje mezní hodnoty pro schválení, nebo zamítnutí měřidla. (Pernikář 2005).



Obr. 3.31 Grafické znázornění strannosti měření (Pernikář 2005)

Strannost je rozdíl mezi přijatou referenční hodnotou a střední hodnotou výsledků zkoušek. Pro kvantifikaci strannosti je třeba získat konvenčně pravou hodnotu znaku, která se získá zpravidla pomocí referenčního etalonu. Jestliže je strannost výsledků měření příliš velká, je nutno prověřit potenciální příčiny:

- Chyba etalonu,
- opotřebení měřidla,
- měřidlo není vyrobeno pro daný rozměr,
- nesprávná kalibrace,
- vliv operátora,
- vliv prostředí.

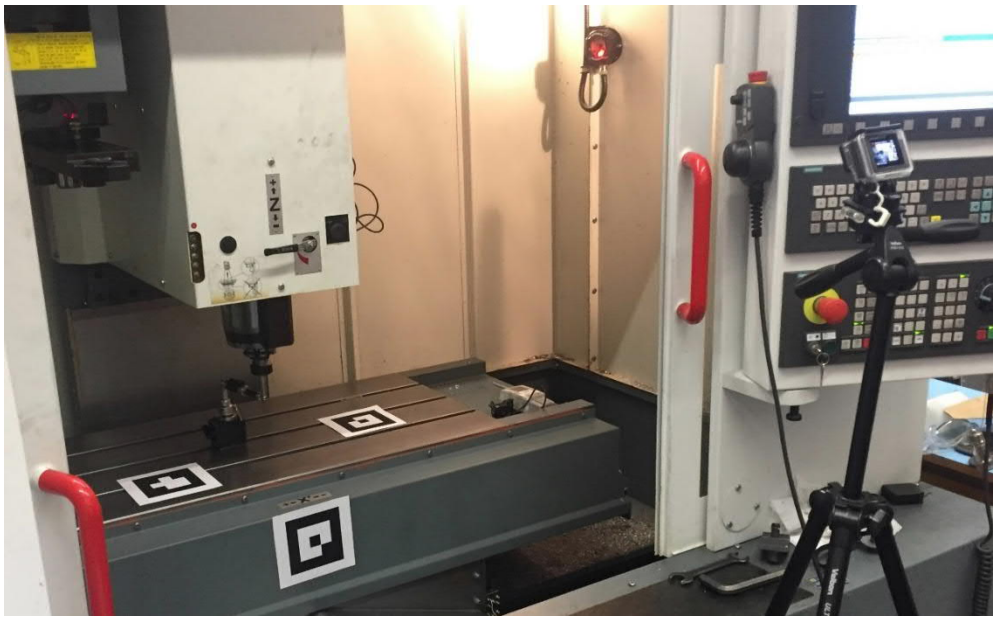
Opakovatelnost představuje shodnost měření v podmínkách opakovatelnosti. Podmínky opakovatelnosti jsou podmínky, kdy nezávislé výsledky měření získává stejný operátor, stejnou metodou, stejným měřícím prostředkem, ve stejném místě měření a v co nejkratším časovém rozmezí. Před hodnocením opakovatelnosti je konzistentní variabilita vlastního systému (systém je zvládnut). Zdrojem neopakovatelnosti bývá obvykle měřidlo a variabilita polohy měřeného objektu v měřidle. Tyto skutečnosti nejvíce ovlivňují velikost rozpětí výsledků opakovaných měření za stejných podmínek. Opakovatelnost se kvantifikuje pomocí parametru rozptylu výsledků měření. V případě příliš velkého rozptylu je nutno provést rozbor příčin a jejich následné odstranění.

Přesnost měřícího systému, který umožňuje zpracování obrazu z kamery, byla ověřena pomocí srovnání s Etalonem. Jako etalon sloužilo Renishaw ballbar QC20-W, které se skládá z těchto komponentů:

- Vlastní ballbar (Přesný teleskopický lineární snímač s dvojicí přesných koulí na obou koncích).
- Dva přesné magnetické držáky, z nichž jeden je připevněn ke stolu stroje a druhý k vřetenu stroje nebo vřeteníku.

V rámci měření byly pořízeny tři sady dat:

- Data ze sondy ballbar, kde software Renishaw vypočítá hodnoty polohové přesnosti (kruhovitost, odchylka kruhovitosti) v souladu s mezinárodními normami ISO 230-4 a ANSI/ASME B5.54. a zároveň dokáže stanovit exaktní hodnotu posuvové rychlosti.
- Zároveň s měřením pomocí sondy bylo provedeno měření pomocí systému zpracování videa a pohyb stroje nasnímání kamerou byl zpracován dle postupu uvedeného v kapitole 3.5.1.
- Následně byla pořízena kalibrační data, kdy nástroje exaktně objížděl virtuální čtverec, který určuje obálku kruhového pohybu při měření pomocí sondy ballbar. Tyto polohy pak byly využity pro odměření poloh v kruhovém zobrazení.



Obr. 3.32 Stroj MCV-754 s nainstalovanou sondou ballbar

Změřené rychlosti posuvu [mm/min]									
Nominální 500		**x_e 500,2**		**Tolerance 60**		**$\bar{x}$ = 503,21**		**S_g = 0,73**	
503,3	502,5	504,2	502,7	503,7	504,3	504,1	502,9	502,3	502,7
502,7	503,2	503	503,2	502,7	503,8	504,1	503,8	501,9	502,5
503,7	504,1	501,9	502,5	503,5	503,4	504,3	503,2	503,9	502,2
Nominální 2500		**x_e 2498,3**		**Tolerance 300**		**$\bar{x}$ = 2481,18**		**S_g = 2,72**	
2483,2	2481,6	2475,3	2480,5	2483,3	2476,8	2481,3	2484,9	2482,7	2483,4
2482,1	2479,9	2476,6	2480,6	2481,8	2483,5	2481,2	2475,5	2479	2486,3
2485,4	2483,1	2481,5	2479,6	2481,1	2480,2	2478,8	2483,5	2480,7	2482,1
Nominální 7500		**x_e 7457,8**		**Tolerance 900**		**$\bar{x}$ = 7522,04**		**S_g = 4,43**	
2483,2	2481,6	2475,3	2480,5	2483,3	2476,8	2481,3	2484,9	2482,7	2483,4
2482,1	2479,9	2476,6	2480,6	2481,8	2483,5	2481,2	2475,5	2479	2486,3
2485,4	2483,1	2481,5	2479,6	2481,1	2480,2	2478,8	2483,5	2480,7	2482,1

Tab. 3.7 Tabulky změřených hodnot

Index způsobilosti měřícího zařízení (MZ) C_g (Index způsobilosti) vyhodnocuje přesnost měřícího zařízení na základě následujících vztahů:

$$C_g = \frac{0.2 \cdot T}{6 \cdot s_g} \qquad \text{kde,} \qquad (3.4.)$$

T - zvolený toleranční rozsah,

s_g - je výběrová směrodatná odchylka výsledků měření kontrolního etalonu.

$$S_g = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}_g)^2} \qquad \text{kde,} \qquad (3.5.)$$

$\bar{x}_g$ - je výběrový průměr výsledků měření kontrolního etalonu.

Rozšířený index způsobilosti C_{gk} vyhodnocuje přesnost měřícího zařízení na základě následujícího vztahu:

$$C_{gk} = \frac{0.1 \cdot T - |\overline{x_g} - x_e|}{3 \cdot s_g} \qquad \text{kde,} \qquad (3.6.)$$

$\bar{x}_g$- střední hodnota,

x_e - hodnota etalonu.

