



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

BEZVÝKRESOVÁ DOKUMENTACE VE STROJÍRENSTVÍ

DRAWINGLESS DOCUMENTATION IN ENGINEERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Rondoš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| Ústav: | Ústav konstruování |
| Student: | Radim Rondoš |
| Studijní program: | Základy strojního inženýrství |
| Studijní obor: | Základy strojního inženýrství |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2022/23 |

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

Bezvýkresová dokumentace ve strojírenství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výkresová dokumentace strojních součástí vzniká v dnešní době převážně z 3D modelu užitím CAD. Kóty, délkové a geometrické tolerance jsou následně promítnuty do 2D výkresu, který je podkladem pro výrobu, inspekci a měření. Ze strany průmyslu však narůstá tlak na přechod od klasické 2D výrobní dokumentace k plnohodnotnému 3D modelu. Přechod na plně bezvýkresové předávání informací o vyráběných součástech by dokázalo uspořit čas, náklady a minimalizovat chyby ve výrobním cyklu výrobku.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je rešerše v oblasti využití bezvýkresové dokumentace pro návrhu, výrobu a měření včetně aplikace získaných poznatků na vybrané strojní součásti.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat aktuální trendy v oblasti bezvýkresové dokumentace,
- popsat metody a typy předávaných informací do 3D modelu, vhodné CAD programy a formáty pro přenos informací do 3D modelu,
- navrhnout zkušební součást včetně realizace pomocí 3D tisku,
- aplikovat získané poznatky na vybranou strojní součást.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

AGOVIC, A., T. TRAUTNER, F. BLEICHER. Digital Transformation - Implementation of Drawingless Manufacturing: A Case Study. Procedia CIRP. 2022, 107(107), 1479-1484. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2022.05.178.

NARVYDAS, E., N. PUODZIUNIENE. Standards for Transition from 2D Drawing to Model Based Definition in Mechanical Engineering. Mechanics. 2021, 27(4), 351-354. ISSN 2029-6983. Dostupné z: doi:10.5755/j02.mech.25777.

USKI, P., A. ELLMAN, I. LAINE, L. HILLMAN a J. NIEMINEN. Model-Based Definition Accelerates Product Life Cycle in Manufacturing and Inspection Phase – Experiment of Machined One-Off Production. Proceedings of the Design Society. 2022, 2, 643-652. ISSN 2732-527X. Dostupné z: doi:10.1017/pds.2022.66.

ZHOU, J., J. D. CAMBA, T. FUERST. A Comparative Study on the Use and Interpretation of Annotated 3D Models. Product Lifecycle Management. Green and Blue Technologies to Support Smart and Sustainable Organizations. Cham: Springer International Publishing, 2022, 2022-02-08, 313-326. IFIP Advances in Information and Communication Technology. ISBN 978-3-030-94398-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-94399-8_23.

GOHER, K., E. SHEHAB, A. AL-ASHAAB. Model-Based Definition and Enterprise: State-of-the-art and future trends. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2021, 235(14), 2288-2299. ISSN 0954-4054. Dostupné z: doi:10.1177/0954405420971087.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší využití bezvýkresové dokumentace ve strojírenství. Bezvýkresová dokumentace, anglicky Model Based Definition (MBD), umožňuje přechod od 2D technických výkresů ke 3D CAD modelům kótovaným pomocí strojově čitelných poznámek, tzv. PMI dat. Práce se zabývá jak jejím využitím v průmyslových aplikacích, tak jejím uchováním pomocí vhodných CAD formátů. Pozitivní výsledky aplikace MBD v průmyslu vykazují studie zejména v oblasti kontroly. Pro správnou funkci PMI je klíčové, aby byla tato data spolehlivě přenositelná. V rámci práce byla proto zjišťována přenositelnost PMI dat do programu GOM Inspect z testovací součásti v podobě ložiskového stojanu. Bezvýkresová dokumentace ve formátu STEP AP242 byla porovnána s naskenovanou sítí součásti vyrobené 3D tiskem. Úspěšně se povedlo naimportovat a vyhodnotit 47 % vytvořených PMI. Pro přenesení všech dat by bylo potřeba zásahu lidského faktoru, který by mohl vnést do přenosu chybovost, a proto musí být tyto nedostatky u firem používajících MBD minimalizovány. Získané poznatky byly na konci práce prezentovány a diskutovány.

KLÍČOVÁ SLOVA

bezvýkresová dokumentace, Model Based Definition (MBD), PMI, CAD formáty pro MBD, GOM Inspect

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the research of the use of drawingless documentation in mechanical engineering. Drawingless documentation, or Model Based Definition (MBD), enables the transition from 2D engineering drawings to 3D CAD models annotated using machine readable annotations, the so-called PMI data. This thesis addresses both its use in industrial applications and its preservation using appropriate CAD formats. Studies especially in the field of inspection show positive results of MBD application in industry. For the proper functioning of PMI it is crucial that this data is reliably transferable. Therefore, this thesis investigated the portability of PMI data to GOM Inspect from a test component in the form of a bearing rack. The drawingless documentation in STEP AP242 format was compared with the scanned mesh of the part produced by 3D printing. 47 % of the generated PMI was successfully imported and evaluated. Human intervention would be required to transfer all the data, which could introduce errors into the transfer, and therefore these shortcomings must be minimised for companies using MBD. The findings were presented and discussed at the end of the paper.

KEYWORDS

drawingless documentation, Model Based Definition (MBD), PMI, CAD formats for MBD, GOM Inspect

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RONDOŠ, Radim. *Bezvýkresová dokumentace ve strojírenství*. Brno, 2023, 51 s. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149791>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za jeho skvělý přístup, trpělivost, ochotu, připomínky a rady, které mi během psaní této práce poskytl. Děkuji také za příležitost prohloubit své znalosti v oblasti bezvýkresové dokumentace. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Kouteckému, Ph.D. za pomoc při 3D skenování.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 13 |
| 2 | ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE | 14 |
| 2.1 | Analýza problému | 14 |
| 2.2 | Cíl práce | 14 |
| 3 | PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ | 16 |
| 3.1 | Historický vývoj bezvýkresové dokumentace | 16 |
| 3.2 | Význam a rozdělení PMI dat | 17 |
| 3.2.1 | Sémantické (reprezentační) PMI | 18 |
| 3.2.2 | Grafické (prezentační) PMI | 19 |
| 3.3 | Význam MBD | 19 |
| 3.4 | Využití PMI dat | 20 |
| 3.4.1 | Tvorba výkresů | 20 |
| 3.4.2 | CAM | 20 |
| 3.4.3 | CMM | 20 |
| 3.4.4 | CAI | 21 |
| 3.4.5 | Vizualizace | 21 |
| 3.4.6 | Toleranční analýza | 21 |
| 3.5 | Normy pro vytváření PMI dat | 22 |
| 3.5.1 | Norma ASME Y14.41 | 22 |
| 3.5.2 | Norma ISO 16792 | 23 |
| 3.6 | Zavádění bezvýkresové dokumentace do konstrukčního a výrobního procesu | 23 |
| 3.6.1 | Jednotlivé fáze konstrukčního procesu | 24 |
| 3.6.2 | Problémy při zařazování MBD do konstrukčního procesu | 25 |
| 3.6.3 | Obavy při zavádění MBD do výrobního procesu | 25 |
| 3.6.4 | Příklady implementace MBD | 26 |
| 3.7 | Přístupy k bezvýkresové dokumentaci vybraných CAD programů | 27 |
| 3.8 | Formáty pro přenos MBD | 28 |
| 3.8.1 | STEP AP242 | 29 |
| 3.8.2 | 3D PDF | 29 |
| 3.8.3 | JT | 30 |
| 3.8.4 | QIF | 31 |
| 3.9 | Oblasti aktuálního zaměření vývoje MBD | 32 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.9.1 | Automatická tvorba MBD z technického výkresu | 32 |
| 3.9.2 | Klasifikování textových poznámek dle funkce | 32 |
| 3.9.3 | Toleranční analýzy s využitím MBD | 33 |
| 3.9.4 | Automatizovaná vizuální kontrola založená na MBD pomocí QIF | 33 |
| 4 | DISKUZE | 35 |
| 4.1 | Tvorba MBD a 3D tisk testovací součásti | 35 |
| 4.2 | Skenování objektu | 36 |
| 4.2.1 | 3D skener | 36 |
| 4.2.2 | Měření | 36 |
| 4.3 | Přenos dat do programu GOM Inspect | 38 |
| 4.4 | Vyhodnocení úspěšnosti importování dat | 38 |
| 4.5 | Syntéza řešerše MBD | 40 |
| 5 | ZÁVĚR | 42 |
| 6 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 43 |
| 7 | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN | 48 |
| 8 | SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ | 49 |
| 9 | SEZNAM TABULEK | 50 |
| 10 | SEZNAM PŘÍLOH | 51 |

1 ÚVOD

Při častých změnách CAD (Computer Aided Design) modelů, může být obtížné udržet výkresovou dokumentaci aktuální a korespondující s modely. Informace, které modely obsahují, zahrnují většinou pouze rozměry bez tolerancí, tvar součásti a materiál. Údaje o tolerancích, jak rozměrových, tak geometrických, texturách povrchů, či technologických operacích se vkládají ve většině případů pouze na výkres a nejsou tak spojeny s CAD modelem. Při provádění změn v modelu, nebo výrobním procesu, se proto musí výkres ručně aktualizovat, což může zabírat včetně vytvoření až 33 % konstrukčního procesu [1]. Udržování aktuálních výkresů je přitom klíčové proto, aby nedocházelo k nedorozuměním při výrobě, kontrole a montáži součásti nebo strojního celku.

Tyto a mnoho dalších problémů 2D výkresové dokumentace řeší bezvýkresová dokumentace, anglicky MBD (Model Based Definition). Její princip spočívá v zadávání veškerých informací o součásti (tj. tolerancích, drsnostech, technologických procesech aj.) přímo do CAD modelu. Tyto data se nazývají PMI (Product and Manufacturing Information) a slouží k následným výrobním a kontrolním operacím při realizaci produktu. Jednou z hlavních výhod PMI dat je jejich strojová čitelnost, díky které se jednotlivé výrobní a kontrolní operace dají automatizovat a využít nejen v Průmyslu 4.0 [2].

Jak ukazuje jedna z prvních komplexních případových studií na toto téma, která se zabývala vývojem horizontálního stabilizátoru letounu T-45, absence vytváření a udržování výkresové dokumentace a její nahrazení bezvýkresovou dokumentací může snížit čas vývoje o 62 % a snížit náklady na vývoj o 42 % [3]. Pozitivní výsledky vyplývají také z případové studie zabývající se porovnáním použití MBD a technických výkresů. Vyplývá z ní průměrně 74,8% uspoření času použitím MBD [4]. I přes zmíněné výhody není koncept MBD příliš rozšířený [5], a i když ze strany průmyslu narůstá tlak na vytváření bezvýkresové dokumentace, konstrukční firmy stále zůstávají u konvenčního přístupu technických výkresů [6].

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši v oblasti využití bezvýkresové dokumentace pro návrh, výrobu a měření a popsání metod a typů předávaných informací. Dále se práce zaměří na popis přístupů k MBD vybraných CAD programů, formátů pro přenos informací a v návaznosti na tyto poznatky budou zjištěny a popsány aktuální trendy v těchto oblastech.

V závěru práce bude provedeno ověření přenositelnosti PMI dat z CAD modelu do softwaru pro měření na vybrané strojní součásti, neboť přenositelnost PMI dat je klíčová vlastnost k úspoře času v oblasti měření.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

I přesto, že bezvýkresová dokumentace nabírá na popularitě, není v průmyslu příliš rozšířená [5]. Většina strojních inženýrů používá CAD modely jako zdroj informací spolu s technickými výkresy a je skeptická k úplnému vyřazení technických výkresů [5]. Podle výzkumné studie používá technické výkresy jako pomocný zdroj informací 96 % [7] strojních inženýrů, ale jejich funkci by podle 80 % z nich mohl zastoupit plně definovaný CAD model [7].

Velmi významně ovlivněnou oblastí z hlediska použití bezvýkresové dokumentace může být kontrola výrobku, jak dotyková na CMM (Coordinate Measuring Machine), tak bezdotyková. Průmyslové firmy pro tato měření běžně dodávají CAD model společně s technickým výkresem, na kterém jsou umístěny všechny potřebné informace pro měření. Místo ručního zadávání informací z technické dokumentace do softwaru pro měření, umožňuje bezvýkresová dokumentace použití dat obsažených v CAD modelu pro jejich importování do tohoto programu. V případě, že by byla přenositelnost dat spolehlivá, mohla by tato metoda přinést velké časové i finanční úspory.

