



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

METODIKA TVORBY VIRTUÁLNÍHO DVOJČETE DYNAMICKÉ SOUSTAVY

METHODS FOR DESIGN OF VIRTUAL TWIN OF A DYNAMIC SYSTEM

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Filip Kšica

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2022

ABSTRAKT

V posledním desetiletí začaly digitální dvojčata a kyber-fyzikální systémy pronikat z teoretické roviny do širokého spektra průmyslových aplikací, avšak velmi rozpolcené a nejednotné chápání jejich podstaty výrazně komplikuje proces tvorby univerzální metodiky pro jejich realizaci. Mezi hlavní cíle této práce patří systémová studie těchto pojmů a jejich hlavních součástí a následné navržení metodiky pro jejich realizaci v kontextu průmyslových aplikací souvisejících s aktuálně řešenými projekty. Klíčovou roli hraje vymezení role výpočtového modelování a metod redukce při realizaci digitální části dvojčete, a to nejen vlastních fyzických soustav, ale i senzorických systémů tvořících jádro kyber-fyzikálních systémů, které jsou nedílnou součástí interaktivních vazeb mezi dílčími částmi digitálních dvojčat. Tyto systémy jsou v poslední části práce představeny v kontextu obráběcího průmyslu, letectví a železniční dopravy, přičemž slouží nejen jako nástroje pro přímé vyhodnocení provozního stavu, ale také jako zdroj dat pro navazující pokročilé algoritmy monitorování stavu konstrukcí a prediktivní údržby.

KLÍČOVÁ SLOVA

Digitální dvojče, kyber-fyzikální systém, výpočtové modelování, redukce dynamických systémů, modální syntéza, senzorické systémy, monitorování provozních vlastností

ABSTRACT

Over the last decade, digital twins and cyber-physical systems have been slowly developed from mere theoretical concepts to potent industrial applications in a large spectrum of areas, however, ambiguous understanding of the fundamentals significantly complicates the process of finding a general methodology necessary for their successful implementation. Therefore, one of the main goals of this thesis is a systematic study of these concepts and their main parts, followed by formulating a methodology that could lead to successful and effective industrial applications in the context of current projects. The key part in this effort falls to computational modelling and dynamic reduction of complex mechanical systems that comprise the digital part of a digital twin, including but not limited to the main structure but also sensing systems. These sensing systems serve as cyber-physical systems that fulfill the role of interactive links between the individual parts of a digital twin and are introduced in the last part of this thesis in the context of manufacturing industry, airspace, and railway industry, where they are used not only for condition and operational monitoring, but also provide large amount of accurate real-time data for structure health monitoring and predictive maintenance purposes.

KEYWORDS

Digital twin, cyber-physical systems, computational modelling, dynamic system reduction, component mode synthesis, sensing systems, condition monitoring

Bibliografická citace této práce:

KŠICA, Filip. *Metodika tvorby virtuálního dvojčete dynamické soustavy*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/146628>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma „Metodika tvorby digitálního dvojčete dynamické soustavy“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 30.12.2022

.....

Ing. Filip Kšica

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za jeho trpělivost a rady při vedení po celou dobu mého studia.

Dále bych pak rád poděkoval své rodině a všem blízkým, kteří mi byli vždy po boku a jejichž motivace mě doprovázela až ke zdárnému konci doktorského studia.

V Brně dne 30.12.2022

.....

Ing. Filip Kšica

OBSAH

OBSAH.....	7
1. ÚVOD.....	9
2. MOTIVACE.....	10
3. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	11
3.1 Koncept digitálního dvojčete	12
3.2 Definice digitálního dvojčete	19
3.3 Služby poskytované digitálními dvojčaty	20
3.4 Využití digitálních dvojčat	21
3.5 Kyber-fyzikální systém.....	24
3.6 Nástroje pro tvorbu, správu a využití DT a CPS.....	26
4. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	30
5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS	31
5.1 Hardware a software použitý k výpočtům a simulacím	33
5.2 Výpočtové modelování vertikální frézky.....	33
5.2.1 Formulace problému.....	34
5.2.2 Cíle řešení.....	35
5.2.3 Teorie stability řezného procesu.....	36
5.2.4 Postup tvorby výpočtového modelu.....	38
5.2.5 MKP model.....	40
5.2.6 Redukce stupňů volnosti	41
5.2.7 Modální analýza	43
5.2.8 Stavový model.....	45
5.2.9 Zhodnocení efektivity redukce.....	46
5.2.10 Experimentální určení tlumení frézky	47
5.2.11 Stabilita řezného procesu.....	50
5.3 Real-time monitorování vibrací frézky.....	53
5.3.1 Sensorika pro vertikální frézku.....	53
5.3.2 Realizace CPS.....	53
5.4 Konfrontace poznatků.....	58
6. CPS PRO LETECTVÍ	59
6.1 Problematika SHM leteckých konstrukcí	59
6.2 Sensory používané pro SHM	61