Indexy způsobilosti měřícího zařízení C_g a C_{gk} ve vztazích (4.4) a (4.5) hodnotíme, zda výsledky měření daného Etalonu budou s pravděpodobností 99,73% nalezeny ve zvoleném tolerančním rozsahu (20%). Index způsobilosti c_g je definován horním a dolní limitem USL – LSL a přirozenou variabilitou porovnávaného procesu, takže může být obecně vyjádřen jako závislost:

$$c = \frac{(USL - LSL)}{6 \cdot \sigma} \qquad \text{kde,} \qquad (3.7.)$$

Hodnota je určená hodnotou směrodatné odchylky σ. Hodnota (USL – LSL) by neměla být menší než 8σ, což vytváří hodnotu indexu způsobilosti procesu c = 8/6 = 1.333, která odpovídá četnosti neshod 64 ppm na hodnoceném procesu.

Hodnoty indexů způsobilosti [-]			
Nominální	**500**	**2500**	**7500**
C_g	2,74	3,68	6,77
C_{gk}	1,36	1,58	1,94
Způsobilé	Ano	Ano	Ano
$C_{gk} \geq 1{,}33$	Měřící zařízení je způsobilé pro měření rychlosti posuvu s uvedenou tolerancí		
$C_{gk} < 1{,}33$	Měřící zařízení není způsobilé pro měření rychlosti posuvu s uvedenou tolerancí		

Tab. 3.8 Tabulka hodnot indexu způsobilosti (Montgomery 2009)

Vzhledem k tomu, že vypočtená hodnota indexů způsobilosti je větší než hodnota pro stanovení způsobilosti měřidla v tabulce výše (Tab. 3.8), tak lze konstatovat, že s uvedenou tolerancí (Tab. 3.7) je měřidlo způsobilé.

3.5.7 ZÁVĚR NUMERICKÉ ANALÝZY

Přes snahu implementovat do analýzy postupy zobrazené na obrázku, mapující tok dat v rámci Industry 4.0 (Obr. 3.1) tzn. z velkého množství dat, v tomto případě reprezentovaných vysoce kvalitním videem s cílem vytvořit informaci, tedy časový vizualizační protokol, nebylo možné tento cíl v případě konvenční analýzy plně uskutečnit. Video, přes veškerou snahu o kvalitní kompresi pomocí nejnovější metody, je pro skladování příliš velké a nesplňuje podmínky přepracování dat na informace (stále se skladují hrubá data). Všechny tyto informace jsou ještě znásobeny tím, že zobrazení videa mělo v rámci vlastní analýzy subjektivně velmi slabý přínos, a nikdo ze tří operátorů jej nepovažoval za největší přínos navržené metody. Důvodem je, že video neposkytuje informaci o tom, co se na stroji bude odehrávat a v podstatě ani co se děje, ale především, co se stalo, což není pro analýzu nejdůležitější informace.

4 VYUŽITÍ VIRTUÁLNÍ REALITY

Veškeré informace získané v předcházejících měřeních, především v oblastech práce s daty a jejich zpracování na informace, byly uplatněny při hledání vhodného řešení pro implementaci do virtuální reality. V této kapitole jsou sepsány včetně jejich přínosů.

4.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY

Na základě rešerše (kapitola 2.4) a řady experimentů bylo zjištěno, že je u virtuálně podporovaného procesu kontraproduktivní poskytovat operátorovi najednou velké množství informací přesto, že současné technologie toto výkonnostně zvládají, naopak je nezbytné se zamyslet, jak vizuální reprezentace může umožnit zobrazení dat, která jsou buď právě potřeba, nebo si operátor vybere sám tím, že uskuteční jednoduchou akci. Toto potvrdily i nové publikace ostatních autorů (Anthes et al. 2016), stejně následná zpětná vazba po řadě testů, které byla na vytvořených řešeních podniknuta jejich uživateli.

Obecně vede množství informací k totálnímu přehlcení systémů a lidí, k ignoraci detailů, a nakonec i souvislostí. Proto je nezbytné vytvářet základy, na kterých budou systémy a stroje inteligentnější, právě tak, aby se dokázaly buď samy rozhodnout, co je podstatné a dále už pracovat pouze s detaily nebo umožnili jinak práci s detaily tak, aby množství informací bylo redukováno. Do současné doby totiž objem dat spíše rostl a množství informací tedy také. Níže jsou popsané důležité vlastnosti, které každá moderní virtuální analýza musí mít a je u nich zaveden jak český, tak anglický název, aby mohly být následně publikovány.

Časová závislost (**Timeflow**) je analýza pomocí komparace časových oken na sledování různých průběhů a rolování časem vpřed, vzad. Obecně je pro operátora časová závislost v datech velmi důležitým parametrem a test v 2D prostoru prokázaly, že na základě znalosti hrubých časových údajů, lze efektivně porovnávat procesy s rozdílným průběhem a hledat kritická místa. Na základě tohoto bylo rozhodnuto, že řešení ve virtuální realitě musí mít tuto časovou závislost zachovanou. Samotný 3D Sankey diagram zobrazující aktuální hodnoty, byl po dalších testech vyhodnocen jako ne zcela dostačující i pro virtuální realitu i přesto, že zobrazuje výhled analýzy špiček. V podstatě by se tato zkušenost dala shrnout do informace, že z hlediska časové závislosti je pro operátora důležité znát jakým způsobem se nadcházející data liší od současných.

Úrovně detailů (**Various levels of details**) jejíž podstatou je možnost adaptivní volby úrovně detailů. Stejný problém byl již řešen v rámci vizualizace peaků a uspokojivé řešení bylo nalezeno až v rámci měření KOMPAN (kapitola 0). I ve virtuální realitě musí mít vyřešena možnost, jak uživateli poskytovat optimální úroveň detailů a vyzdvihnout nezbytné peaky nezávisle na absolutní velikosti hodnot proměnné. Konvenční analýza umožnuje zobrazit 3 stroje souběžně nebo mezi nimi přepínat. V rámci využití výpočetní síly virtuální reality je nezbytné hledat řešení pro zobrazení většího množství různých strojů. Cílem je umožnit snadnou orientaci v datech celého podniku. To znamená, zaměření se na důležité, ignoraci okolního zájmového místa a doslova proměnnou hloubku ostrosti, pokud se jedná o informace. Nejedná se tedy o úsporu grafického výpočetního výkonu, tak jako se to používá například u počítačových her, které využívají to, že vykreslují jen ty detaily, které ještě rozpozná oko. Naopak u analýzy dat je vhodné dát přednost dokonalosti podání informací před

dokonalostí vizualizace. To může znamenat, že ve výsledku se kvalita výstupů záměrně sníží.

Kritické filtrování (**Filter critical**) je technologie, která umožnuje rychlý přesun do míst, která jsou v aktuálním měřítku zobrazení důležitá, jejich zvětšení a zároveň rychlý skok zpět na přehled. Vychází z mantry vizualizace informací, nicméně ji ještě rozšiřuje o to, že si uživatel v detailu dokáže zobrazit situaci, kterou tento detail představuje. Tato myšlenka vznikla, na základě kladně hodnocené stránky vizualizace, doprovázené oknem videa. Takto by se dala rozšířit vizualizační mantra z

„Overview, zoom & filter, details-on-demand" na nekonečnou smyčku pro ČVP

„Overview, zoom & filter, details-on-demand, visual compare"

⇨ zoom & filter, details-on-demand, visual compare"

⇨ zoom & filter, details-on-demand, visual compare" atd.

Obr. 4.1 Typický layout[24] strojů v závodě

Cílem je zdůraznit, že se cílí na vizuální srovnání, a to i v různých úrovních detailů. V současném stavu poznání není možné jednoduše říci, jaké informace přinese analýza závodu (Obr. 4.1) se stroji různých koncepcí a různých funkcí, a jaké informace bude možné, nutné stavět proti sobě. Nicméně je potřeba pamatovat na informaci, že to můžou být různé úrovně zvětšení dat, která se budou navzájem porovnávat.