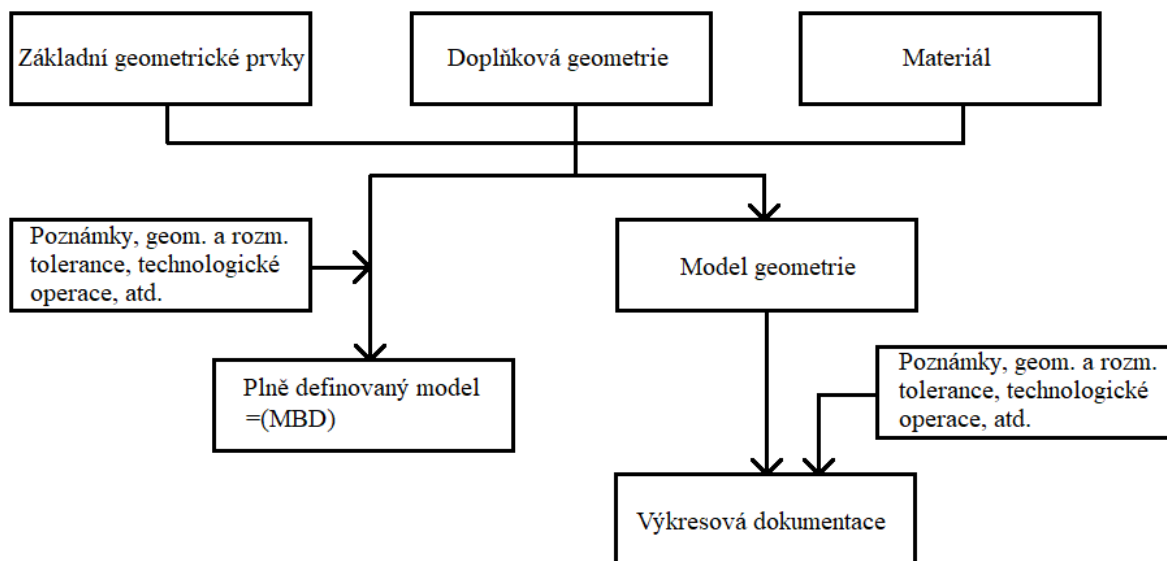
Otázkou zůstává, jak se k tomuto tématu staví strojní konstruktéři, kteří bezvýkresovou dokumentaci vytvářejí. Tato činnost pro ně může být časově, nebo schopnostně náročnější než konvenční vytváření výkresové dokumentace. Časově náročné by také mohlo být převádění technických výkresů na bezvýkresovou dokumentaci u již vytvořených dílů. Problémy mohou také nastat ve vytváření poznámek nad popisovým polem nebo na odkazové čáře, jelikož nemusí být strojově čitelné. Důležitou součástí komunikace je také spolehlivá přenositelnost dat do univerzálních CAD formátů, aby nedocházelo ke ztrátám nebo dezinterpretaci informací. Ne všechny univerzální CAD formáty podporují přenos bezvýkresové dokumentace.

2.2 Cíl práce

Cílem práce je popsat funkci bezvýkresové dokumentace a provést rešerši v oblasti jejího využití pro návrh, výrobu a měření. Zjistit přístupy strojních konstruktérů k vytváření této dokumentace, popsat metody a typy předávaných informací do 3D modelu, vhodné CAD programy pro tvorbu bezvýkresové dokumentace a formáty pro přenos informací o 3D modelu podporující tato data. Na závěr popsat aktuální trendy a oblasti aktuálního zaměření bezvýkresové dokumentace.

V návaznosti na získané poznatky navrhnout testovací součást, aplikovat na ni bezvýkresovou dokumentaci a pomocí 3D tisku vytvořit reálný model. Vytisknutý model podrobit bezdotykovému měření pomocí 3D skeneru, společně s bezvýkresovou dokumentací importovat naskenovanou síť do vyhodnocovacího softwaru GOM Inspect a zjistit přenositelnost údajů z bezvýkresové dokumentace do vyhodnocovacího programu.

Lockheed Martin, Airbus a Toyota Motorsport [10]. Rozdílnost vytváření bezvýkresové dokumentace oproti výkresové dokumentace takové, jaká je známá dnes, je zobrazena na Obr. 3-2.



Obr. 3-2 Schéma vytváření MBD a standardní výkresové dokumentace

3.2 Význam a rozdělení PMI dat

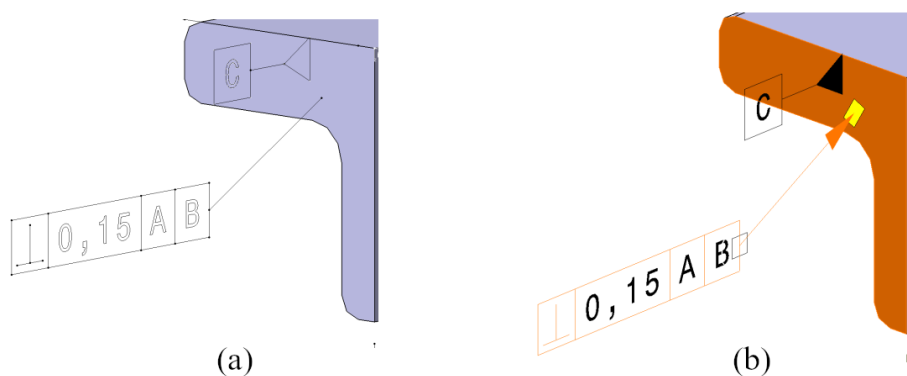
PMI data (Product and Manufacturing Information, česky informace o výrobku a jeho výrobě) jsou digitální informace, pomocí kterých lze zanést výrobní informace, specifikace a různé požadavky do CAD modelu. Jsou to údaje asociované vůči objektům, na kterých jsou PMI informace vytvářeny [13]. Těmito objekty mohou být plochy, hrany nebo osy CAD modelu [14].

Jejich účelem je definovat především GD&T (česky ISO kótování a tolerance), které vytváří základ každé bezvýkresové dokumentace. Skládají se z rozměrových kót, rozměrových a geometrických tolerancí, a jsou nezbytné pro správnou interpretaci modelu [5]. Vztahují se zejména k funkčním plochám, které jsou po výrobě kontrolovány. Využití kótování nefunkčních rozměrů nemusí být relevantní pro výrobu, jelikož CAM software pracuje s geometrií modelu, ale lze jej využít ke komunikaci. Mezi další typy PMI dat patří textury povrchů, materiálové specifikace výrobku, svary a další výrobní a montážní poznámky. PMI data se zobrazují na modelu podobně jako anotace na strojním výkrese pomocí kót a odkazových čar.

Tato data se dále využívají v navazujících procesech, jako jsou například CAM (Computer Aided Manufacturing), CMM, CAI (Computer Aided Inspection), CAE (Computer Aided Engineering), toleranční analýza, tvorba prospektů, nebo ke komunikaci s dodavatelem či

zákazníkem [13] k poskytnutí podrobných informací o produktu. Zmíněná asociativita značek lze využít pro zjednodušený popis více objektů. Například při popisu textury povrchu lze použít jednu značku pro více různých ploch modelu.

PMI data se dělí na 2 typy. Grafické (Obr. 3-3a) – nejsou aktivně spojeny s žádnými plochami ani hranami. Nemají jiné využití v dalším procesu výroby produktu než jako vizuálně informační popis produktu pro uživatele. Druhým typem jsou sémantické PMI data (Obr. 3-3b), které jsou aktivně vázány na plochy, hrany nebo osy CAD modelu.



Obr. 3-3 PMI data; (a) grafická; (b) sémantická; upraveno dle [15]

3.2.1 Sémantické (reprezentační) PMI

Tento typ PMI dat reprezentuje přesné informace o GD&T v bezvýkresové dokumentaci [16] a aplikuje se na konkrétní plochy modelu. Je strojově čitelný a využívá se pro automatizované systémy pro měření dotykové (CMM) a bezdotykové (CAI), vytváření programů pro obrábění (CAM), výpočtové analýzy (CAE), toleranční analýzy. MBD musí obsahovat všechny potřebné sémantické PMI, aby tyto procesy probíhali efektivně a korektně. Příkladem takovéto anotace může být geometrická tolerance rovnoběžnosti plechy k základně. S použitím sémantické PMI poznámky bude tato tolerance připojena k oběma vztaženým plochám. Data, která sémantická PMI zahrnují jsou [16]:

- Druh poznámky
- Hodnota v poznámce
- Geometrie přiřazená k poznámce
- Druh souřadnicového systému
- Poloha a natočení souřadnicového systému
- Typ doplňkové geometrie¹
- Poloha doplňkové geometrie

¹ Doplňkovou geometrií jsou myšleny geometrické prvky, které nejsou součástí geometrie modelu, ale definují jeho tvar. Obvykle se používá pro kótování. Příkladem takovéto geometrie může být osa díry.

3.2.2 Grafické (prezentační) PMI

Těž nesémantické PMI slouží k vizuální prezentaci poznámek modelu. Tento typ poznámek není vázán ke geometrii modelu a nemá proto využití v dalším automatizovaném procesu jako sémantické PMI [16]. Jejich interpretace a využití závisí na lidském faktoru. Příkladem takovéto anotace může být textura povrchu na odkazové čáře vedoucí z plochy modelu, přičemž při označení této anotace v CAD softwaru se společně s ní neoznačí žádná geometrie. Grafické PMI data jsou vizuálně nerozeznatelná od sémantických, pokud nejsou označena v CAD softwaru. Data, která grafická PMI zahrnují jsou [16]:

- Viditelnost poznámky
- Barva poznámky
- Název poznámky
- Tvar poznámky
- Umístění poznámky
- Orientace poznámky
- Odkazové čáry poznámky
- Text v poznámce
- Viditelnost označení souřadnicového systému
- Barva souřadnicového systému
- Název souřadnicového systému
- Popis souřadnicového systému
- Popis souřadnicového systému
- Viditelnost doplňkové geometrie
- Barva doplňkové geometrie
- Poloha uloženého pohledu
- Název uloženého pohledu
- Parametry uloženého pohledu

V další části textu této práce budou pod pojmem „PMI“ myšlena právě sémantická PMI, pokud nebude napsáno jinak.

3.3 Význam MBD

Bezvýkresová dokumentace neboli MBD je proces, který umožňuje přechod od 2D technických výkresů ke 3D CAD modelům obsahujícím všechny potřebné informace pro jeho realizaci v životním cyklu produktu (PMI data). V podstatě představuje něco jako digitální kopii reálného výrobku obsahující všechna data o něm. Kromě zmíněných PMI dat obsahuje MBD také seznam položek, správu revizí, oznámení o právních/proprietárních/vývozních kontrolách [17]. Slouží jako hlavní nosič informací napříč všemi úseky výrobního procesu. Nedochozí tak k rozdílům mezi CAD modelem a výkresovou dokumentací [6].

Informace obsažené v MBD mohou být odlišné pro jednotlivé dílčí fáze životního cyklu produktu, jako jsou konstrukce, výroba a kontrola [5]. Smyslem MBD je totiž využít jeden model pro všechny tyto etapy za účelem snížení časového hlediska a chyb. Proto je pro tvorbu různého kótování jednoho modelu zásadní, aby konstruktér znal, jaké požadavky tyto fáze obnášejí nejen z hlediska standardního přístupu technických výkresů, ale také z přístupu MBD. Množství informací zadávaných do modelu by mělo být dostatečné pro stejné pochopení produktu, jako u technického výkresu.

3.4 Využití PMI dat

3.4.1 Tvorba výkresů

Ačkoliv má tvorba MBD za úkol snížit počet vytvářených výkresů, mohou nastat situace, ve kterých je potřeba informace o modelu předávat i prostřednictvím technických výkresů. V dnešní době nabízí už většina CAD softwarů automatické vkládání poznámek na výkres z již vytvořené bezvýkresové dokumentace. Protože se však do MBD nevkládají všechny rozměrové informace o modelu, je potřeba na výkres doplnit tyto údaje a upravit ho dle potřeby.

3.4.2 CAM

V oblasti výroby produktu mohou být PMI data přínosná, pokud jsou vhodně zahrnutá v geometrii CAD modelu. Důvodem zahrnutí PMI dat do geometrie je asymetrie tolerancí [18]. Například pro výrobu drážky s rozměrem šířky ($20^{+0,2}_0$) mm je potřeba, aby měl CAD model šířku s rozměrem střední hodnoty tolerance, tj. 20,1 mm. Dnešní softwary, nebo jejich rozšíření, již nabízejí možnost zadat toleranci kótě při vytváření náčrtu modelu. Následně si uživatel může vybrat, zda chce tento rozměr zobrazovat v modelu jako jmenovitý, střední, nebo jeden z mezních. V případě že je CAD model vytvořen jmenovitými rozměry a rozměrové tolerance jsou zobrazeny pouze pomocí PMI dat, musí se pro výrobní účely manuálně upravit.

Automatizované vytváření návrhu obráběcích operací se nazývá FBM (Feature Based Machining, česky obrábění na základě konstrukčních prvků) [13]. Funguje na principu topologického rozpoznávání prvků a automatickém generování obráběcího procesu na základě knihovny nástrojů a obráběcích pravidel. Tato funkce v případě MBD pracuje v závislosti na vytvořených PMI datech, díky kterým navrhuje vhodné výrobní nástroje a strategie obrábění [13] pro všechny jednotlivé konstrukční prvky.

3.4.3 CMM

Využití PMI dat pro CMM se dá rozdělit do dvou směrů. První směr využívá softwarové balíčky pro vytváření měřicích programů pro CMM [18], tedy trajektorií měřicího nástroje a automatické vyhodnocení naměřených hodnot porovnáním s PMI. Druhou možností je generace seznamu všech GD&T které MBD obsahuje, opět pomocí softwarových balíčků [18] a jeho využití pro měření. Příkladem takového softwarového balíčku může být AS9102 First Article Inspection [19].