6.2.1	Akustická emise.....	61
6.2.2	Ultrasonic Guided Waves.....	61
6.2.3	Optická vlákna.....	62
6.2.4	Piezokompozitní senzory přetvoření.....	63
6.3	Rozmístění senzorů.....	63
6.4	Výpočtové modelování leteckých konstrukcí.....	64
6.4.1	Modely vazeb.....	64
6.4.2	Konstitutivní modely materiálů.....	65
6.5	Realizace CPS.....	66
6.5.1	Lokalizace míst pro senzory.....	67
6.5.2	Instalace MFC a letová zkouška.....	70
6.6	Konfrontace poznatků.....	71
7.	MODELOVÁNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH VRSTEV.....	73
7.1	Začlenění MFC do výpočtových modelů.....	73
7.2	Fyzikální interpretace odezvy MFC.....	74
8.	CPS PRO MONITOROVÁNÍ ŽELEZNIC.....	76
8.1	První realizace CPS.....	76
8.2	IoT řešení monitorovacího systému.....	78
8.3	Zhodnocení přínosu pro železniční dopravu.....	83
9.	PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	86
9.1	VĚDECKÝ.....	86
9.2	PRAKTICKÝ.....	87
9.3	PEDAGOGICKÝ.....	87
10.	ZÁVĚR.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	89
	SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ.....	98
	SEZNAM PATENTŮ.....	100
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	101
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	103
	SEZNAM TABULEK.....	106

1. ÚVOD

Moderní technické soustavy zaznamenávají již od minulého století stále zvyšující se nároky na jejich přesnost a spolehlivost při souběžném snižování nákladů potřebných na jejich návrh, provoz a údržbu. Během posledních desetiletí pronikla problematika mechatronických soustav do velké řady průmyslových odvětví, přičemž v současné době převládá při jejich návrhu přístup založený na digitálním modelování, při kterém je zařízení reálného světa nahrazeno jeho digitálním modelem, který by v ideálním případě měl zahrnovat všechny podstatné aspekty této reálné soustavy. V případě mechatronických soustav jde o velmi komplexní proces vyžadující multioborový přístup, ve kterém jsou propojeny dílčí modely jednotlivých částí systému do jednoho funkčního celku. Při simulaci dynamických dějů je nutné brát ohledy na jejich výpočetní náročnost a z tohoto důvodu jsou dílčí modely často zjednodušovány do podoby, která umožňuje provést jinak časově velmi náročné a často nerealizovatelné výpočty a simulace. Případy, kdy byly zaznamenány nežádoucí nebo neočekávané projevy, byly zpravidla řešeny pomocí zásahů do reálného zařízení, v současnosti je však snahou tyto stavy předvídat v rámci prediktivní údržby a učinit opatření, pokud možno, před tím, než nastanou na reálném zařízení. Digitální modelování se stalo nástrojem, který do značné míry nahradil dnes již poměrně neefektivní a zastaralé přístupy vyžadující fyzické prototypy a rozsáhlé experimenty. V minulosti bylo téměř nemyslitelné, že by reálné objekty mohly být kompletně převedeny do digitální podoby obsahující všechny jejich podstatné vlastnosti, avšak vývoj výpočetních nástrojů tuto situaci výrazně změnil a dal podnět ke zrodu éry digitálních dvojčat.

Dosud používané metody a přístupy digitálního modelování jsou často vyvíjeny v izolaci a zatím není formulován jednotný postup jejich kombinace v jeden interaktivní celek. U technických soustav zpravidla využíváme MKP modelů geometrie a topologie, ve kterých však díky komplexnosti soustavy není možné postihnout všechny detaily reálné struktury, a role experimentu ve výpočtovém modelování zůstává stále významná. Vezměme si příklad letecké konstrukce, která obsahuje stovky až tisíce dílů a desítky tisíc spojovacích součástí. Chceme-li být schopni s dostatečnou přesností simulovat chování této konstrukce za letu, bylo by potřebné do výpočtového modelu zahrnout všechny tyto díly s ohledem na výrobní nepřesnosti, detaily v okolí vazeb a spojů, tlumení atd. což je samo o sobě velmi komplikované, protože tyto parametry jsou v podstatě neznámé a odvíjí se od kvality výroby. V těchto případech je však vhodné využít experimentu a na základě měření a analýz těchto dat je ve vhodné podobě implementovat do výpočtového modelu.