Imerzní rozměr (**Extra dimension**) umožnuje efektivní využití principu imerze tím, že se již v návrhu modelu vizualizace zohlední využití Imerzní virtuální reality, a to do té míry, že se od návrhu způsobu využití imerzního rozměru začíná. Stejná myšlenka je hnacím motorem současných 3D filmů. Film je natočen tak, aby scén, které potenciál této technologie využívají, bylo co nejvíce. Jsou sice nástroje na převedení staršího filmu do 3D, nicméně pak je imerze mnohem menší. Při návrhu vizualizace je tak potřeba začít úplně znovu.

[24] Půdorysné rozvržení strojů

4.2 IMERZNÍ ČVP

V rámci analýzy možného řešení pro imerzní ČVP byly zváženy následující technologie předávání informací uživateli:

- Využití CAVE
- Využití Powerwall
- Brýle pro virtuální realitu
- Využiti mobilní virtuální reality

Z hlediska kladených požadavků lze shrnout kapitolu 4.1 takto:

- Navrhnout využití imerzního rozměru
- Přednost má dokonalost podání informací před dokonalostí vizualizace
- Časová závislost zobrazuje hlavně budoucnost
- Vizuální komparace různých úrovní dat

Právě v době realizace poslední fáze této práce přišla na trh nová platforma firmy Google s názvem Daydream. Jedná se o kompletní řešení pro virtuální realitu, kde jako zobrazovací plocha slouží displej mobilního telefonu. Vychází z platformy Cardboard, ale má mnoho důležitých novinek.

Obr. 4.2 Platforma Cardboard (vlevo) a vpravo Daydream s ovladačem

Zatímco Cardboard měl jedno tlačítko a navigace v prostoru byla fakticky omezená na snímání pohybu hlavy, Daydream již má možnosti navigace a práce s daty téměř na stejné úrovni jako CASE nebo Powerwall. Platforma Daydream má poměrně širokou softwarovou podporu a z nabídky byl vybrán poměrně rozšířený engine s názvem Unity. Ten již obsahuje veškeré grafické prvky, nezbytné k vytvoření grafické aplikace, a tak se vlastní práce může soustředit na vizualizaci dat. Pro tento typ analýzy je potřeba nejnovější model telefonu s operačním systémem Android, nicméně po dílčích softwarových úpravách byl použitelný i poměrně starý typ LG G3. Výhodou je vysoké rozlišení displaye, které je důležité, protože jej operátor sleduje z velmi krátké vzdálenosti a mohly by jít rozpoznat jednotlivé pixely.

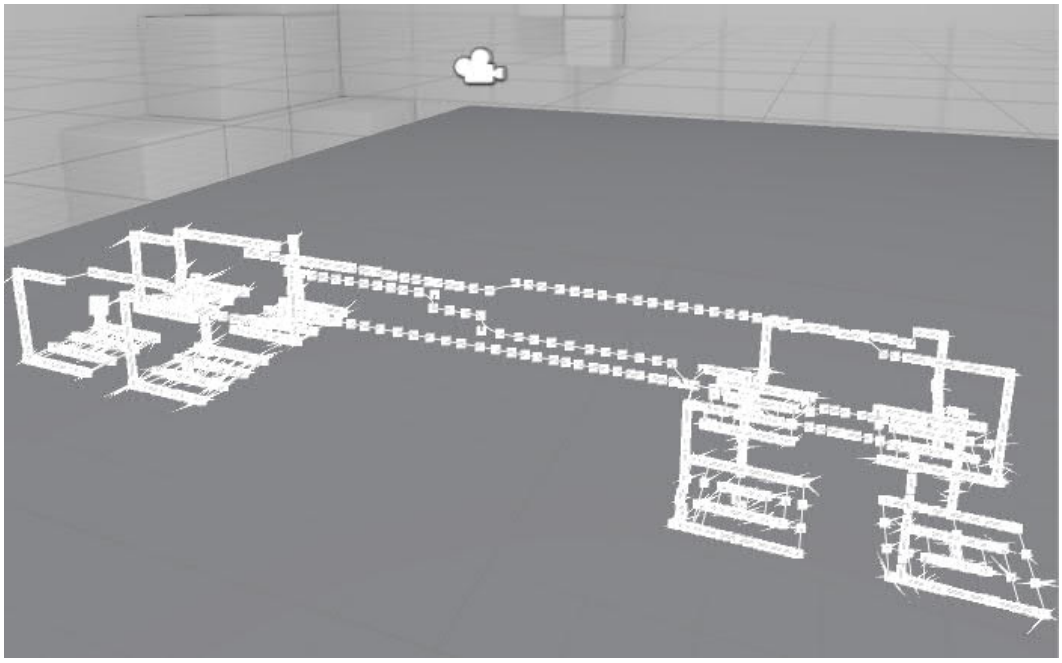
Vzhledem k tomu, že vývoj ČVP v imerzní virtuální realitě probíhal souběžně s měřením strojů ve formě Kompan, byly jako vzorová data vybrány právě tyto. To rovněž umožňuje převést nalezené výsledky a navržené změny zpět do praxe a ověřit jejich dopad. Již v rámci 2D analýzy dat, bylo zjištěno, že pro porovnání a skutečnou analýzu práce stroje je nezbytné vyhodnotit všechny osy. Nicméně lze vyvodit závěr,

že pro vlastní analýzu má osa Z stroje mírně vyšší vypovídající hodnotu než každá ze zbývajících 2 os.

To je způsobeno dvěma důvody:

- Osy X a Y jsou často v pohybu nezávislé.
- Osa Z ohraničuje věty programu zvenčí, jelikož zobrazuje přejezdy mezi nimi.
- Osa Z může sama vypovídat například o výskytu obrábění vzduchu.

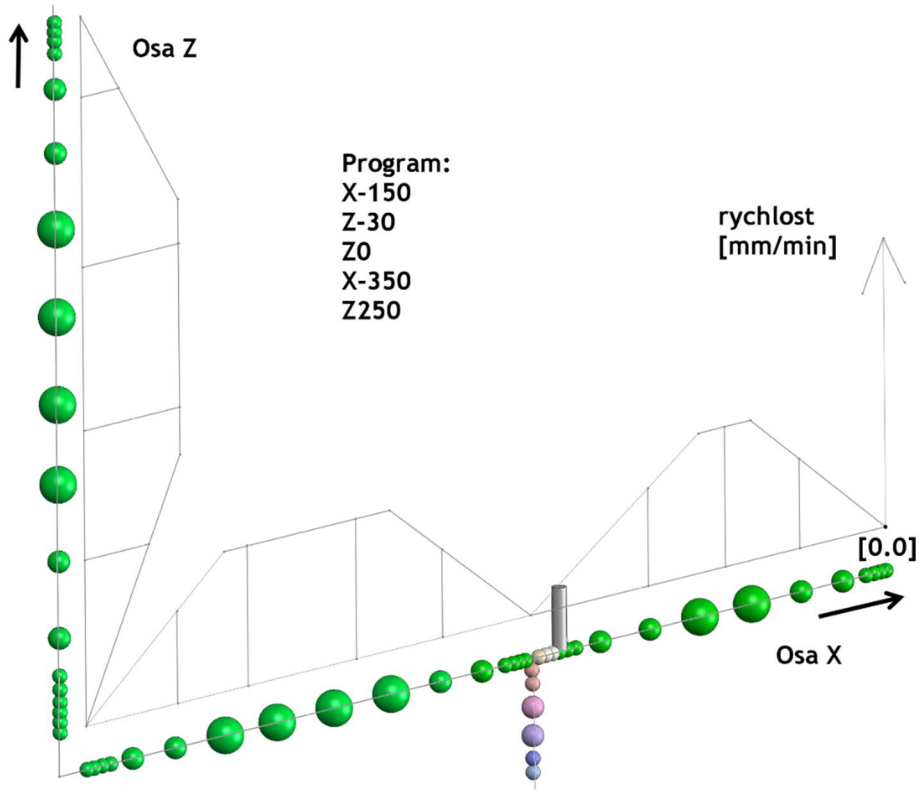
Nakonec byla vytvořena simulace přímo z dat získaných extrakcí ze stroje a to, tak, že byla data, proložena křivkou (Obr. 4.3). Vzniklý obrazec byl podle očekávání velmi špatně čitelný a výpočtově velmi náročný. Tato křivka byla použita pouze jako podklad. Na ní je připojena vizualizace pohybujícího se nástroje.