AS9102 First Article Inspection [19] je kontrolní proces využívaný převážně vojenským a leteckým průmyslem, který spočívá v kontrole tolerancí, kvality povrchu a materiálu, náhodně vybraného výrobku z první výrobní série za účelem inspekce výrobku a ověření výrobního procesu. V ideálním případě bude právě tento výrobek představovat etalon toho, co výrobní proces dokáže. Využití PMI pro tento typ kontroly je vhodné z toho důvodu, že se převážně jedná o nové výrobky, a tak vytvoření kontrolní tabulky trvá zlomek času konvenčního způsobu. Zároveň se tímto způsobem eliminují chyby při ručním zadávání kontrolovaných hodnot.

3.4.4 CAI

CAI je bezdotyková kontrolní metoda založená na porovnávání 3D naskenovaného mračna bodů s CAD modelem. Součástí standardního způsobu vyhodnocení (pouze pomocí CAD modelu) ve vyhodnocovacím softwaru je manuální zadání tolerancí kontrolovaných rozměrů a určení základen. PMI data obsažená ve vytvořeném MBD umožňují automatický import GD&T do vyhodnocovacího softwaru a značné urychlení celého procesu.

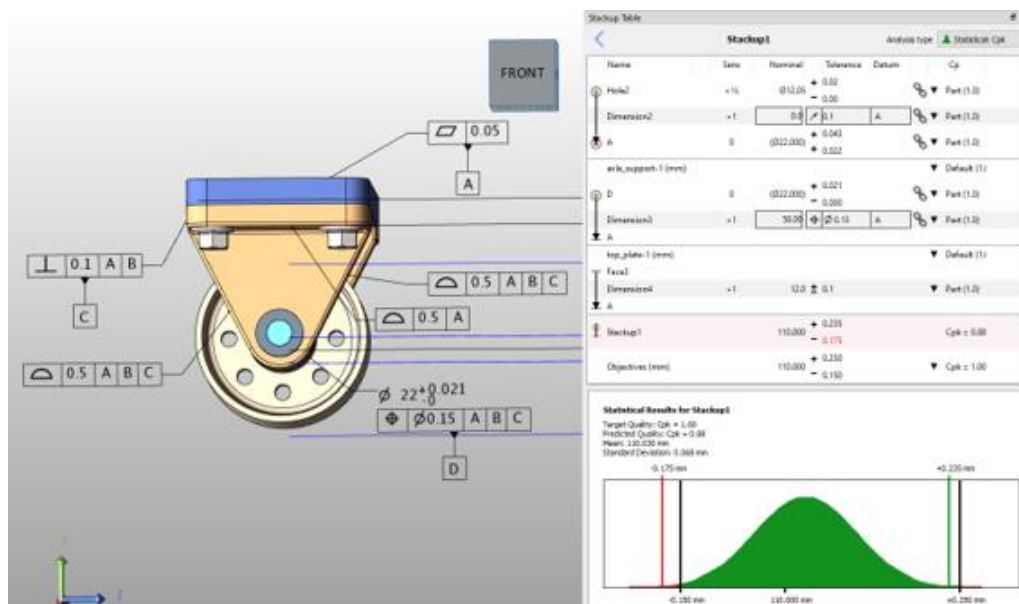
3.4.5 Vizualizace

S využitím vizualizačních nástrojů lze PMI data využít při tvorbě prezentací, technických příruček, montážních návodů a jiných materiálů, nebo ke komunikaci. Pro tyto účely lze využít jak sémantická, tak grafická PMI.

3.4.6 Toleranční analýza

V současné době se převážně používají softwarové metody tolerančních analýz z důvodu snížení chybovosti a zjednodušení výpočtu pro komplikované sestavy, které navíc umožňují 3D toleranční analýzy. Běžně se tyto analýzy vytváří přepisem dat o tolerancích a rozměrech z technických výkresů. Využití PMI dat (konkrétně GD&T) jako vstup pro výpočet však tento proces značně urychluje [20]. Příkladem rozměrových obvodů využívajících PMI mohou být jak lineární metody minima a maxima, tak prostorové pravděpodobnostní (statistické) analýzy Monte Carlo, nebo Worst Case a T-map.

Pro realizaci analýzy se sestava, geometrie dílů a jejich tolerance popsané PMI daty převádí do univerzálního formátu aCTF, který vytváří jednotný vstup pro analytické softwary [20] (Obr. 3-4). Vlastnosti PMI dat umožnily vytvářet plně automatizované analýzy, které fungují na principu detekce vzájemně přiléhajících ploch a následném vyhodnocení rozměrového obvodu [20].



Obr. 3-4 EZtol 2.1 analyzáční software využívající PMI pro 1D analýzy [21]

3.5 Normy pro vytváření PMI dat

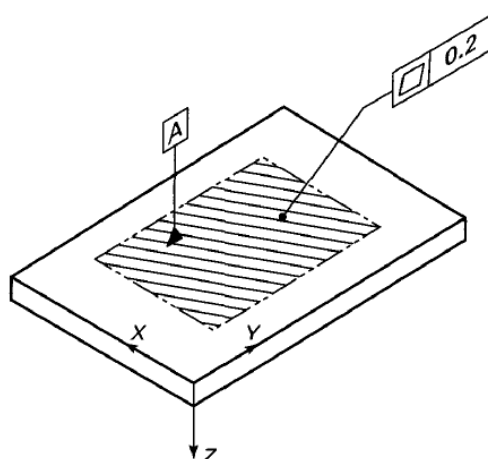
Vytváření pozic PMI dat na CAD modelu může být sofistikovanější než kótování technického výkresu, protože možností, jakými lze PMI umístit vzhledem k modelu, je podstatně víc. Aby byla zaručena přehlednost a jednotný styl MBD, je zobrazování PMI dat na modelu, podobně jako u výkresové dokumentace, standardizované. Tyto normy určují styl zobrazování PMI dat, ale nedávají uživateli informaci o potřebném množství a typu dat [5].

3.5.1 Norma ASME Y14.41

Jednou z prvních norem pro vytváření bezvýkresové dokumentace byla ASME Y14.41-2003 [12], vydaná 15. srpna 2003 společností American Society of Mechanical Engineers [12]. Tato norma rozšiřuje předešlou normu ASME Y14.5 [22], která byla určena pro kótování a tolerování 2D technických výkresů, o aplikaci na 3D model [22]. Vznikla na popud firem zejména z oblastí leteckého, automobilového průmyslu a vlády [12].

Její cílem je nastavit požadavky a referovat výchozí normy pro vytváření a kontrolu digitálních definičních dat produktu [12]. Dává také doporučení pro tehdy budoucí vývoj CAD softwarů se zaměřením na kótovací systém [12]. Na začátku popisuje společné požadavky pro metody kótování CAD modelu a CAD modelu s výkresem, dále se zaměřuje na detailní popis pro každou metodu zvlášť. Popisuje například poziční umístění GD&T k modelu a způsoby jejich používání, vytváření základů (viz Obr. 3-5), umístění souřadných systémů, nebo vytváření dílčích axonometrických i ortogonálních pohledů. Na konci normy je

několik stránek věnováno ukázkovým bezvýkresovým dokumentacím. Její nejnovější vydání (k datu 13. 1. 2023) je Y.14.41-2019.



Obr. 3-5 Základna a geometrická tolerance rovinnosti definovaná pro část plochy [12]

3.5.2 Norma ISO 16792

Norma ISO 16792:2006 [23] „Technical product documentation — Digital product definition data practices“ vydaná Mezinárodní organizací pro normalizaci v prosinci roku 2006 je upravená verze normy ASME Y14.41 pro Evropu [23]. Popisuje postupy a požadavky pro definici digitálního produktu. Zaměřuje se také na funkce aplikačních systému, jako například propojení PMI s vytvářením obráběcího programu tak, aby byla PMI data strojově čitelná [11].

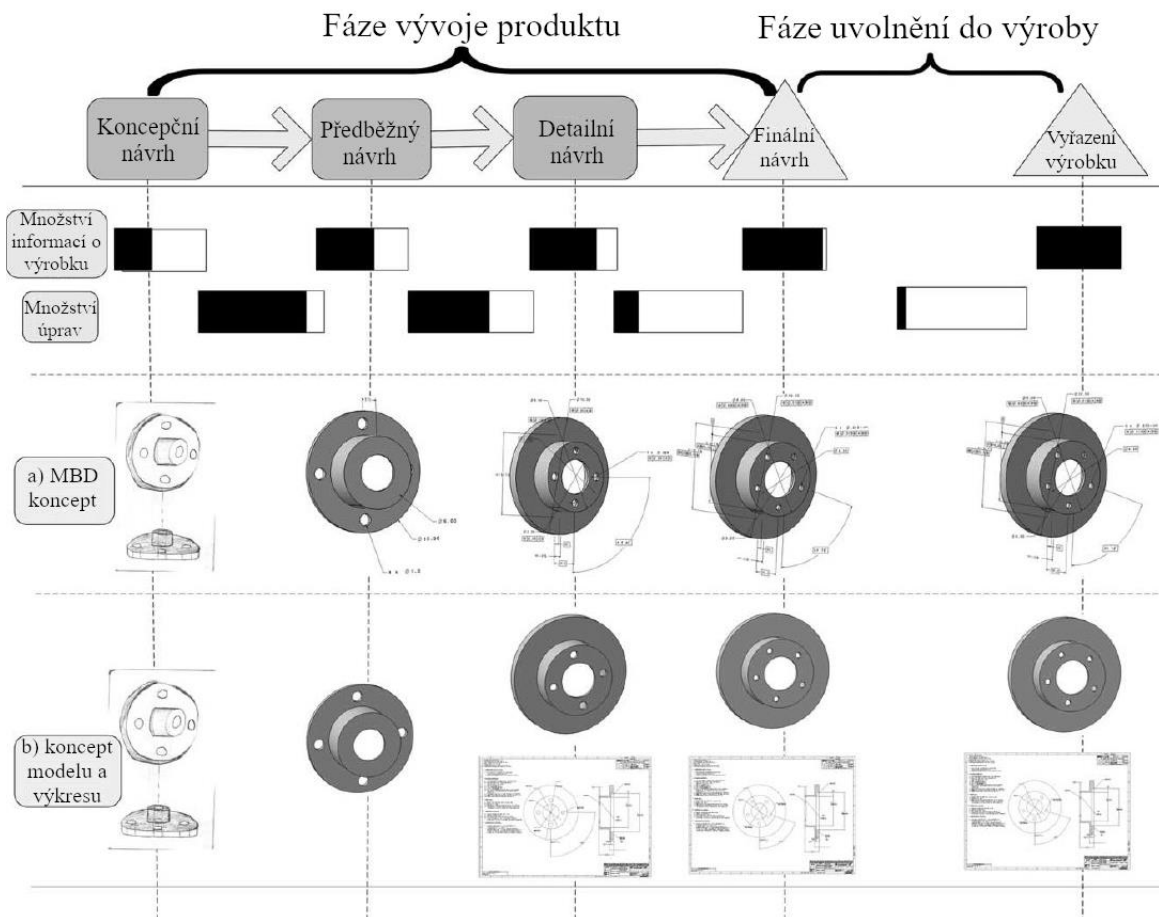
Společně s normou ISO 1101, která je zaměřená na geometrické specifikace produktu, vytváří podklad pro správné vytvoření MBD. Její nejnovější vydání (k datu 13. 1. 2023) je ISO 16792:2021. Zařazení této normy do ČSN proběhlo v květnu 2023.

3.6 Zavádění bezvýkresové dokumentace do konstrukčního a výrobního procesu

Existují tři základní přístupy k návrhu produktu. Prvním z nich je koncept MBD, který si klade za cíl zkrátit čas potřebný k uvedení produktu na trh a zlepšit kvalitu výsledného výrobku. Druhý koncept zahrnuje jak 3D model, tak technický výkres. Ačkoliv tvorba a úpravy 3D modelu jsou součástí konstrukčního procesu, vytváření a úpravy technického výkresu zůstávají nezbytnou součástí konstrukčního vývoje mnoha firem. Třetí přístup obsahuje pouze technické výkresy. Tento způsob předávání informací se využíval převážně před příchodem CAD softwarů a v dnešní době se téměř nepoužívá.

3.6.1 Jednotlivé fáze konstrukčního procesu

Jednotlivé fáze jsou znázorněny na Obr. 3-6. První fází konstrukčního procesu je koncepční návrh, který je obdobný u obou přístupů. Zahrnuje základní náčrt, geometrii, uspořádání a potřebné konstrukční prvky [6]. Po vytvoření koncepčního návrhu následuje předběžný návrh. Jeho účelem je přetvořit myšlenky do CAD modelů, které budou obsahovat pouze základní geometrické prvky [6]. Tyto předběžné podoby modelů se využívají pro kinematické, pevnostní a teplotní analýzy [6], aby se ověřila jejich funkčnost. Následuje detailní návrh, ve kterém se projevuje největší odlišnost obou přístupů. Zatím co v přístupu MBD se definuje konkrétní design pomocí PMI dat, u běžného přístupu vzniká ke CAD modelu navíc 2D strojní výkres, na který se kótují konkrétní informace, které již však nejsou nijak spojeny s modelem. Vznikají tak 2 soubory, které je nutno udržovat aktuální současně, což vede k prodlužování potřebného času k aktualizaci dat. Poslední fází konstrukce je konečný návrh, který obsahuje konečné úpravy detailů a slouží k předání finálních informací zákazníkovi.