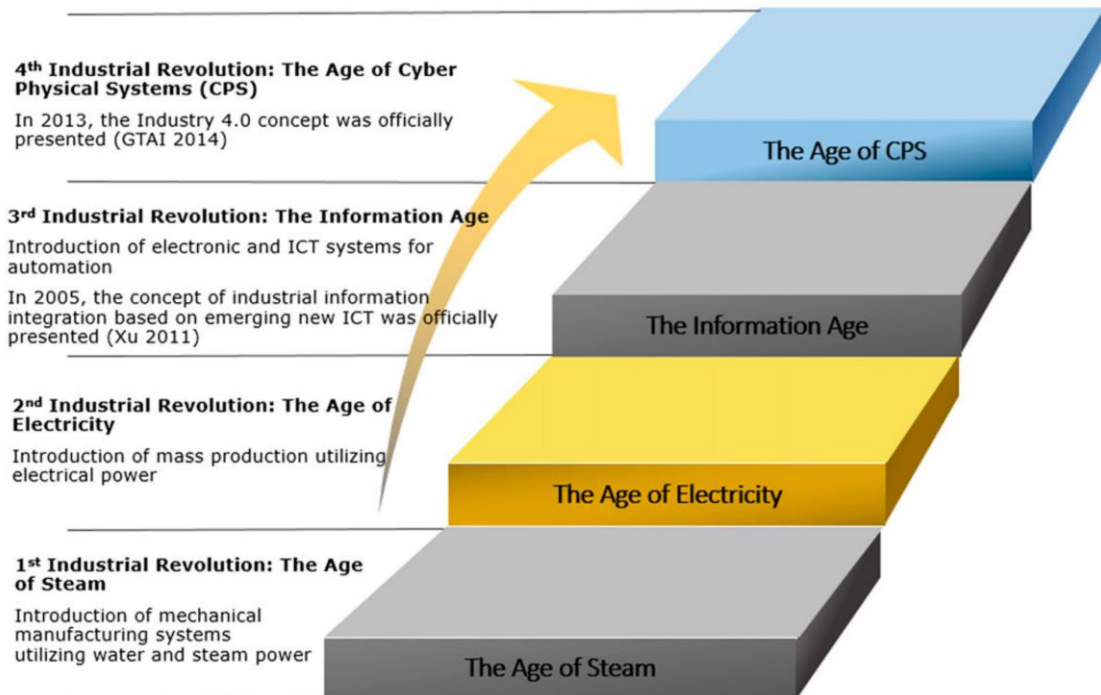
V kontextu Industry 4.0 se mechatronický systém schopný poskytovat digitální data nazývá kyber-fyzikální systém, který je propojen skrze internet věcí s digitálními obrazy fyzických systémů. Snahou je tento proces automatizovat a výpočtový model aktualizovat v reálném čase, což vyžaduje rozsáhlé senzorické sítě schopné generovat potřebná data, a zároveň metody zpracování těchto dat pro převod do formy implementovatelné do digitálního modelu. Přestože začala být problematika digitálních dvojčat zájmovou oblastí v mnoha průmyslových aplikacích, jejich chápání a přínos se velmi liší a stále neexistují jednotné praktické přístupy pro jejich realizaci.