Obr. 4.3 Část bodových dat proložených úsečkou

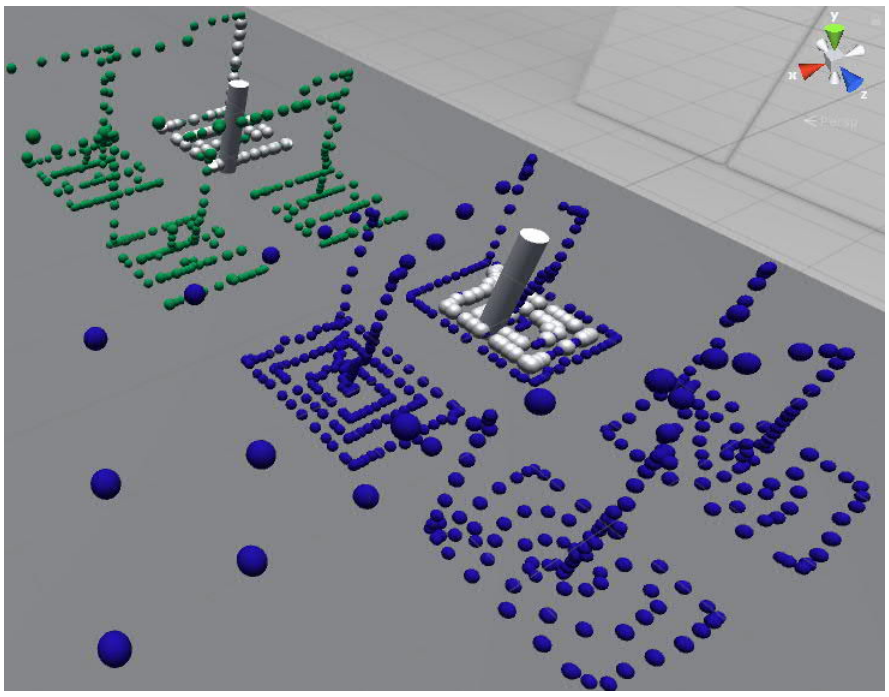
Pro analýzu byla použita vizualizace toku, která je vytvořená z objektu, jejichž vzájemná vzdálenost a jejich průměr je úměrný sledované veličině.

Může se jednat opět o rychlost pohybu (případ Kompan) nebo o vyobrazení spotřebované energie. Na základě dříve rešeršní práce byl do vizualizace implementován i náhled okamžité práce stroje. Ten barevným přechodem vytváří představu o pohybu stroje v následujících několika vteřinách a kvalita jeho vyobrazení je úměrná vzdálenosti pozorovatele. Na rozdíl od výše zobrazené vizualizace křivkou, kde se ze statického náhledu uživatel nedozví nic o dynamice pohybu stroje, poskytuje tento přístup, díky vizualizaci toku ve virtuální realitě pro uživatele, poměrně jasné informace i pokud je vizualizace v čase zrovna pozastavena. Příklad vizualizace pohybu stroje na základě fiktivního programu je níže (Obr. 4.4).



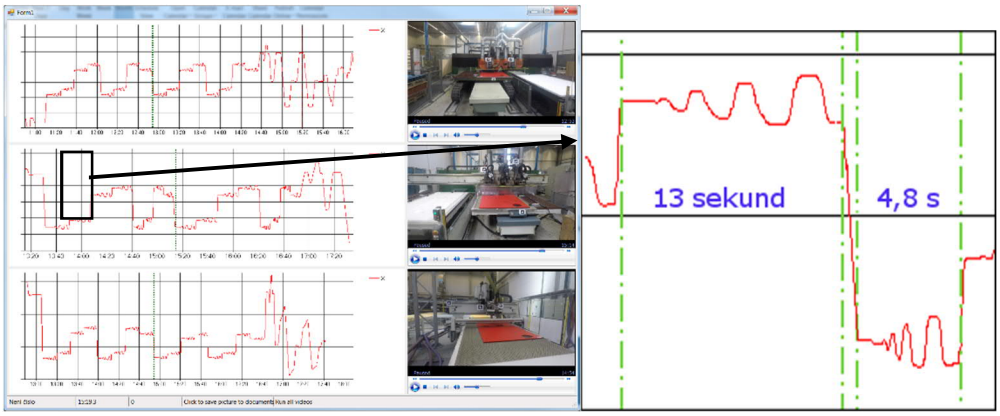
Obr. 4.4 Schéma definice vizualizace rychlosti podél dráhy nástroje

Pro identifikaci dat, při porovnávání různých strojů, byla použita barva (CNC2 zelený a CNC3 modrý). Na následujícím obrázku (Obr. 4.5), je na první pohled zřejmé, že celkem 8 kapes není obrobeno identicky. Rozdíl se nachází na modrém stroji, kdy je polovina ze 4 modrých kapes frézována značně nižší rychlostí než identicky vypadající geometrie vpravo dole (Obr. 3.19).



Obr. 4.5 Celková vizualizace porovnání strojů CNC2 a CNC3

Program je generovaný pomocí software AlfaCAM. V programu AlfaCAM, je možnost simulace, u které se žádná deviace nevyskytuje. Po rozboru CNC kódu lze konstatovat, že uvedený problém je způsoben v postprocesoru. Tento problém byl objeven poprvé, a přestože rozdíl by nakonec markantní, stoj CNC2 obrobil jednu sadu kapes za 13 sekund a jinou za 4,8 sekundy (36 % času) na průběhu práce stroje (Obr. 4.6) je to mnohem méně viditelné. Řešením nalezených odchylek, tedy úpravou postprocesoru byli pověření kolegové z firmy, která postprocesor dodala.



Obr. 4.6 Nalezená odchylka ve frézování kapes

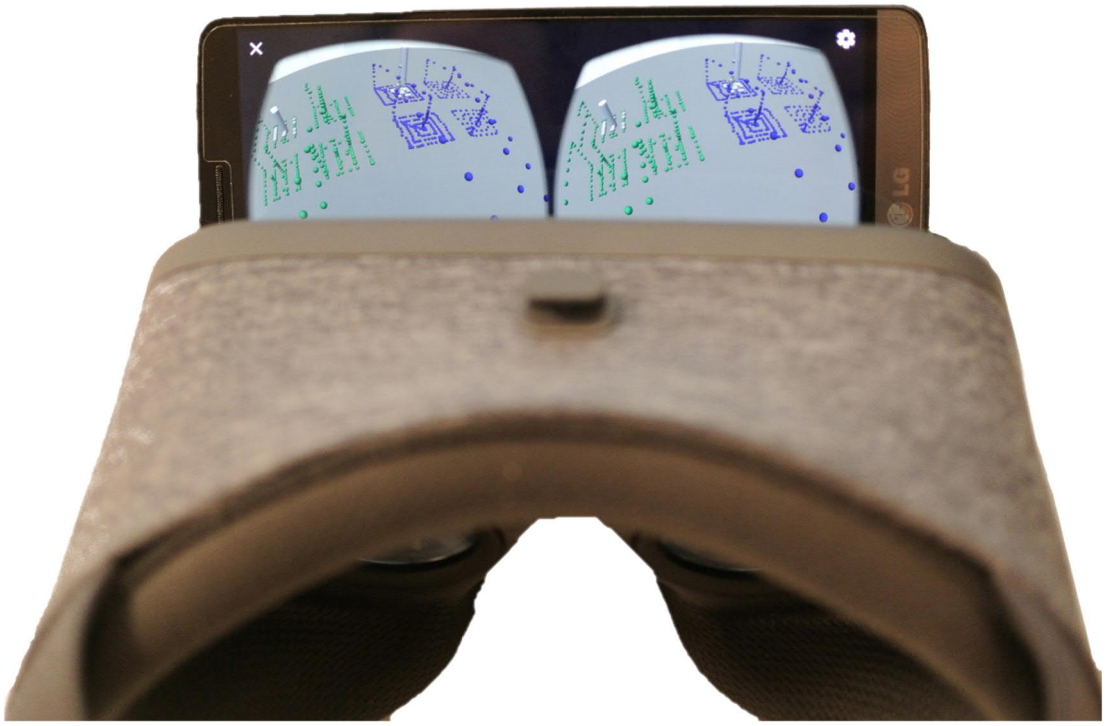
	Jedna kapsa	8 kapes v řadě	Nástroj v řezu	rychloposuv
CNC3	0:00:10	0:01:44	0:01:20	0:00:24
CNC2	0:00:13(4,8)	0:02:08	0:01:44	0:00:24
CNC5	0:00:11	0:01:48	0:01:28	0:00:20