Obr. 3-6 Fáze vývoje produktu, upraveno dle [6]

3.6.2 Problémy při zařazování MBD do konstrukčního procesu

Z předchozí části vyplývá, že vytváření MBD vyžaduje novou oblast zkušeností a odlišné přemýšlení nad jeho tvorbou [17] oproti konvenční metodě, což přináší množství diskutovaných obav a možných problémů firem, které se tímto směrem chtějí uchýlit. Následující popsané problémy vyplývají ze studie, která se zaměřuje na nahrazení strojních výkresů plně bezvýkresovou dokumentací ve dvou leteckých společnostech [6]. Autoři se ve studii pokusili přesunout veškeré poznámky ze strojních výkresů na 3D model pomocí PMI dat. Vzniklé problémy rozdělili do tří kategorií. Problémy s proveditelností, problémy s tvorbou bezvýkresové dokumentace a právní hledisko, které dále nebude rozvedeno z důvodu platnosti pro Kanadu.

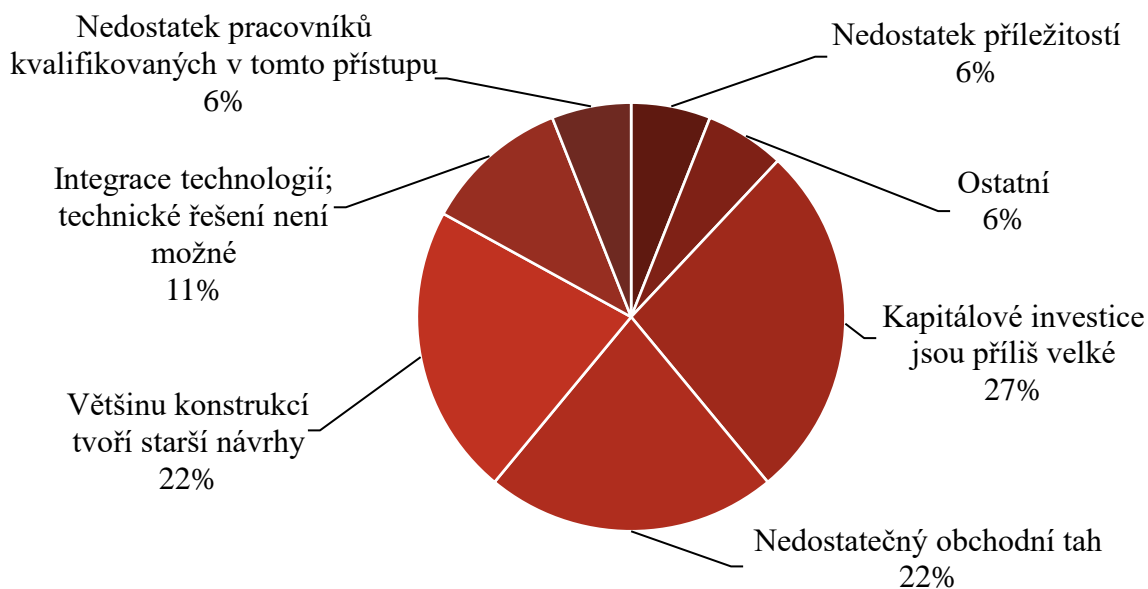
Autorům [6] se podařilo úspěšně přesunout 96 % všech poznámek přímo do 3D modelu. Důvodem, proč se nepodařilo přesunout veškeré poznámky, byly ty anotace, které byly vytvořeny z důvodu firemních záležitostí a jejich přenos do 3D modelu neměl význam. Přestože výsledná úspora velikosti souboru byla 25-30 %, tvorbou PMI dat nebyl uspořen žádný čas oproti tvorbě poznámek na výkrese [6]. Důvodem je podobnost způsobů vytváření těchto anotací.

Nejčastěji diskutované problémy při přechodu na MBD [6] byly:

- Přístupnost dat a vizualizace – většina lidí v průběhu výrobního cyklu výrobku nemá přístup ke CAD softwaru
- Obsah dat – MBD musí obsahovat všechny potřebné informace
- Znázorňování poznámek – MBD musí dodržovat normy při zobrazování PMI
- Správa dat – MBD musí umožňovat záznamy revizí
- Zabezpečení dat

3.6.3 Obavy při zavádění MBD do výrobního procesu

Rozdělení obav při přijetí MBD do výroby popsali ve své práci z roku 2016 [5] autoři z Purdueovy univerzity a pracovníci NIST (National Institute of Standards and Technology) z USA. V jejich celosvětově zaměřeném dotazníku zjišťovali od profesionálů z průmyslového odvětví, co považují za největší obavy z přijetí MBD pro výrobu a měření. Z výsledků znázorněných na grafu (Obr. 3-7) vyplývá, že největší obavou je výše počáteční kapitálové investice, dále také slabý obchodní tah a také skutečnost, že většinu konstrukcí tvoří starší návrhy, jejichž přepracování z technických výkresů do MBD by mohlo být časově a finančně náročné [5].

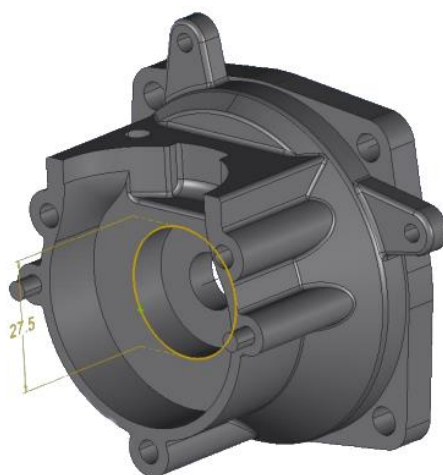


Obr. 3-7 Graf nejčastějších obav z přijetí MBD do výroby, upraveno dle [5]

3.6.4 Příklady implementace MBD

Příkladem použití konceptu MBD mohou být následující nedávno vypracované vybrané případové studie. Případová studie z roku 2019 se zabývala prototypováním kompresoru do turboturbového motoru s využitím prvků MBD [24], založených na normách ASME Y14.41-2012 a ASME Y14.5-2009, s cílem snížit čas vývoje, který obvykle trvá 4 roky. Autoři využili 150 kótovaných modelů pro analýzy (CAE), výrobu (CAM) a kontrolu (CMM). Celkově zaznamenali 95% úspěšnost implementace PMI dat na CAD modely [24]. Tento postup prototypování výrazně zlepšil komunikaci mezi jednotlivými cykly výroby [24] a zrychlil duplikování dokumentace u podobných dílců. 70 % dílců bylo do jisté míry konstruováno a vyráběno zároveň, což vedlo k nemalé časové úspoře. Nejsignifikantnější časová úspora byla zaznamenána při vytváření programu pro kontrolu na CMM, která činila 50 % [24], přičemž průměrně bylo přeneseno do CMM programu pouhých 50 % všech vytvořených PMI dat [24]. I přes to, že tvorba PMI dat trvala o 15 % déle v porovnání s tvorbou technických výkresů, byly změřeny celkové časové úspory celého výrobního cyklu 17 % [24].

Za zmínku stojí také případové studie z roků 2018 a 2019, které se zabývaly časovou úsporou tvoření programu pro CMM. Studie od firmy Raytheon zabývající se inspekcí tělesa na Obr. 3-8 [25] dokázala použitím MBD zredukovat potřebný čas o 81 %. Studie zabývající se inspekcí tělesa od Rolls Royce, jenž nemůže být z právních důvodů sdílena, dokázala uspořit použitím MBD v softwaru Zeiss Calypso 97 % potřebného času [26].



Obr. 3-8 Testovací model případové studie, upraveno dle [25]

Časové a finanční úspory nadnárodních korporací zjišťovala také společnost Capvidia, která se zabývá CAD a MBD softwarovými řešeními pro strojírenské firmy. Ze sesbíraných dat vyplývají následující výsledky veřejně dostupných případových studií [17]:

- Společnosti PTC a Bosch Power Tools zkrátily dobu programování a kontroly souřadnicovým měřicím systémem o 60-70 %
- Společnost McKinsey & Company zjistila, že by díky MBD mohla dosáhnout zvýšení příjmů až o 10 %, zkrátit dobu uvedení na trh až o 50 % a zlepšit kvalitu výrobků až o 25 %.

3.7 Přístupy k bezvýkresové dokumentaci vybraných CAD programů

Většina CAD softwarů v dnešní době již obsahuje možnost vytvářet bezvýkresovou dokumentaci, avšak každý se v něčem liší. Na následujících řádcích proto budou popsány rozdíly přístupů vytváření PMI dat a možnosti využití MBD ve vybraných softwarech.

Autodesk Inventor nabízí pouze základní tvorbu PMI, kterou může uživatel aplikovat jednotlivě na každý prvek, nebo je může vytvářet z již vytvořených kót při tvorbě modelu [27]. Vytvořené PMI data lze orientovat jak do různých anotačních rovin, tak do různých poloh v této rovině. Obsahuje funkci Poradce tolerance, která dává uživateli zpětnou vazbu o chybách vytvořených PMI dat [27]. Podobně je tomu u softwarů PTC Creo a CATIA, které nabízí také pouze základní vytváření PMI dat.

Rozsáhlejší nabídku možností poskytuje software Siemens NX, který přistupuje k vytváření MBD pomocí knihovny předdefinovaných PMI [28]. Umožňuje uživateli hromadně vytvářet PMI, což může šetřit čas u komplexních dílů s mnoha stejnými geometrickými prvky, jako mohou být například díry pro šrouby u plastových dílů. Nabízí funkci Convert to PMI, která

z výkresové dokumentace převede poznámky na PMI data MBD a vytvořené PMI data dokáže propojit s PMI daty jiných modelů [28]. Dále také nabízí funkce PMI Compare, která porovná PMI data dvou vybraných verzí vytvořených MBD, takže uživatel dokáže identifikovat provedené změny [28]. Obsahuje funkci Poradce, která dává uživateli zpětnou vazbu o chybách vytvořených PMI dat, ale uživatel má možnost v nastavení specifikovat, na která pravidla se má tato funkce vztahovat [28]. Vytvořené data v Siemens NX se dále dají využít v dalších softwarech od společnosti Siemens, například pro toleranční analýzy, výrobu a měření.

SolidWorks přistupuje k tvorbě MBD pomocí několika softwarových balíčků. Nejrozšířenějším balíčkem je DimXpert (MBD Dimensions), který umožňuje základní tvorbu MBD [29]. Obsahuje nástroj automatického vytváření PMI geometrických tolerancí pomocí výběru vztažných ploch, přičemž hodnoty těchto tolerancí je možné upravit v nastavení. Dalším balíčkem je TolAnalyst, který umožňuje vytvářet toleranční analýzy sestav užitím PMI dat [29]. Solidworks také obsahuje placený balíček MBD, který přidává další funkce [29]. Tyto funkce, jako například exportování bezvýkresové dokumentace do formátů 3D PDF, STEP AP242, přitom bývají neplacenou součástí ostatních softwarů.

3.8 Formáty pro přenos MBD

Aby se zaručila přenositelnost dat mezi různými softwary, existuje mnoho typů formátů souboru. Každý formát má své vlastní specifikace, které určují, jak jsou data organizována, jaký typ dat mohou obsahovat, jak jsou data kódována a jaký typ komprese se používá k minimalizaci velikosti souboru. Různé programy používají různé formáty pro ukládání dat, a proto mohou mít problémy s čtením souborů v jiném formátu. Proto jsou vytvářeny univerzální formáty, které umožňují zobrazovat dokumenty bez ohledu na to, který program byl použit pro jejich vytvoření.

Jedním z důvodů využívání univerzálních formátů mohou být zásady uchování údajů společnosti. Konstrukční data musí být dostupná i dlouho po tom, co se vytvořila. Například v automobilovém průmyslu se data musí uchovávat alespoň 25 let a v leteckém průmyslu až 40 let [30]. Garance dostupnosti dat uložených v původním formátu CAD softwaru může selhat v případě, že software přestane existovat [18]. Proto se často konstrukční data převádí do univerzálních formátů. Použití a rozdíly vybraných nejpoužívanějších univerzálních formátů podporujících PMI budou dále popsány.

3.8.1 STEP AP242

Nejrozšířenějším přenosovým formátem je v současnosti ISO protokol STEP AP203 [20] používaný především v leteckém a obranném průmyslu [31], který obsahuje geometrii, topologii a uspořádání dílů, sestav a ploch. STEP funguje na principu NURBS, což je velmi přesná matematická reprezentace pomocí hladkých ploch a křivek. Pro automobilový průmysl byl určen protokol STEP AP214, který podporuje navíc grafické GD&T, textové poznámky modelu, hladiny a barvy, historii vytváření, tolerance a kvality povrchu, aj.

Tyto dva zmíněné formáty spojuje protokol STEP AP242 (dle normy ISO 10303-242) [32], který je určen pro inženýrství založené na 3D modelech. Jeho první verze vznikla koncem roku 2014 [32], ze které se postupně zahrnováním dalších možných přenositelných dat stala současná 2. edice vydaná roku 2020. Kromě vlastností STEP AP203 a STEP AP214 podporuje protokol navíc [31]:

- Sémantické PMI
- Kvalitu 3D tvaru
- 3D vazby
- 3D kinematické sestavy
- 3D elektrické kabely a svazky
- 3D potrubí
- Seznam položek
- Správu digitálních práv

STEP AP242 pokrývá celý životní cyklus produktu [18], konkrétně se využívá pro MBD, inženýrské analýzy, výrobní simulace a plánování výroby, kontrolu, vizualizaci a dlouhodobou archivaci [32].