Tab. 4.1 Časy potřebné k obrobení

4.3 REALIZACE IMERZNÍHO ČVP

S využitím nejmodernější techniky bylo dodržení stanovovaných přístupů poměrně nenáročné

- Kritické filtrování (**Point to critical**) - sledování pohybu hlavy ve virtuálních brýlích spolu se změnou pozice ovladačem Daydream (Obr. 4.2), je uživatelsky velmi přívětivé. Umožňuje to v libovolný okamžik roztáhnout detail přes celý pohled a zároveň s daty pracovat ovladačem.
- Časová závislost (**Timeflow**) – byla realizována pomoci hustoty a velikosti koulí vizualizujících dráhu nástroje. Hustota je na základě experimentálního ověření dostatečná na to, aby zobrazila rozdíly v lokální rychlosti.
- Úrovně detailů (**Various levels of details)** – kromě možnosti přibližování operátorem byla technika využita technika zvětšení počtu bodů aktuálně frézovaného detailu.
- Imerzní rozměr (**Extra dimension**) – na začátku kapitoly bylo uvedeno, že osa Z má, co se týká důležitosti, největší význam. Díky imerzi, je tomu tak i z hlediska zobrazení informací. Souřadnice osy Z, je tím, že body vystupují nahoru nad plochu polotovaru, vnímána intenzivněji než ostatní.



Obr. 4.7 Telefon LG G3 s ČVP kapsování

5 ZÁVĚR

Tato disertační práce se zabývá, využitím virtuální reality k monitoringu a analýze strojů. V první části je shrnut současný stav poznání v oblasti počítačové grafiky. Byly vybrány odborné a vědecké články, které se zabývají především vizualizací informací, využitím virtuální reality ke zpracování dat a dále zpracováním dat velkých datových souborů. Přehledová část je zpracována od první zmínky o vizualizaci informací až po nejnovější poznatky jak z teoretické, tak z experimentální oblasti. Vizualizace rozsáhlých dat většinou poskytuje diametrálně odlišný pohled než jejich zpracování pomocí statistiky, proto je potřeba důsledně prostudovat a vyhodnotit jak pozitivní, tak i případné negativní dopady tohoto následného zpracování. Časový vizualizační protokol

Vytyčeným rámcovým cílem, k němuž postupně směřují veškeré dílčí cíle, je vytvoření časového vizualizačního protokolu z měření (ČVP). Ten umožňuje více než jen prosté časové zhodnocení, v tomto případě obráběcího, procesu. Za podmínek Mass Customization totiž nemusí být každá součást takto jednoduše porovnatelná. Navíc existují mimo času, nezbytného pro výrobu, i další klíčové parametry v procesu obrábění. Například vliv analýzy kvality povrchu a zmetkovitosti na základě frekvence vibrací. Proto byla funkce ČVP od svého začátku koncipována taky, aby mohla být využita univerzálně, i když zatím byla prakticky aplikována pouze na měření spotřeby energie a analýzu pohybů jednotlivých os stroje.

5.1 TEORETICKÝ PŘÍNOS PRÁCE

V této dizertační práci je prezentován nový způsob vizualizace informací ve virtuální realitě. Na základě analýzy metod pro vizualizaci informací autor navrhl rozšíření s vyšší užitnou hodnotou, a to imerzní ČVP. Jsou definovány konkrétní kroky nezbytné k vytvoření a uložení vizuálního protokolu. V něm jsou spolu s výstupy uložena i veškerá nezbytná data, která byla pro jejich sestavení použita (podmínky řešení). Ukládání všech dat, tedy i okolností analýzy, může umožnit vyšší transparentnost analýz, které budou na základě ČVP formulovány v letech následujících a jednodušší vzájemné porovnání. Hlavním teoretickým přínosem, je definice souboru čtyřech základních požadavků, jež je nezbytné se držet při tvorbě ČVP.

Důležitým teoretickým výstupem je návrh metodického postupu pro vytvoření 3D modelu stroje tam, kde model není dostupný a dále vytvoření teoretických modelů pro kontinuální zpracování videa pro aplikace, kde není možný přímý výstup z řídicího systému stroje. Tyto situace sice nemusí nastat vždy, protože k moderním strojům stále častěji bude dostupný 3D model a možnost výstupu dat z řídicího systému, nicméně je možné, že vytvořené řešení bude aplikováno na starší stroje.

Dosažené výsledky předložené dizertační práce přispějí na půdě Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně k dalším vědeckým pracím věnujícím se analýze a monitoringu strojů, a to jak z pohledu energetické efektivity, tak z pohledů efektivních obráběcích strategií.

Dílčí teoretické výsledky této práce byly publikovány na konferencích a jsou indexovány v databázích a dále byl softwarový nástroj pro analýzu energetických toků ve stroji publikován jako funkční vzorek.

5.2 PRAKTICKÝ PŘÍNOS PRÁCE

Praktické cíle práce vyplynuly převážné z požadavků průmyslové sféry, zastoupené především tuzemskými výrobci obráběcích strojů TOS KUŘIM – OS, a.s. v Kuřimi, TOSHULIN, a.s. v Hulíně a TOS VARNSDORF a.s. ve Varnsdorfu, kde již od roku 2013 probíhá intenzivní spolupráce. Problematika efektivního převodu 3D dat z konstrukčního softwaru do virtuální reality již byla objasněna a není v dnešní době u nově vyvíjených strojů zásadním problémem. Ten může nastat pouze v případě, že data úplně chybí. Má-li být virtuální realita nasazena skutečně velkoplošně, musí být obecně využitelná pro jakýkoli stroj. Proto byla i této variantě věnována značná pozornost v rámci úvodních měření v kapitole 3.3. Navržená metodika byla experimentálně ověřena a následně rovněž publikována v rámci příspěvku na konferenci.

Dalším požadavkem z průmyslové praxe byla celková analýza a případná optimalizace procesu CNC obrábění, která vyplynula zejména, avšak nejen, z požadavku firmy KOMPAN. Komplikované procesy obrábění na strojích za podmínek Mass customization totiž vyžadují diametrálně odlišný přístup než stejný požadavek za podmínek sériové produkce. V souvislosti s tímto se začaly ukazovat nesystematické zásahy odborníků z řad firem dodávacích software pro programování CNC jako naprosto nevyhovující. Přes jejich snahu a schopnosti není možné, aby pokryli značné množství kombinací, pouhým řešením jednotlivých dílů. Na základě tohoto požadavku pak byla navržena analýza pomocí imerzní ČVP. Reakce a ohlas na úvodní výstupy z analýzy a potenciální úspory byly značné. Za plného provozu se podařilo v relativně krátkém období zvládnout monitoring, vytvořit předběžnou metodiku analýzy, navrhnout a provést úpravy v programu. Tyto úpravy byly ihned experimentálně implementovány a ověřeny v porovnání. Už jen prvotní závěry vytvořené v době psaní této práce, ukazují na potenciální úspory v částkách statisíců a byly široce diskutovány v nadnárodní korporaci s více než 1000 zaměstnanci. V tomto případě nezbývá než poděkovat paní Ing. Soni Hanákové a kolektivu firmy KOMPAN za otevřenost vůči změnám, potenciálním inovacím a vyzdvihnout příklad využití potenciálu pro inovace ve spolupráci s univerzitou. O to více potěšující je fakt, že se jedná o dánskou firmu, tedy o jednu z nejvíce vyspělých zemí Evropy, která těží z výsledků několikaleté intenzivní práce kolektivu Odboru výrobních systémů a virtuální reality při ÚVSSR VUT v Brně. Pokud se i ostatní firmy chopí této příležitosti a využijí větší otevřenosti univerzit pro komerční projekty a plnění konkrétních cílů, je více než pravděpodobné, že hodnota práce občanů naší republiky pro vnější svět dále poroste. Nezbývá než dodat, že tento trend může zvýšit ještě zájem zahraničních investic o vysoce kvalitní výzkum a vývoj, což je z dlouhodobého hlediska mnohem zajímavější než budovat stát na atraktivitě levné pracovní síly.

5.3 PEDAGOGICKÝ PŘÍNOS PRÁCE

Řešení, které vzniklo pro práci s daty stroje, bude využíváno studenty nejen při výuce, ale i při praktických projektech. Tyto projekty mohou být řešeny na školním demonstrátoru popsaném v kapitole 3.4 na kterém již nyní řeší studenti řadu úloh. Dostupnost tohoto imerzního řešení odpovídá dostupnosti běžného počítače, takže je velmi pravděpodobné, že potřebný hardware bude velmi brzy součástí každé domácnosti, a tak umožnuje každému jednotlivému studentovi pracovat na dalších aplikacích, postavených na základě této práce, v domácích podmínkách. Je třeba

podoktnout, že zadání konkrétnějších úloh spolu s vytvářením a verifikace výsledků v praxi je pro studenty zajímavější a mnohdy tomu mohou odpovídat i dosažené výsledky, potažmo přínos pro studenty samotné. Z důvodů velmi dobré zkušenosti firmy KOMPAN je zároveň otevřená možnost pro studenty VUT čerpat prostředky z programu na optimalizaci obráběcího procesu. V době dokončování práce se připravuje plně měřitelný stoj CNC při VUT, na kterém budou moci být prováděny mimo jiné zkoušky nástrojů vhodných pro vysokorychlostní obrábění, pomocí metod navržených v této práci, je tak možné provádět hlubší analýzu a nově vzniklé otázky řešit například formou diplomových prací. K jejich realizaci mohou studenti získat finanční prostředky na nástroje, materiál a realizovat tak své návrhy. Autoři vybraných řešení budou mít možnost stáže na oddělení LEAN[25] nebo CNC a vidět konkrétní přínosy v praxi a dále pracovat na vlastním rozvoji.

5.4 NÁMĚTY K DALŠÍMU ROZVOJI

Je velmi důležité připomenout, že tato práce disponuje rozsáhlými závěry z praxe a stejně tak, díky implementaci skutečně mobilního řešení otvírá potenciál práce na něčem novém. Ani metody navržené v této práci nenahradí všechny předcházející, naopak, pouze rozšíří povědomí a přidá možnosti uživatelům, kteří ji do dnešní doby mít nemohli. To vše tím, že cíleně vyplňuje jednu část v úvodu definované pyramidy imerze (Obr. 3.2).

Za nejdůležitější směry dalšího rozvoje se dají považovat aplikace, kde se souběžně monitoruje a vyhodnocuje měřená veličina za pohybu stroje. Zde za standartní situace při zpracování ve dvourozměrném prostoru vzniká obtížně přehledný graf a zde je atraktivní použití imerzní virtuální reality.

Podle přístupu a naměřených dat, může být ČVP, tak jak je definován, vhodný i pro analýzu celých procesů, a to nejvýše po dílčích změnách. Zde by dráhu reprezentoval materiálový tok a měřenou veličinou může být například rychlost zpracování na pracovišti. Díky softwaru Video flow je možné jednoduše monitorovat libovolné stroje nebo i lidi a na nich dále vytvářet další práce například z oblasti ČVP ergonomických parametrů. V tomto úsilí jsou všichni další kolegové podporování nejen neustálým zvyšováním výpočetních výkonů, stejně jako jejich dostupností, ale především nastávající změnou myšlení klíčových pracovníků průmyslu, přičemž v některých odvětvích budou tyto změny brzy patrné v každodenním provozu.

Z výstupů této práce bude vytvořena nová publikace, která bude přednostně zaslána na recenzní řízení do impaktovaného časopisu a autor pevně věří, že na těchto základech se bude stavět další práce skvělých inženýrů, doktorandů z ÚVSSR při VUT.

[25] Lean manufacturing neboli štíhlá výroba

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Ajaj, R., Savioja, L. & Jacquemin, C., 2008. Software platform for real-time room acoustic visualization. *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '08*, p.247. Available at: http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1450579.1450636.

Anthes, C., Wiedemann, M. & Kranzlm, D., 2016. Perspectives for Using Virtual Reality to Extend Visual Data Mining in Information Visualization. , pp.1–11.

Augste, J., Holub, M. & Knoflíček, R., 2014. Tools for Visualization of Active Power and Energy at Machine Tools. In *Mechatronic systems and materials 2014*. Opole, Poland: Oficyna Wydaw. Politechniki Opolskiej, pp. 1–5.

Aurich, J. et al., 2012. Noise investigation in manufacturing systems: An acoustic simulation and virtual reality enhanced method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5, pp.337–347.

Azuma, R. et al., 2001. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), pp.34–47.

Bednář, J., 2007. MSA-Analýza systému měření. *REQUEST'06*, pp.18–23.

Behrendt, T., Zein, A. & Min, S., 2012. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), pp.43–46. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612001059 [Accessed January 21, 2015].

Boër, C.R. et al., 2013. Mass Customization and Sustainability.

Böhner, J. et al., 2014. Derivation of measures for energy efficient machine design by evaluating energy consumption data. *Procedia CIRP*, 15, pp.437–442. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114004855 [Accessed January 21, 2015].

Bunse, K. et al., 2011. Integrating energy efficiency performance in production management - Gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), pp.667–679. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011.

Coletti, P. & Aichner, T., 2011. *Mass Customization*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-18390-4 [Accessed February 27, 2016].

ČSN EN ISO 14006:, 2011. *Systém environmentálního managementu – Směrnice pro začlenění ecodesignu.*, ÚNMZ.

ČSN EN ISO 14040:, 2006. *Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova.*, ÚNMZ.

ČSPJ, Č. společnost pro jakost, 2011. *MSA - Analýza systémů měření 4. vydání*, Praha.

Davis, S.M., 1987. *Future perfect*, Addison-Wesley.

Donalek, C. et al., 2014. Immersive and Collaborative Data Visualization Using Virtual Reality Platforms. *IEEE International Conference on Big Data*, pp.609–614.

Dudarev, I. et al., 2013. Visualization of Energy Flows Using a Particle Particle

Systems State of the Art. , pp.185–186.

Duflou, J. et al., 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), pp.587–609. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002016 [Accessed July 9, 2014].

EU, 2009. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/EC ErP ze dne 21. října 2009 o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie (Text s významem pro EHP); Úř. věst. L 285. , pp.10–35.

Fogliatto, F.S., da Silveira, G.J.C. & Borenstein, D., 2012. The mass customization decade: An updated review of the literature. *International Journal of Production Economics*, 138(1), pp.14–25. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527312000989 [Accessed February 27, 2016].