3.8.2 3D PDF

Dalším formátem podporujícím přenos PMI dat je 3D PDF, které využívá PRC formát [18] a řídí se normou ISO-32000 a ISO-14739, která mimo jiné definuje zobrazení PMI v 3D PDF. Slouží především ke komunikaci se zákazníky například pomocí volně dostupného programu Adobe Acrobat Reader [33], který byl nainstalován na 93 % počítačích připojených k internetu [34], což zjednodušuje přístupnost k datům oproti klasickým CAD programům s placenými licencemi. Nabízí funkce volné rotace modelem, zobrazování předvytvořených pohledů se sémantickými PMI daty, řezy tělesy, měření vzdáleností, zobrazení stromu sestavy apod.

Jednou z největších výhod tohoto formátu je kompatibilita se standardním formátem PDF, díky které je možné začlenit 3D model do digitálních dokumentů a umožnit tak čtenáři interakci s modelem přímo v dokumentech o výrobku. Dalším použitím je například krokové

3.8.4 QIF

QIF je standard podporující koncepty digitálního vlákna², zaměřující se na MBD, konkrétně sémantické PMI s využitím pro návrh, plánování měření, měření, výsledky a vyhodnocení měření [18], což je klíčová vlastnost pro průmysl 4.0. QIF zpětně propojuje zmíněné oblasti a umožňuje upravovat jejich hodnoty podle získané zpětné vazby. Obsahuje také knihovny postupů měření pro často používané geometrické prvky a šablony pro měřicí operace. Je psáný programovacím jazykem XML, což umožňuje snadnou interakci s internetovými aplikacemi [37]. QIF 3.0 je ANSI standard, který byl roku 2020 přijat jako norma ISO 23952:2020.

Skládá se z osmi částí (Obr. 3-10) [37]:

- Přehled – popis struktury a dat informačního modelu QIF
- Knihovna – možnosti použití jednotlivých oblastí aplikace
- MBD – přenosový formát bezvýkresové dokumentace obsahující PMI
- Plánování – přenáší oblasti a způsoby měření výrobku
- Zdroje – informace o dostupných měřicích zařízeních
- Pravidla – umožňuje specifikovat určitá kritéria provádění měření
- Výsledky – mračna bodů, nebo číselné hodnoty
- Vyhodnocení – specifikace vhodné statistické metody pro vyhodnocení výsledků



Obr. 3-10 QIF použití v digitálním vláknu, upraveno dle [38]

² Digitální vlákno je způsob komunikace, který umožňuje ukládat, sledovat a sdílet informace o výrobku během celého životního cyklu, s cílem zlepšení kvality, urychlení výroby a snadnější identifikace problémů [45].

3.9 Oblasti aktuálního zaměření vývoje MBD

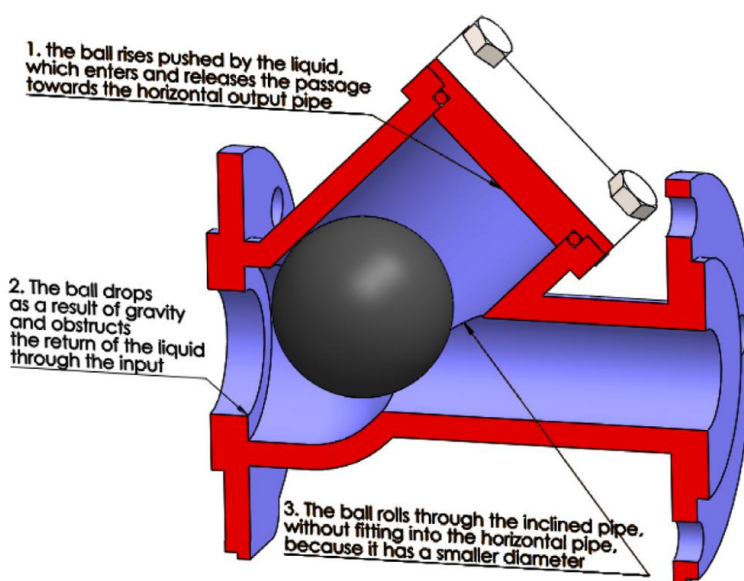
3.9.1 Automatická tvorba MBD z technického výkresu

Společnost Capvidia vytvořila doplňkový modul MBDCoconnect [39] pro CAD software PTC Creo, který mimo jiné jeho funkce dokáže také převádět rozměrové kóty a geometrické tolerance z výkresové dokumentace na sémantické PMI data přímo do modelu se kterým je výkres spojený. Pomocí automatické detekce všech informací z vytvořených pohledů modelu na výkrese vytvoří odpovídající PMI a přenesení je do příslušných rovin 3D modelu. Po dokončení operace informuje modul uživatele seznamem kót, které se nepovedlo přenést, aby bylo možné tyto PMI data vytvořit dodatečně manuálně.

3.9.2 Klasifikování textových poznámek dle funkce

Poznámky zobrazené v bezvýkresové dokumentaci jsou buď připojeny ke konkrétnímu místu modelu, nebo jsou zobrazeny paralelně k obrazovce mimo model. Zpravidla obsahují informace týkající navazujících procesů při realizaci produktu, ale nemají funkční využití.

Autoři Company a spol. (2023) [40] přišli s návrhem klasifikovat poznámky podle jejich funkce. Tyto poznámky by byly automaticky tříděny do skupin podle jejich účelu, pomocí používání běžně používaných odborných výrazů, jako jsou například fráze zmíněné v normě ASME Y14.100:2017 v oddíle 4.27.2. Poznámky by tak měly obsahovat pouze jednoduché stručné věty popisující danou věc, její funkci a důvod použití (viz Obr. 3-11, jazyk použitý na obrázku je nezměněn ze zdroje [40] z důvodu funkčnosti klasifikování pouze pro anglický jazyk), např. pístní kroužek utěsňuje spalovací komoru, aby zabránil průchodu tekutiny. Rozdělení poznámek do skupin je zobrazeno v Tab. 3-1.



Obr. 3-11 Ukázka formulací vět popisujících funkci produktu [40]

Tab. 3-1 Klasifikace poznámek MBD, upraveno dle [40]

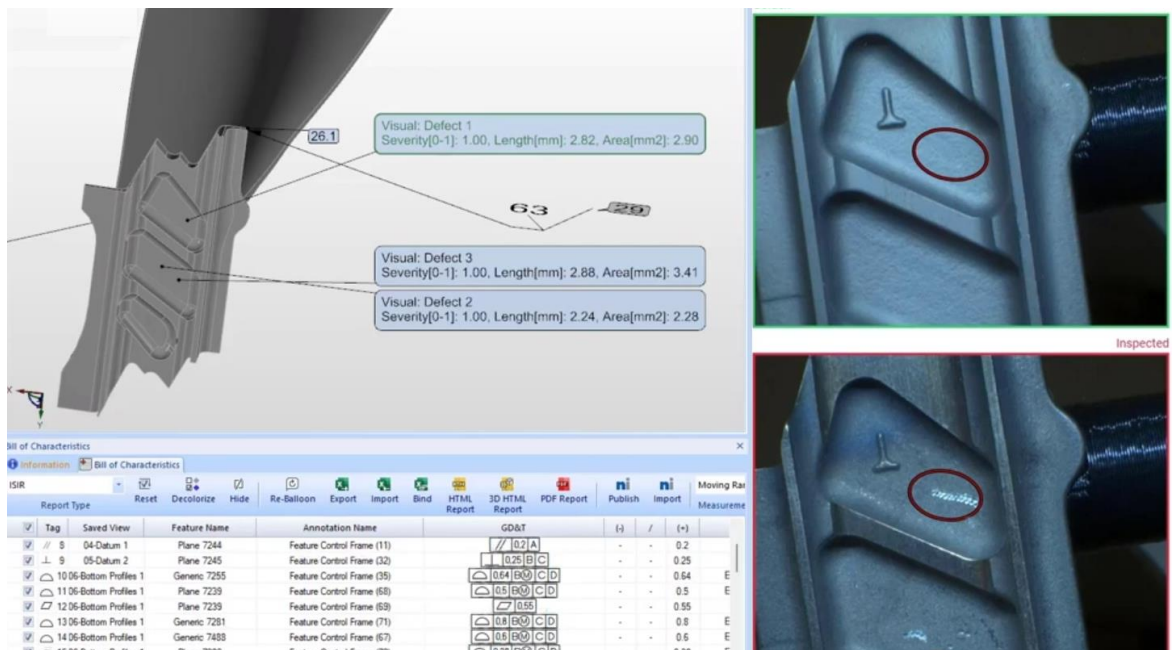
| Účel | Zaměření | Obsah |
|------------|----------------|---|
| Cíle | Obecné | Hlavní obecný cíl |
| | Konkrétní | Funkce Výstupy |
| Požadavky | Implicitní | Technické omezení a překážky Zákony a předpisy |
| | Explicitní | Specifikace výrobce Podmínky a požadavky zákazníka |
| Odůvodnění | Argumentační | Know-how a konstrukční rozhodnutí |
| | Dokumentační | Duševní vlastnictví produktu |
| Záměry | Použití/provoz | Provozní postupy |
| | Změna designu | Postupy úprav |

3.9.3 Toleranční analýzy s využitím MBD

Jak již bylo zmíněno dříve, využití MBD pro toleranční analýzy již existuje v podobě pár softwarů, ale i přes to je to poměrně nedotčený předmět výzkumu [41]. Existující softwary umožňují pouze malé množství metod pro použití. Vývoj zpomaluje také fakt, že každý CAD software používá jiné principy fungování MBD, což vytváří problém zejména v převodu GD&T z PMI dat na reprezentační model použitelný pro toleranční analýzu [41]. Aktuálně existuje konvertor souboru STEP AP242 do souboru CTF použitelného pro automatizované toleranční analýzy [41].

3.9.4 Automatizovaná vizuální kontrola založená na MBD pomocí QIF

V současné době probíhá vývoj na softwaru MBDVidia, který nabízí spojení vizuální kontroly vytvořené pomocí programů PolyWorks, Kitov a Excel s MBD ve formátu QIF [42]. Princip fungování spočívá v nahrání QIF souboru obsahujícím MBD do softwaru pro optickou kontrolu, který na základě získaných dat o modelu automaticky vytvoří a provede měřicí cyklus (popřípadě lze provést manuálně). Získané výsledky měření v podobě fotografií defektů se převádí do souboru QIF pomocí programu MBDVidia a jsou spojeny přímo s odpovídajícími místy v MBD. Na Obr. 3-12 je výstřižek ze softwaru, který znázorňuje spojení fotografií defektů s jejich lokací na modelu. Následně se tato data využívají pro zpětnou vazbu napříč celým sektorem využívajícím technologii QIF a případné úpravy modelu, či výrobních operací.



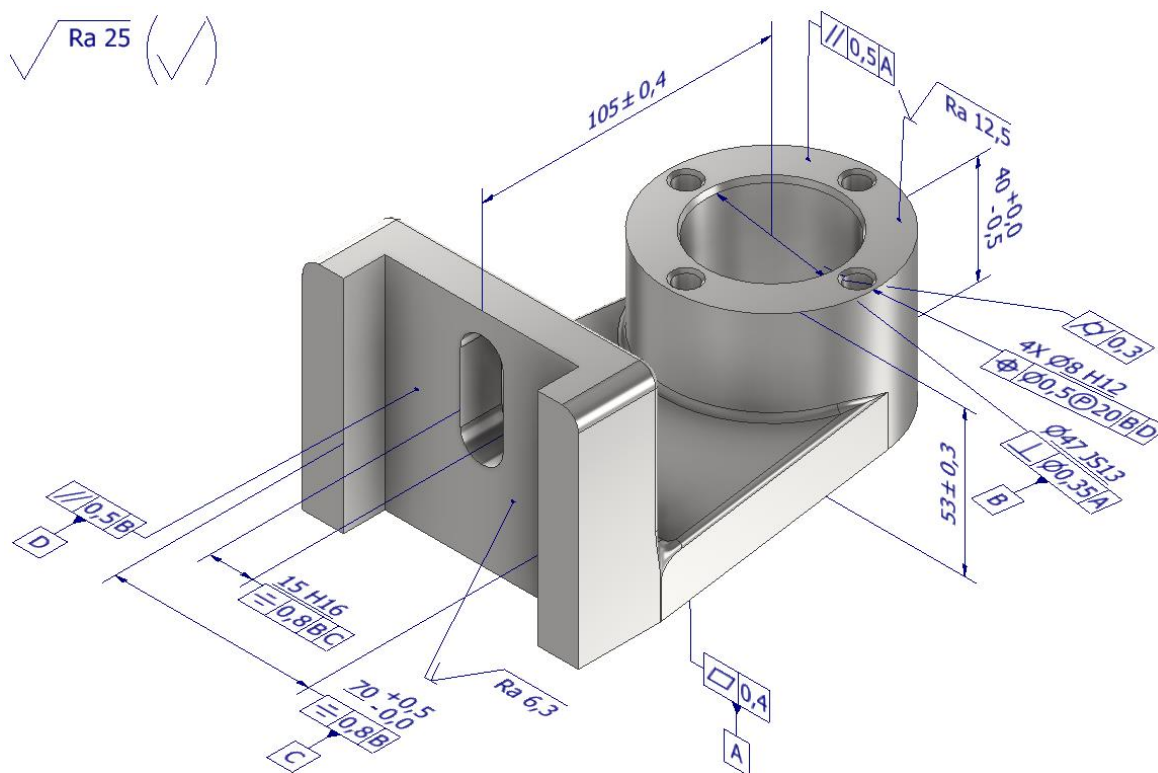
Obr. 3-12 Výstřížek ze softwaru MBDVida zobrazující výsledky vizuální kontroly, upraveno dle [42]

4 DISKUZE

Pro ověření získaných poznatků o bezvýkresové dokumentaci byl navržen testovací případ v podobě kontroly přenositelnosti PMI dat vytvořených na jednoduché součásti v CAD programu Inventor do softwaru GOM Inspect 2022, který slouží pro vyhodnocení bezdotykového měření pomocí 3D skeneru. Pro získání dat k vyhodnocení byl součástí procesu 3D tisk a 3D skenování součásti. Jednotlivé části postupu budou dále popsány.