Ghadimi, P. et al., 2014. Integrated Material and Energy Flow Analysis towards Energy Efficient Manufacturing. *Procedia CIRP*, 15, pp.117–122. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114004338 [Accessed January 18, 2015].

Häfner, P. et al., 2014. Interactive Visualization of Energy Efficiency Concepts Using Virtual Reality.

Haug, A., Ladeby, K. & Edwards, K., 2009. From engineer-to-order to mass customization. *Management Research News*, 32(7), pp.633–644.

Holkup, T., 2012. Ekodesign výrobních strojů. *MM Průmyslové spektrum. Praha: SEND Předplatné s.r.o*, (11), pp.20–21. Available at: http://www.mmspektrum.com/clanek/ekodesign-vyrobnich-stroju.html.

Holkup, T., Vyroubal, J. & Smolik, J., 2013. Improving energy efficiency of machine tools. , 1, pp.125–130.

Instruments, N., 2006. NI CEO Gives Keynote Address at National Science Foundation Workshop. Available at: http://www.businesswire.com/news/home/20061018005720/en/NI-CEO-Keynote-Address-National-Science-Foundation [Accessed June 17, 2016].

Iskandirova, M. et al., 2013. Eco-design of Mechatronic Systems. In *Mechatronics 2013 Recent Technological and Scientific Advances*.

Jurić, D., 2017. Accord.NET Extensions. Available at: https://github.com/dajuric/accord-net-extensions.

Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J., 2013. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. *Final report of the Industrie 4.0 WG*, (April), p.82.

Kerpen, D. et al., 2016. Effects of cyber-physical production systems on human factors in a weaving mill: Implementation of digital working environments based on augmented reality. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2016–May, pp.2094–2098.

Kirillov, A., 2012. GRATF. Available at: http://www.aforgenet.com/projects/gratf/.

Kočí, V., 2010. *Příručka základních informací o posuzování životního cyklu*, Praha. Available at: http://lcastudio.cz/dokumenty/LCA_prirucka.pdf.

Kübler, F. et al., 2013. Resource efficiency and productivity optimization of manufacturing equipment. In *2nd Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering 2013. Proceedings*. pp. 392–397.

Lee, E.A., 2008. Cyber Physical Systems: Design Challenges. In *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. IEEE, pp. 363–369. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4519604 [Accessed October 18, 2015].

Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H.-A., 2015. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, pp.18–23. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X [Accessed January 14, 2015].

Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H.-A., 2014. Recent Advances and Trends of Cyber-Physical Systems and Big Data Analytics in Industrial Informatics. *Int. Conference on Industrial Informatics (INDIN) 2014*, (November 2015).

Lin, J., Keogh, E. & Lonardi, S., 2005. Visualizing and Discovering Non-Trivial Patterns In Large Time Series Databases. *Information Visualization*, 4(2), pp.61–82. Available at: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1103521.

MacDougall, W., 2014. *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future*, Germany Trade & Invest. Available at: https://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf.

Mařík, V. et al., 2016. Národní iniciativa průmysl 4.0.

Montgomery, D., 2009. *Introduction to statistical quality control*,

Národní iniciativa průmysl 4.0, 2016. Národní iniciativa průmysl 4.0.

Neugebauer, R. et al., 2011. VR tools for the development of energy-efficient products. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(2), pp.208–215. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581711000733 [Accessed January 21, 2015].

Niesen, T. et al., 2016. Towards an Integrative Big Data Analysis Framework for Data-Driven Risk Management in Industry 4.0. *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp.5065–5074.

Oda, Y. et al., 2012. Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), pp.119–122. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612000364 [Accessed January 21, 2015].

Oppelt, M. & Urbas, L., 2014. Integrated virtual commissioning an essential activity in the automation engineering process: From virtual commissioning to simulation supported engineering. *Proceedings, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.2564–2570.

Pernikář, J., 2005. HODNOCENÍ ZPŮSOBILOSTI KONTROLNÍCH PROSTŘEDKŮ.

Riehmann, P., Hanfler, M. & Froehlich, B., 2005. Interactive Sankey diagrams. In *IEEE*

Symposium on Information Visualization, 2005. INFOVIS 2005. IEEE, pp. 233–240. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1532152 [Accessed February 27, 2016].

SAP, 2011. SAP to Acquire 3-D Visualization Software Maker Right Hemisphere. Available at: http://global.sap.com/corporate-en/news.epx?PressID=17469 [Accessed February 9, 2016].

Seven Cycles, 2017. web. , p.https://www.sevencycles.com/buildingbike/customiza.

Shneiderman, B., 1996. The eyes have it: a task by data type taxonomy for informatio nvisualizations. *Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages*, pp.336–343.

Shrouf, F., Ordieres, J. & Miragliotta, G., 2014. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp.697–701. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7058728.

Schlechtendahl, J. et al., 2013. Framework for Controlling Energy Consumption of Machine Tools. In P. Golinska, ed. *EcoProduction and Logistics*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 155–168. Available at: http://www.researchgate.net/publication/259810521_Framework_for_Controlling_Energy_Consumption_of_Machine_Tools.

Spring, M. & Dalrymple, J.F., 2000. Product customisation and manufacturing strategy. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(4), pp.441–467. Available at: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-3543084481&partnerID=tZOtx3y1.

Tapio, L. & Nenonen, V., 2006. Immersive visualization of room acoustics. , (November), pp.8–10.

TU Chemnitz, 2015. Chemnitzer Wissenschaftler entwickeln Augmented-Reality-Anwendung für Messestand. Available at: https://www.tu-chemnitz.de/uk/pressestelle/aktuell/1/6545 [Accessed January 4, 2016].

Tůma, J., 2013. *Problematika vývoje energeticky efektivních výrobních strojů*. Brno, 2013. 39 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Turner, C.J. et al., 2016. Discrete Event Simulation and Virtual Reality Use in Industry: New Opportunities and Future Trends. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, pp.1–13. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/7547285/.

Verl, A. et al., 2011. Architecture for multilevel monitoring and control of energy consumption. In *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. pp. 347–352. Available at: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-80052129028&partnerID=tZOtx3y1.

Vijayaraghavan, A. & Dornfeld, D., 2010. Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), pp.21–24. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610000430 [Accessed September 13, 2014].

Vogel-Heuser, B. et al., 2014. Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system. *Proceedings - 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2014*, pp.713–719.

Wagner, D. et al., 2010. Real-time detection and tracking for augmented reality on mobile phones. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(3), pp.355–368.

Wang, Y. et al., 2012. Collision Detection Based on Bounding Box for NC Machining Simulation. *Physics Procedia*, 24, pp.247–252. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212000806 [Accessed February 16, 2015].

Wijayasekara, D., Linda, O. & Manic, M., 2011. CAVE-SOM: Immersive visual data mining using 3D Self-Organizing Maps. *The 2011 International Joint Conference on Neural Networks*, pp.2471–2478.

Yoon, H. et al., 2014. Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling. *Journal of Cleaner Production*, 78, pp.54–62. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614002935 [Accessed January 21, 2015].

Zahálka, J., Tůma, J. & Bradáč, F., 2014. Determination and Improvement of Performance Level of Safety Function of Emergency Stop for Machinery. *Procedia Engineering*, 69, pp.1242–1250. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003610 [Accessed February 15, 2015].

7 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ A VZORKŮ

[1] AUGSTE, J., KNOFLÍČEK, R., HOLUB, M. Tools for Visualization of Active Power and Energy at Machine Tools. *MECHATRONIC SYSTEMS AND MATERIALS 2014*, Selected Papers , Eds.: E. Macha, R. Pawliczek and G. Robak, Opole University of Technology. Oficyna Wydaw. Politechniki Opolskiej, Opole, 2014, pp. 1-5, ISBN 978-83-64056-58-1.