4.1 Tvorba MBD a 3D tisk testovací součásti

Jako testovací součást byl zvolen ložiskový stojan (Obr. 4-1) z důvodu dostatečného počtu různých typů kontrolovaných tolerancí rozměrů a geometrie definovaných pomocí PMI dat. Zároveň byl dbán zřetel na vhodnost tvaru pro realizaci 3D tiskem a dobrou viditelnost snímaných ploch pro 3D skener. MBD model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2023 a bylo do něj importováno 100 % všech PMI dat, které byly předem zvoleny.



Obr. 4-1 MBD vytvořené v programu Inventor 2023

Při tvorbě bylo dbáno na to, aby vytvořená geometrie odpovídala středním hodnotám³ zvolených tolerancí s cílem dosažení intervalu tolerance při vyhodnocování. Hodnoty tolerancí a stupně normalizovaných tolerancí zobrazených pomocí sémantických PMI dat nebyly voleny standardním doporučeným způsobem pro strojní součásti, nýbrž s ohledem na nepřesnost výroby produktu aditivní metodou. Základní úchytky tolerancí však byly navrženy tak, aby odpovídaly reálnému použití.

Ložiskový stojan byl vytisknut technologií FDM na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ z materiálu PETG, který byl zvolen z důvodu nízké deformace po vychladnutí a nízké hodnoty drsnosti povrchu výrobku. 3D tisk byl zajištěn Ústavem konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

Vzhledem k tomu, že program GOM Inspect 2022 neumožňuje importování souborů typu IPT vytvořených v programu Inventor, byl model exportován do univerzálního souboru typu STEP AP242, který podporuje přenos sémantických PMI. Soubor s vytvořenou bezvýkresovou dokumentací je uložen v příloze P1.

4.2 Skenování objektu

4.2.1 3D skener

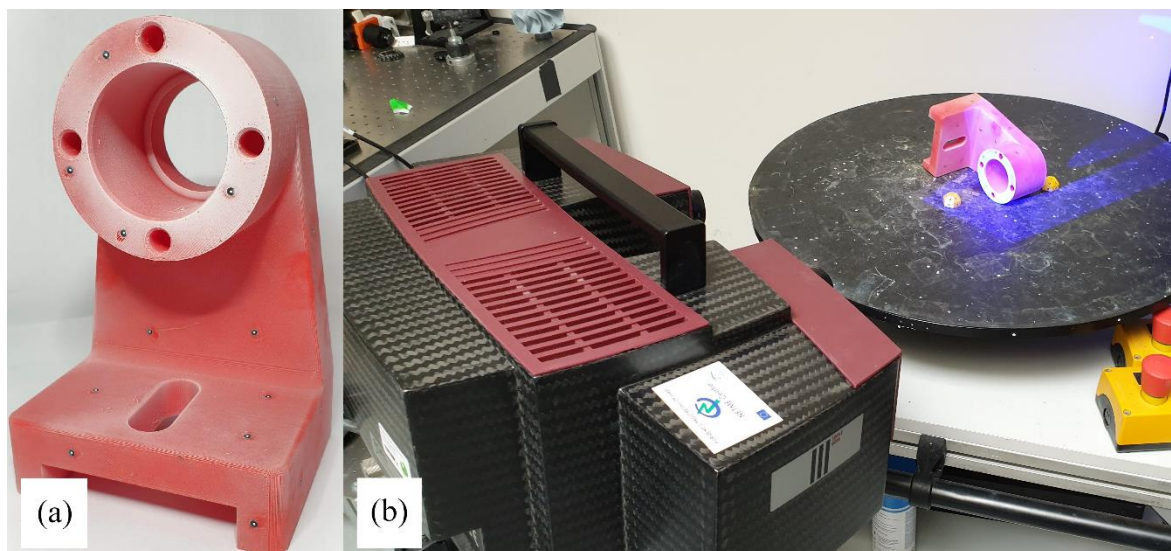
Pro nasnímání objektu a získání dat o jeho rozměrech a geometrii bylo použito optické metrologické metody, konkrétně 3D skeneru ATOS III Triple Scan [43] certifikovaným kalibrační metodou VDI/VDE 2634. Tento typ skeneru pracuje na principu projekce rastrového vzoru úzkopásmovým modrým světlem, který je snímán pomocí dvou kamer. V softwaru se následně snímky získané z obou perspektiv zpracují a získá se tak přesná informace o prostorové poloze až 8 milionů snímaných bodů [43].

4.2.2 Měření

Nezbytným krokem před samotným měřením pomocí 3D skeneru byla příprava modelu pro měření. Na vnější plochy modelu se aplikovaly samolepicí referenční body, které jsou určeny pro polohování různých skenů v softwarovém prostoru. Z důvodu použití lesklého tiskového materiálu byl povrch upraven pomocí bílého sublimačního spreje, který vytvořil tenkou homogenní matnou vrstvu vhodnou pro skenování (Obr. 4-2a).

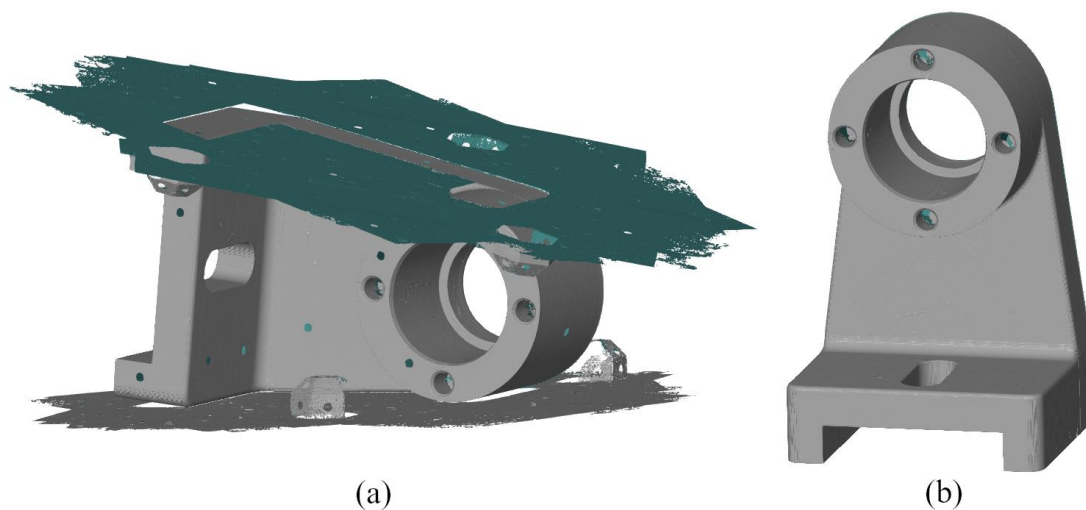
³ Velikosti tolerančních polí byly optimalizovány i po realizaci výrobku, takže jejich střední hodnota přesně neodpovídá geometrii modelu, nicméně s ohledem na nepřesnost výroby 3D tiskem, zkroucení výrobku po vychladnutí a faktu, že je zkoumána přenositelnost PMI dat, je tato změna nepodstatná.

Takto připravený ložiskový stojan byl umístěn na otočný stůl (Obr. 4-2b), na kterém se provedlo ve dvou polohách objektu automatické měření po 45° rotacích stolu a ruční měření, díky kterému se dosáhlo naskenování zbytku nenasmímaných ploch. Nejproblematictějšími místem z hlediska měření byly 4 díry na čele stojanu, jejichž koncové části ploch u dna se nepodařilo naskenovat.



Obr. 4-2 (a) Ložiskový stojan připravený ke skenování; (b) měření přístrojem ATOS III

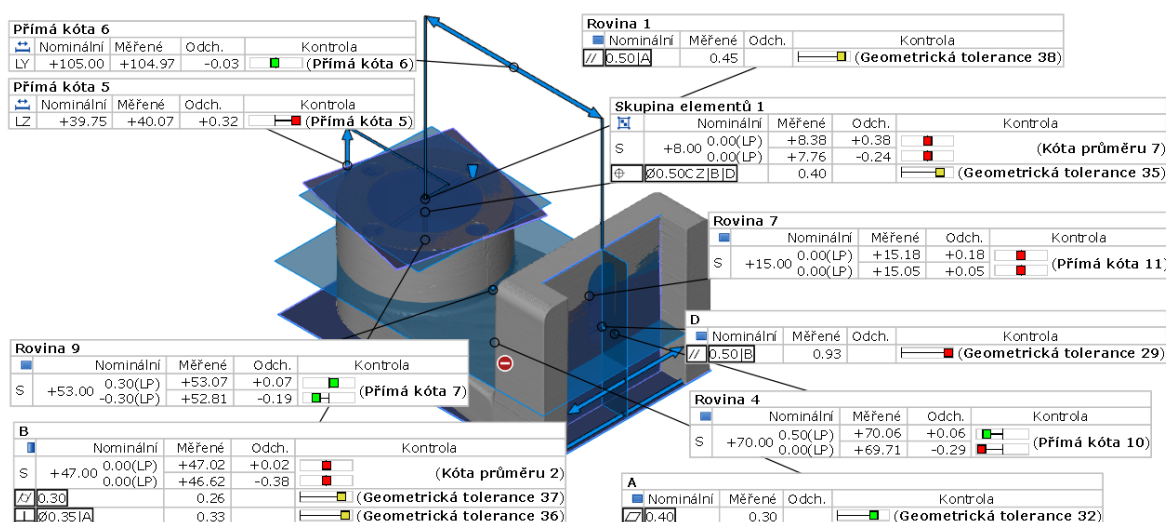
Vzniklá mračna bodů, naskenovaná z různých úhlů, se spojila a proložila trojúhelníkovými plochami (Obr. 4-3a), které kromě souřadnic každého bodu obsahují také normálové vektory ploch. Plochy bylo potřeba oříznout od nežádoucí naskenované plochy rotačního stolu a také proložit plochami díry vzniklé po odstranění referenčních bodů z naskenované sítě. Takto upravená síť (Obr. 4-3b) připravená pro inspekci byla exportována do souboru formátu STL.



Obr. 4-3 Naskenovaný povrch ložiskového stojanu; (a) neupravený; (b) upravený

4.3 Přenos dat do programu GOM Inspect

Do programu GOM Inspect byl nahrán naměřený model ve formátu STL a model obsahující PMI data ve formátu STEP AP242. Naskenovaný model byl automatickou segmentací rozdělen na několik mračen bodů odpovídajícím jednotlivým geometrickým prvkům získaných z nahraného CAD modelu. Součástí tohoto kroku bylo také vyloučení rušivých bodů, které jsou příliš odlehle od zbytku nasnímaných hodnot. Rušivé body jsou takové, které mají vzdálenost od vytvořeného geometrického prvku větší než dvojnásobek směrodatné odchylky (2σ) [2]. Následně proběhlo zarovnání modelů pomocí funkce Prealignment. Software po zarovnání provedl automatické porovnání naskenovaného modelu s PMI daty z CAD modelu. Na Obr. 4-4 je zobrazen výsledek importu bezvýkresové dokumentace a jeho porovnání s naskenovanou sítí.



Obr. 4-4 Výsledky měření ložiskového stojanu v programu GOM Inspect

4.4 Vyhodnocení úspěšnosti importování dat

Do programu GOM Inspect se povedlo importovat většinu vytvořených PMI dat včetně poznámek k modelu a jeho drsností povrchu. Tyto poznámky však neobsahovaly konkrétní text, ale byly pouze označeny jako „Obecná poznámka“ a „Drsnost“.

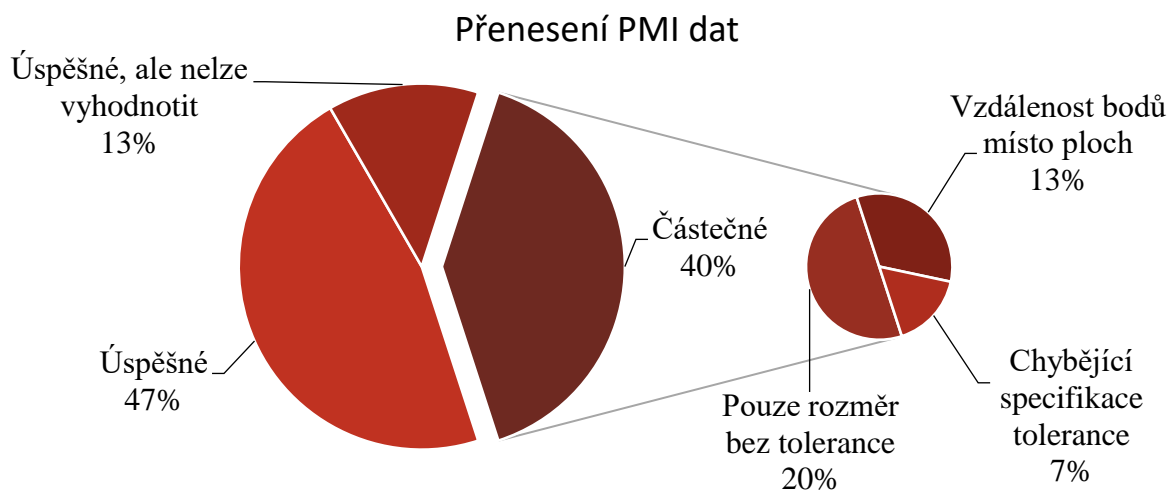
Jak je vidět v Tab. 4-1, spousta PMI dat byla přenesena pouze částečně, a to z několika důvodů. U rozměrových kót s normalizovanými tolerančními třídami se povedlo naimportovat vždy pouze hodnotu jmenovitého rozměru i přes to, že software obsahuje seznam těchto tolerancí. U dvou ze čtyř rozměrů tolerovaných pomocí mezních úchylek byla naimportována střední hodnota vzdáleností dvou bodů náležícím kontrolovaným plochám, místo rozměru vzdálenosti dvou ploch s tolerancí. U tolerance polohy nebylo naimportováno posunutí toleranční pole.

Tab. 4-1 Vyhodnocení přenositelnosti PMI dat do programu GOM Inspect

| Typ PMI | Tolerance [mm] | Přenesení | Naměřená hodnota [mm] | Vyhodnocení |
|---|----------------|--|------------------------|----------------|
| Rovnoběžnost se základnou B | 0,5 | Úspěšné | 0,93 | Nevyhovuje |
| Rozměr 15 mm | H16 | Pouze rozměr | Max 15,18 Min 15,05 | Vyhovuje |
| Souměrnost se základnami B a C | 0,8 | Úspěšné, ale nelze vyhodnotit | - | - |
| Rozměr 70 mm | + 0,5 0 | Úspěšné | Max 70,06 Min 69,71 | Nevyhovuje |
| Souměrnost se základnou B | 0,8 | Úspěšné, ale nelze vyhodnotit | - | - |
| Rovinnost | 0,4 | Úspěšné | 0,30 | Vyhovuje |
| Rozměr 53 mm | ± 0,3 | Úspěšné | Max 53,07 Min 52,81 | Vyhovuje |
| Průměr 47 mm | JS13 | Pouze rozměr | Max 47,02 Min 46,62 | Nevyhovuje |
| Kolmost osy k základně A | 0,35 | Úspěšné | 0,33 | Vyhovuje |
| Válcovitost | 0,3 | Úspěšné | 0,26 | Vyhovuje |
| Pole prvků děr s průměry 8 mm | H12 | Pouze rozměr | Max 8,38 Min 7,76 | Nevyhovuje |
| Tolerance polohy os děr k základnám B a D s posunutým tolerančním polem | 0,5 | Pouze hodnota tolerance | 0,40 | Nelze posoudit |
| Rozměr 40 mm | 0 - 0,5 | Přenesla se bodová vzdálenost 39,75 mm | 40,07 | Nelze posoudit |
| Rovnoběžnost k základně A | 0,5 | Úspěšné | 0,45 | Vyhovuje |
| Rozměr 105 mm | ± 0,4 | Přenesla se bodová vzdálenost 105 mm | 104,97 | Nelze posoudit |

Obě vytvořené PMI tolerance polohy byly naimportovány korektně společně s hodnotou tolerance, avšak nebylo možné je vyhodnotit. Příčinou bylo to, že GOM Inspect nevytvořil střední roviny symetrie kontrolovaných drážek, se kterými by porovnával roviny symetrie z MBD. V grafu na Obr. 4-5 vlevo je znázorněno, že celkově bylo úspěšně přeneseno 47 % všech vytvořených PMI dat (bez zahrnutí poznámek a drsností povrchů), 13 % bylo přeneseno úspěšně, ale software je nedokázal vyhodnotit a 40 % bylo přeneseno pouze částečně. Částečně přenesená data byla dále rozdělena podle dílčích důvodů vzniku chyby (Obr. 4-5 vpravo). Velkou část těchto částečně přenesených PMI dat by bylo možné jednoduše upravit na funkční pouhým výběrem toleranční třídy z nabídky. Obecně lze tvrdit, že nejúspěšnější

byl přenos PMI geometrických tolerancí, který byl bezchybný až na specifikaci posunutého tolerančního pole. Pokud by k takto významným ztrátám docházelo při aplikaci v průmyslu a bylo by potřeba chybějící údaje doplňovat manuálně, opět by byl do procesu zařazen lidský faktor, který by mohl způsobovat chybovost zadávání dat. Přestože nebylo dosaženo vysokého podílu přenesených dat, firmy, které byly například zmíněny v této práci a využívají MBD, musí mít podíl přenesených dat podstatně větší, aby využily potenciál časových úspor naplno.



Obr. 4-5 Procentuální přenesení PMI dat

Ačkoliv se 47% úspěšnost přenositelnosti může zdát nevelká, přibližuje se výsledkům diskutovaných v kapitole 3.6.4, kde autoři [24] dosáhli 50 %. Pro úspěšnější přenositelnost by mohlo být vhodnější vytvoření a použití MBD v CAD formátu, který je kompatibilní s programem GOM Inspect 2022, jako je například CATIA v5, CATIA v6, NX, Creo Parametric, Solidworks apod., aby se zamezilo případným ztrátám na přenosu mezi CAD formátem Inventoru a univerzálním formátem STEP AP242.

Při vyhodnocování přenositelnosti PMI byly sepsány následující dodatečné poznámky. Nevyhodnocení kontroly symetrie drážky vůči ose by mohlo činit problém zejména u standardních aplikací, jako je například symetrie drážek pro pera s osou hřídele. Absence konkrétního textu PMI poznámek by mohla způsobit nejasnosti v případě, že by text specifikoval nadstandardní způsob kontroly. Chybějící informace o hodnotě drsnosti povrchu mohou být v určitých případech potřebné z důvodu, že software umožňuje měřit odchylky naskenovaného povrchu od CAD modelu.

4.5 Syntéza řešerše MBD

MBD přináší značné časové úspory, zejména v oblasti kontroly, které ze zjištěných dat průměrně dosahují kolem 70 %, pokud je zaručena spolehlivá přenositelnost PMI dat, přičemž

největší dohledaná časová úspora byla 97 %. I přes to, že vytváření bezvýkresové dokumentace může trvat i o 15 % déle, než tvorba 2D technických výkresů, CAD softwary přicházejí s novými automatickými funkcemi vytváření PMI, kterými se doba tvorby podstatně zkracuje. Tématem budoucího vývoje by mohla být implementace digitálního vlákna, jehož nedílnou součástí je bezvýkresová dokumentace, ve větším množství strojírenských podniků. Získávání a využívání zpětné vazby pro okamžité úpravy CAD modelu může mít podstatný vliv na snížení počtu nevyhovujících výrobků ve výrobě. Nejpokročilejší technologie v tomto směru nabízí software Siemens NX, nebo softwary využívající formát QIF.

Vstříc jdou také normy popisující prvky kótování na technických výkresech, jako je například ISO 22081:2021, která snižuje potřebný počet kót na výkrese na pouze funkční rozměry [44]. Důvodem je fakt, že uživatel má možnost nefunkční rozměry získat z modelu. Tento způsob zjišťování informací může napomoci digitalizaci strojírenských podniků, které následně mohou snadněji směřovat k bezvýkresové dokumentaci. V květnu 2023 byla také přijata do ČSN norma ISO 16792, která popisuje postupy a požadavky pro definici digitálního produktu.

Šíření konceptu MBD s sebou přináší spoustu obav a nových výzev nejen pro strojní konstruktéry, kteří musí nad tvorbou dokumentace přemýšlet z hlediska navazujících operací. Jedna z obav zmíněných v kapitole 3.6.3 byla obava týkající se časové náročnosti vytváření MBD u již vytvořených dílů, jejichž součástí je technický výkres. Tuto tvorbu by mohla usnadnit existující funkce Convert to PMI od Siemens NX, nebo modul MBConnect pro CAD software PTC Creo od Capvidia, který dokáže automaticky převádět technické výkresy do podoby bezvýkresové dokumentace.

Důležitou součástí bezvýkresové dokumentace jsou poznámky, které však nejsou strojově čitelné. Tento problém se vyskytuje především u předepisování drsnosti povrchu v obecné poznámce MBD, ale i jiných typů poznámek, což může vést k chybovosti a k nepřehlednosti, především v případě vytváření různých druhů poznámek k různým operacím, nebo k interní a externí komunikaci. Částečně by tyto komplikace mohla napomoci vyřešit automatická klasifikace poznámek podle funkce, popsána v kapitole 3.9.2, která by umožnila vyselektovat a zobrazit výhradně poznámky týkající se jednotlivých účelů.

Ze zjišťovaných časových úspor kontroly pomocí PMI vyplývá, že tyto úspory dosahují vyšších desítek procent. Případové studie vykazující tato data berou v potaz při srovnávání ruční a automatické tvorby pouze čas potřebný pro nahrání bezvýkresové dokumentace do měřicího programu a její následnou úpravu. Přínosné by proto mohlo být časové srovnání ruční tvorby měřicího cyklu s tvorbou bezvýkresové dokumentace, která trvá zpravidla déle než výkresová, včetně jejího nahrání a úprav pro automatickou tvorbu cyklu, s cílem zjistit, zda ruční tvorba cyklu netrvá déle než tvorba bezvýkresové dokumentace. V kombinaci automatické tvorby MBD z výkresové dokumentace (programy umožňující tuto funkci byly zmíněny výše) s použitím automatické tvorby měřicího cyklu by mohlo být dokázáno, že i s dodanou 2D výkresovou dokumentací se dá celý proces kontroly plně automatizovat.

5 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla provedena rešerše především současné literatury pro využití bezvýkresové dokumentace ve strojírenství. Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou diskuzní část. Na začátku teoretické části byly popsány způsoby využití strojově čitelných PMI dat, které bezvýkresová dokumentace obsahuje, pro návrh, výrobu, měření a toleranční analýzu. Dále byly zmíněny postupy vytváření této dokumentace a nejčastější obavy, které s sebou přináší její zařazování do výroby. Pozitiva časových úspor, dosažených použitím bezvýkresové dokumentace především v oblasti kontroly, popsaná v případových studiích však tato rizika převážila.

Dále se rešerše zaměřila na rozdílnost přístupů tvorby bezvýkresové dokumentace vybraných CAD programů a možnosti přenosu a uchování těchto dat pomocí univerzálních CAD formátů podporujících PMI. Konec rešeršní části byl věnován oblastem aktuálního zaměření, především automatické tvorbě PMI z výkresové dokumentace a klasifikování poznámek podle jejich funkce. Informace získané z těchto kapitol představovali důležitou součást diskuze.

Na základě získaných poznatků se praktická část práce zabývala aplikací bezvýkresové dokumentace a zjištěním přenositelnosti jejích dat. Na testovací součást v podobě ložiskového stojanu byla aplikována bezvýkresová dokumentace, která je dostupná v příloze. Tento model byl následně vytisknut technologií FDM, nasnímán skenerem ATOS III Triple Scan a získaná síť byla importována společně s bezvýkresovou dokumentací ve formátu STEP AP242 do vyhodnocovacího softwaru GOM Inspect 2022. Úspěšně se povedlo přenést 60 % vytvořených PMI, z toho 17 % však nebylo možné vyhodnotit. Zbylé PMI se podařilo přenést pouze částečně, což bylo způsobeno převážně tím, že software GOM Inspect nedokázal importovat normalizované toleranční třídy. Ztráta těchto významných informací by při aplikaci v průmyslu mohla způsobovat chybovost právě kvůli potřebě zásahu lidského faktoru. Přestože v této práci nebylo dosaženo vysokého podílu přenesených dat, firmy, které byly například zmíněny v této práci a využívají MBD, musí mít podíl přenesených dat podstatně větší, aby využily potenciál časových úspor naplno.

Zbylá část diskuze byla věnována syntéze rešeršní části. Její součástí bylo nastínění možného řešení strojové nečitelnosti poznámek na výkrese pomocí způsobu jejich automatické klasifikace a také řešení jedné z částých obav z přijetí bezvýkresové dokumentace do strojírenského podniku. Byla zde také navržena možnost plně automatizovaného vytváření kontrolních procesů z již vytvořených technických výkresů s CAD modely.