[2] AUGSTE, J., HOLUB, M., KNOFLÍČEK, R., NOVOTNÝ, T., VYROUBAL, J. Monitoring of Energy Flows in the Production Machines. *Mechatronics 2013 Recent Technological and Scientific Advances*. Springer International Publishing, 2014, pp. 1-7, ISBN: 978-3-319-02293-2.

[3] AUGSTE, J., KNOFLÍČEK, R., HOLUB, M., NOVOTNÝ, T.: Tools for visualization of energy flows in the construction of machine- tools. *MM Science Journal*, 2013, vol. 2013, no. March, p. 392-395. ISSN: 1803- 1269.

[4] AUGSTE, J., NOVOTNÝ, T. MOTION CAPTURING CONTROL FOR PARALLEL KINEMATICS ROBOT. In Praha: *Institut of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic*, 2012. p. 59-60. ISBN: 978-80-86246-40- 6.

[5] BRADÁČ, F., AUGSTE, J., TŮMA, Z., NOVOTNÝ, T., BLECHA, P., BLECHA, R. Implementace 3D modelů komponent divadla v Petrohradu do prostředí virtuální reality. Brno: VUT FSI UVSSR, 2013.

[6] AUGSTE, J., HOLUB, M., KNOFLÍČEK, R., NOVOTNÝ, T., BRADÁČ, F.: ECO Design v1. 0, Software pro vizualizaci energetických toků výrobních strojů. VUT v Brně, FSI. Technická 2/ 616 69, Brno, UVSSR. URL: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id= 1353. (software)

[7] TŮMA, Z., TŮMA, J., SELINGEROVÁ, S., AUGSTE, J., HRBÁČEK, J.: SimJedn-VR- 1, Zkušební jednotka pro testování virtuální reality ve výrobním procesu. VUT v Brně, FSI, Technická 2896/2, Brno, Místnost: B1/ 305. URL: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id= 1383. (funkční vzorek)

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAVE	Computer assisted virtual environment (Počítačové virtuální prostředí)
CCF	Common cause failure (Poruchy se společnou příčinou)
CE	Communité Européen (Evropské společenství)
CNC	Computer numeric control (Číslicové řízení počítačem)
ČSN	Česká technická norma
ISO	International organization for standardization (Mezinárodní organizace pro standardizaci)
LCA	Life cycle assessment (Posuzování životního cyklu)
LCI	Life cycle inventory (Inventarizace životního cyklu)
ČVP	Časový vizualizační protokol
MC	Mass Customization (Hromadná zákaznická výroba)
u_A	Standardní nejistota typu A
s_x	Směrodatná odchylka
n	Počet naměřených hodnot
x	Změřené hodnoty
$\bar{x}$	Aritmetický průměr změřených hodnot
MSA	Measurement system analysis = Analýza systému měření
KOMPAN	Kompan Czech republic s.r.o.
ETO	Engineer to Order Zakázkový vývoj
MTO	Make to Order Zakázková výroba

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 CPS systém dle 5C 11
Obr. 2.2 Vývoj podmínek výroby (Boër et al. 2013) 14
Obr. 2.3 Obecný model MC dle (Spring & Dalrymple 2000) 15
Obr. 2.4 Zvyšování složitosti dílů obráběných z HDPE 16
Obr. 2.5 Formulář pro objednání kola na míru (Seven Cycles 2017) 18
Obr. 2.6 Produkt s markery a vizualizace na tabletu (TU Chemnitz 2015) 20
Obr. 2.7 Sankey diagramy s distribucí energie ve městě, zvětšení 21
Obr. 2.8 Anomálie ve spotřebě daná zkráceným týdnem během Vánoc 22
Obr. 2.9 Vizualizace s využitím Sankey diagramu (Neugebauer et al. 2011) 23
Obr. 2.10 Vizualizace energetických strojů pomocí částic 24
Obr. 2.11 Vizualizace změřených závislých hodnot v prostoru. 25
Obr. 2.12 Náklady na energie vyjádřené na grafu životního cyklu 25
Obr. 2.13 Vizualizace úrovně hluku ve 2D a 3D prostoru 26
Obr. 2.14 Platforma Soundware společnosti Neuron 27
Obr. 3.1 Datové schéma Smart Factory 30
Obr. 3.2 Pyramida imerze 31
Obr. 3.3 Časová osa dílčích výstupů 35
Obr. 3.4 FUE(Q) 125 EFEKTIV v TOS Kuřim 36
Obr. 3.5 Změřená data spotřeby pohonů 36
Obr. 3.6 Vstupní okno aplikace EcoCAx 37
Obr. 3.7 Zjednodušený 3D model stroje 38
Obr. 3.8 Tvorba 3D dat z 2D pohledů extrahovaných z katalogu 39
Obr. 3.9 Rozhraní aplikace ECO Design v1.6 40
Obr. 3.10 Obrobek a měření příkonu testovací cyklu na demonstrátoru 40
Obr. 3.11 Naměřená data a oblast vybraná pro analýzu 41
Obr. 3.12 Průběh okamžité spotřeby osy Y 43
Obr. 3.13 Grafické vyhodnocení analýzy peaků 44
Obr. 3.14 Základní přístupy pro redukci spotřeby během klidu stroje 44
Obr. 3.15 Obecné stroje podle zapojení v energetickém managementu 45
Obr. 3.16 Vývoj spotřeby stroje v závislosti na čase 45
Obr. 3.17 Kompletní vizualizace pomocí 2D a 3D Sankey diagramů 46
Obr. 3.18 Vizualizace spotřeby 47
Obr. 3.19 Rozvržení panelu zobrazující jednotlivé díly 48
Obr. 3.20 Příprava stroje CNC2 pro monitoring 50
Obr. 3.21 Rozmazání značek vlivem velké rychlosti stroje 51
Obr. 3.22 Vizualizace značek v programu Video flow 52
Obr. 3.23 Komparační diagram průběhu na ose Z a tabulka časů 53
Obr. 3.24 Komparační graf s redukovanou úrovní detailů 54
Obr. 3.25 Vizualizace nejistoty změřených hodnot 56
Obr. 3.26 Rozdělení celkové variability zaznamenaných dat (Bednář 2007) 57
Obr. 3.27 Vizualizace reprodukovatelnosti 58
Obr. 3.28 Opakované měření délky stejného peaku 59
Obr. 3.29 Vliv radiální distorze – negativní, žádná a pozitivní. 61
Obr. 3.30 Centrální projekce snímkových a objektových souřadnic 62
Obr. 3.31 Grafické znázornění strannosti měření (Pernikář 2005) 64
Obr. 3.32 Stroj MCV-754 s nainstalovanou sondou ballbar 65
Obr. 4.1 Typický layout strojů v závodě 69

Obr. 4.2 Platforma Cardboard (vlevo) a vpravo Daydream s ovladačem..... 70
Obr. 4.3 Část bodových dat proložených úsečkou 71
Obr. 4.4 Schéma definice vizualizace rychlosti podél dráhy nástroje 72
Obr. 4.5 Celková vizualizace porovnání strojů CNC2 a CNC3 72
Obr. 4.6 Nalezená odchylka ve frézování kapes 73
Obr. 4.7 Telefon LG G3 s ČVP kapsování..... 74

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Srovnávací tabulka výrobních strategií 16
Tab. 3.1 Tabulka strojů řešených v rámci analýzy 50
Tab. 3.2 Předběžné vyhodnocení celkových časů obrábění 53
Tab. 3.3 Tabulka měření časového intervalu 55
Tab. 3.4 Hranice pro přípustnost R&R měřidla vzhledem k procesu 58
Tab. 3.5 Změřené hodnoty operátorů A a B 59
Tab. 3.6 Tabulka vyhodnocení 60
Tab. 3.7 Tabulky změřených hodnot 66
Tab. 3.8 Tabulka hodnot indexu způsobilosti (Montgomery 2009) 67
Tab. 4.1 Časy potřebné k obrobení 73