V rámci práce byly splněny všechny dané cíle, a navíc byl představen možný nekonvenční přístup realizaci k případových studií pozitivních vlivů bezvýkresové dokumentace.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BOUCHER, Michelle. *The How-to Guide for Adopting Model Based Definition* [online]. Tech-Clarity, 2017 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.cati.com/wp-content/uploads/2022/01/how-to-guide-for-adopting-mbd.pdf>
- [2] KORTABERRIA, Gorra, Unai MUTILBA, Sergio GOMEZ a Brahim AHMED. Three-Dimensional Point Cloud Task-Specific Uncertainty Assessment Based on ISO 15530-3 and ISO 15530-4 Technical Specifications and Model-Based Definition Strategy. *Metrology*. 2022, **2**(4), 394-413. ISSN 2673-8244. Dostupné z: doi:10.3390/metrology2040024
- [3] PRICE, Andrew. Virtual Product Development - Case study of the T-45 horizontal stabilator. In: *39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit*. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998. Dostupné z: doi:10.2514/6.1998-2065
- [4] HEDBERG, Thomas, Joshua LUBELL, Lyle FISCHER, Larry MAGGIANO a Allison BARNARD FEENEY. Testing the Digital Thread in Support of Model-Based Manufacturing and Inspection. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2016, **16**(2). ISSN 1530-9827. Dostupné z: doi:10.1115/1.4032697
- [5] RUEMLER, Shawn, Kyle ZIMMERMAN, Nathan HARTMAN, Thomas HEDBERG a Allison BARNARD FEENEY. Promoting Model-Based Definition to Establish a Complete Product Definition. *Volume 2: Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing*. American Society of Mechanical Engineers, 2016. ISBN 978-0-7918-4990-3. Dostupné z: doi:10.1115/MSEC2016-8702
- [6] QUINTANA, Virgilio, Louis RIVEST, Robert PELLERIN, Frédérick VENNE a Fawzi KHEDDOUCI. Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. *Computers in Industry*. 2010, **61**(5), 497-508. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/j.compind.2010.01.005
- [7] MILLER, Alexander, Nathan HARTMAN, Thomas HEDBERG, Allison BARNARD FEENEY a Jesse ZAHNER. Towards Identifying the Elements of a Minimum Information Model for Use in a Model-Based Definition. *Volume 3: Manufacturing Equipment and Systems*. American Society of Mechanical Engineers, 2017. ISBN 978-0-7918-5074-9. Dostupné z: doi:10.1115/MSEC2017-2979

- [8] GEDDES, Duncan. *The history of computer-aided design and computer-aided manufacturing (CAD/CAM)* [online]. 2020 [cit. 2022-12-23]. Dostupné z: <https://technicalfoamservices.co.uk/blog/blog-history-of-cad-cam/>
- [9] PETR, Karel. *Strojírenské konstruování: tvorba výkresové dokumentace dle ISO norem*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Česká technika-nakladatelství ČVUT, 2020, 173 stran : ilustrace. ISBN 978-80-01-06715-4.
- [10] LIU, Fang a Li QIAO. Product Information Modeling and Organization with MBD. *Applied Mechanics and Materials*. 2012, **163**, 221-225. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.163.221
- [11] AGOVIC, A., T. TRAUTNER a F. BLEICHER. Digital Transformation - Implementation of Drawingless Manufacturing: A Case Study. *Procedia CIRP*. 2022, **107**, 1479-1484. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2022.05.178
- [12] ASME Y14.41:2003. *Digital Product Definition Data Practices*. New York, USA: The American society of Mechanical Engineers, 2003.
- [13] NECHVÁTAL, Filip. Bezvýkresová dokumentace – nastupující realita. *CAD.cz* [online]. 2013 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/pdmpm/86-pdmpm/4632-bezvykresova-dokumentace-nastupujici-realita.html>
- [14] LIPMAN, Robert a Joshua LUBELL. Conformance checking of PMI representation in CAD model STEP data exchange files. *Computer-Aided Design*. 2015, **66**, 14-23. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2015.04.002
- [15] Overview of STEP AP 242 functionalities for CAD 3D Geometry, assembly and PMI interoperability. In: *STEP AP242 Project* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: http://www.ap242.org/image/image_gallery?uuid=dd13d0a8-0f5a-4491-84a7-6ee98481cb1d&groupId=52520&t=1369125424196
- [16] CHENEY, Douglas a Bryan FISCHER. Measuring the PMI Modeling Capability in CAD Systems: Report 1 - Combined Test Case Verification. *NIST GCR 15-997*. National Institute of Standards and Technology, 2015. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.GCR.15-997
- [17] NGUYEN, Jimmy. *MBD (Model-Based Definition): 2023 Edition* [online]. 2023 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.capvidia.com/blog/mbd-model-based-definition-guide>
- [18] BIJNENS, John a David CHESHIRE. The current state of model based definition. *Computer-aided design and applications*. 2019, **16**(2), 308-317. ISSN 1686-4360. Dostupné z: doi:10.14733/cadaps.2019.308-317

- [19] A Guide to AS9102 First Article Inspection. *NTS-UNITEK* [online]. 2022 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.nts-unitek.com/blog/as9102-first-article-inspection-guide/>
- [20] HAGHIGHI, Payam, Satchit RAMNATH, Aniket CHITALE, Joseph DAVIDSON a Jami SHAH. Automated Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies from a CAD Model with PMI. *Computer-Aided Design and Applications*. 2019, **17**(2), 249-273. Dostupné z: doi:10.14733/cadaps.2020.249-273
- [21] EZtol 2.1 by Sigmatrix Now Supports Ability to Read PMI for SOLIDWORKS CAD Models. In: *Sigmatrix* [online]. McKinney [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.sigmatrix.com/press-releases-and-news-2-2/eztol-2-1-by-sigmatrixnow-supports-ability-to-read-pmi-for-solidworks-cad-models/>
- [22] HAIGHT, Brent. New ASME standard for CAD. *Automotive Industries*. 2003, **183**(10), 42.
- [23] ISO 16792:2021. *Technical product documentation — Digital product definition data practices*. 3. the International Organization for Standardization, 2021.
- [24] PARUSZEWSKI, Piotr, Piotr LIS a Łukasz LIPIŃSKI. Model based enterprise (MBE) in prototype compressor project for new turboprop engine. *AIP Conference Proceedings 2078*. 2019. Dostupné z: doi:10.1063/1.5092045
- [25] NIELSEN, Mark, Bryan BERGSMA a Daniel CAMPBELL. *CMM Automation from MBD: A case study of optimized Model Based Inspection* [online]. In: . 2018 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://1url.cz/IuLTs>
- [26] CAMPBELL, Daniel, Tyler VIZEK a Igor BESIC. *Extending the Model-Based Definition through MFIN: Automated Inspection Demo* [online]. In: . 2019 [cit. 2023-04-27].
- [27] COOPER, Kendred a Mark DOOLEY. Inventor Model Based Definition. In: *Youtube* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://youtu.be/-jnFRUNlvEw>
- [28] WINGRAVE, Dave. CES: NX Model Based Definition (MBD) Overview. In: *Youtube* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://youtu.be/tmiJwGY7Njc>
- [29] AMES, Jacob. SOLIDWORKS MBD, DimXpert, and MBD Dimensions - What's the Difference?. In: *Youtube* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://youtu.be/PpyhPV3mHyI>
- [30] BRUNSMANN, Jörg, Wolfgang WILKES, Gunter SCHLAGETER a Matthias HEMMJE. State-of-the-art of long-term preservation in product lifecycle

- management. *International Journal on Digital Libraries*. 2012, **12**(1), 27-39. ISSN 1432-5012. Dostupné z: doi:10.1007/s00799-012-0081-4
- [31] NGUYEN, Jimmy. *Best STEP File to Use: AP203, AP214, and AP242* [online]. In: . 2021 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.capvidia.com/blog/best-step-file-to-use-ap203-vs-ap214-vs-ap242>
- [32] *STEP AP242 Project* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <http://www.ap242.org/>
- [33] A GUIDE TO 3D PDF. In: *Theorem Solutions* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.theorem.com/guide/publish>
- [34] WU, Oboe. Getting Started with 3D PDFs. *Engineers Rule* [online]. 2016 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.engineersrule.com/getting-started-3d-pdfs/>
- [35] WU, Oboe. How to Consume the PMI in a 3D PDF. *Engineers Rule* [online]. 2016 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.engineersrule.com/consume-pmi-3d-pdf/>
- [36] ISO 14306:2017. *Industrial Automation Systems And Integration - JT File Format Specification For 3D Visualization*. 2. Švicarsko: International Organization for Standardization, 2017.
- [37] *Quality Information Framework (QIF)* [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://qifstandards.org/>
- [38] DMSC - QUALITY INFORMATION FRAMEWORK. *QIF 101 Tutorial: Understanding the Basics* [online]. In: . [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://youtu.be/3vsDCKxfIZg>
- [39] MBDCConnect for Creo: Native CAD plug-in for exporting 3D CAD Neutral File Formats (QIF and STEP AP242). In: *Capvidia* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.capvidia.com/products/mbd-connect-for-creo>
- [40] COMPANY, Pedro, Jorge CAMBA, Stanislao PATALANO, Ferdinando VITOLO a Antonio LANZOTTI. A Functional Classification of Text Annotations for Engineering Design. *Computer-Aided Design*. 2023, **158**. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2023.103486
- [41] ADERIANI, Abolfazl, Kristina WÄRMEFJORD a Rikard SÖDERBERG. Model-based definition in computer aided tolerance analyses. *Procedia CIRP*. 2022, **114**, 112-116. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2022.10.016
- [42] NGUYEN, Jimmy. IMTS 2022 Workflow with QIF MBD. In: *Capvidia* [online]. 2022 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.capvidia.com/blog/imts-2022-workflow-qif-mbd>

- [43] *ATOS Triple Scan* [online]. In: . 2017 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_Brochure_ATOS_TripleScan_CZ_nahled.pdf
- [44] PETR, Karel. *ISO 22081:2021: Obecné specifikace*. (2023, 11. duben). Přednáška. VUT, Brno, Česká republika.
- [45] REKTOŘÍK, Luděk. Digitální vlákno – propojte lidi, procesy a výrobky. In: *Portál profesionálů STROJIRENSTVI.CZ* [online]. 2021 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/digitalni-vlakno-propojte-lidi-procesy-a-vyrobky>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

| | |
|-------|---|
| 2D | Dvourozměrný |
| 3D | Trojrozměrný |
| ANSI | American National Standards Institute (Americký národní standardizační institut) |
| AP | Application Protocol (Aplikační protokol) |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers (Americká společnost strojních inženýrů) |
| B-rep | Boundary representation (Zobrazování hranic) |
| CAD | Computer Aided Design (Počítačem podporované navrhování) |
| CAE | Computer Aided Engineering (Počítačem podporované inženýrství) |
| CAM | Computer Aided Manufacturing (Počítačem řízená výroba) |
| CMM | Coordinate Measuring Machine (Souřadnicový měřicí stroj) |
| CAI | Computer Aided Inspection (Počítačem podporovaná kontrola) |
| CTF | Constraint Tolerance Feature |
| FBM | Feature Based Machining (Obrábění na základě konstrukčních prvků) |
| FDM | Fused deposition modeling (Modelování metodou tavené depozice) |
| GD&T | Geometric dimensioning and tolerancing (ISO kótování a tolerance) |
| ISO | International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci) |
| JT | Jupiter Tessellation |
| MBD | Model Based Definition (Definování pomocí modelu) |
| NIST | National Institute of Standards and Technology (Národní institut standardů a technologie) |
| NURBS | Non-uniform rational basis spline (Neuniformní racionální B-splajn křivky) |
| PDF | Portable Document Format (Přenosný formát dokumentů) |
| PETG | Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate |
| PMI | Product and Manufacturing Information (Informace o výrobě a výrobku) |
| PRC | Product Representation Compact (Kompaktní zobrazování produktu) |
| QIF | Quality Information Framework (Rámec informací o kvalitě) |
| STEP | Standard for the Exchange of Product Data (Norma pro výměnu dat o produktu) |
| XML | Extensible Markup Language (rozšiřitelný značkovací jazyk) |

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

| | | |
|-----------|--|----|
| Obr. 3-1 | Vývoj tvorby projektové dokumentace; (a) dříve; (b) současnost; (c) blízká budoucnost | 16 |
| Obr. 3-2 | Schéma vytváření MBD a standardní výkresové dokumentace | 17 |
| Obr. 3-3 | PMI data; (a) grafická; (b) sémantická; upraveno dle [15]..... | 18 |
| Obr. 3-4 | EZtol 2.1 analyzační software využívající PMI pro 1D analýzy [21] | 22 |
| Obr. 3-5 | Základna a geometrická tolerance rovinnosti definovaná pro část plochy [12] | 23 |
| Obr. 3-6 | Fáze vývoje produktu, upraveno dle [6] | 24 |
| Obr. 3-7 | Graf nejčastějších obav z přijetí MBD do výroby, upraveno dle [5] | 26 |
| Obr. 3-8 | Testovací model případové studie, upraveno dle [25] | 27 |
| Obr. 3-9 | Funkce 3D PDF; (a) zvýraznit přiřazené základny; (b) zvýraznit přiřazené PMI; upraveno dle [35]..... | 30 |
| Obr. 3-10 | QIF použití v digitálním vláknu, upraveno dle [38] | 31 |
| Obr. 3-11 | Ukázka formulací vět popisujících funkci produktu [40]..... | 32 |
| Obr. 3-12 | Výstřižek ze softwaru MBDVidia zobrazující výsledky vizuální kontroly, upraveno dle [42] | 34 |
| Obr. 4-1 | MBD vytvořené v programu Inventor 2023 | 35 |
| Obr. 4-2 | (a) Ložiskový stojan připravený ke skenování; (b) měření přístrojem ATOS III | 37 |
| Obr. 4-3 | Naskenovaný povrch ložiskového stojanu; (a) neupravený; (b) upravený .. | 37 |
| Obr. 4-4 | Výsledky měření ložiskového stojanu v programu GOM Inspect | 38 |
| Obr. 4-5 | Procentuální přenesení PMI dat | 40 |

9 SEZNAM TABULEK

| | | |
|----------|---|----|
| Tab. 3-1 | Klasifikace poznámek MBD, upraveno dle [40]..... | 33 |
| Tab. 4-1 | Vyhodnocení přenositelnosti PMI dat do programu GOM Inspect | 39 |

10 SEZNAM PŘÍLOH

P1 Digitální data Bezvýkresová dokumentace ve formátu STEP AP242