2. MOTIVACE

Hlavní motivací této práce je provést detailní studii vývoje a aktuálního chápání pojmů digitální dvojče a kyber-fyzikální systém v aktuálních trendech moderního průmyslu, a navrhnout jednotnou metodiku pro jejich tvorbu v oblasti dynamických soustav. V kontextu aktuálně řešených projektů na pracovišti je pozornost věnována dvěma zájmovým oblastem, první se týká vymezení role výpočtového modelování při tvorbě digitálního obrazu komplexních dynamických soustav, a protože se zpravidla jedná o multioborový problém vyžadující kombinaci mnoha aktuálně dostupných výpočetních nástrojů, dosud neexistuje jednotný postup při jejich realizaci. I v dnešní době výkonných zařízení je limitujícím faktorem náročnost simulací dynamických dějů probíhajících na komplexních soustavách, což stojí v cestě při realizaci digitálních obrazů schopných poskytovat data ze simulací dostatečně rychle vzhledem k potřebám návrhu a následného provozu. Druhá oblast se týká problematiky vlastní realizace digitálních dvojčat, jejichž hlavní myšlenka spočívá v interaktivním propojení reálného a digitálního světa pro účely návrhu, optimalizace, monitoringu a vizualizace těchto zařízení. K tomu jsou využívány kyber-fyzikální systémy, které mohou v reálném čase poskytovat dostatečně přesná digitální data obsahující užitečné informace o entitě, a jejich integrace do Internetu věcí pomocí cloudových aplikací a služeb. Kombinací obou těchto oblastí lze zajistit odhalení možných nedostatků, defektů či poruch systému buď již v předvýrobní fázi produktu nebo v rané fázi jeho provozu a zajistit tak snížení času odstávek kvůli údržbě, snížení rizika vzniku kritických poruch a monitorovat dlouhodobé změny systému způsobené degradačními procesy.

3. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Čtvrtá průmyslová revoluce s sebou přinesla novou vlnu myšlení při konceptualizaci, návrhu, výroby, testování a optimalizaci výrobků a produktů, přičemž jednou z hlavních oblastí zájmu se stala především digitalizace výrobních procesů [1–3].



Obrázek 1: Sled průmyslových revolucí (převzato z [4])

Významnou roli v Průmyslu 4.0 hrají tzv. kyber-fyzikální systémy¹ (dále jako CPS) [5] a digitální dvojčata² (dále jako DT), které jsou založeny na úzkém propojení digitálního a fyzického světa pomocí vazeb, které slučují oba světy v jeden interaktivní celek uzpůsobený k návrhu, monitorování, diagnostice a predikci chování daného zařízení s minimální intervencí člověka. Interakce mezi fyzickým a digitálním světem zajišťuje, že projevy reálného zařízení jsou v reálném čase používány k validaci a případně aktualizaci digitálního modelu, zatímco simulace projevů digitálního modelu slouží k predikci chování reálného zařízení a realizaci zásahů nutných k zajištění bezproblémového provozu. Správná funkce DT je podmíněna zajištěním přísunu zpravidla velkého množství dostatečně přesných dat z fyzického systému a věrohodností reprezentace jeho digitálního obrazu. Jednotlivé systémy jsou propojeny do jednoho systémového celku, tzv. Internet of Things (IoT) [6] – [7], přičemž se v obecnější rovině entity splňující předpoklady vymezené v rámci Industry 4.0 většinou nazývají *smart* (smart factory, smart products, smart cities aj.).

Se vznikem nových metod a přístupů pro práci s DT úzce souvisí i vznik nových pojmů a definic, z nichž význam některých není i přes jejich značné využívání a publikovanost

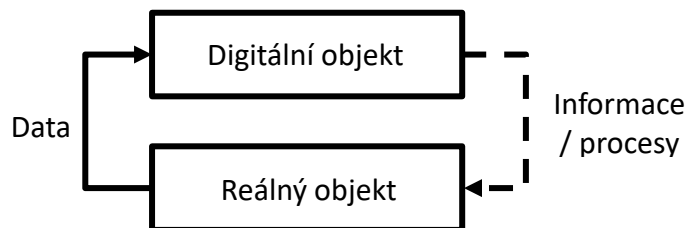
¹ Cyber-physical systems.

² Digital twins.

zcela sjednocený, a to především kvůli jejich aplikaci v širokých, často pouze okrajově spolu souvisejících oblastech. Jedním z těchto pojmů je vlastní digitální dvojčete, které se často spojuje či zaměňuje s celou řadou podobných pojmů³, jejichž význam se však vzhledem ke aplikační oblasti, ve které se objevují, značně liší. V kontextu této práce nebudou všechny tyto pojmy definovány a pozornost bude zaměřena na vlastní chápání digitálního dvojčete a jeho realizace v kontextu dynamických soustav. Obvyklé chápání DT je zpravidla založeno na myšlence, že se jedná o počítačové programy, které využívají reálná data pro potřeby simulací chování a predikci vlastností během provozu dané entity, ať už jde o vlastní procesy, dílčí zařízení, výrobní linky či celé organizace. Jeho význam je však obecně mnohem komplexnější a za posledních 5-7 let jeho chápání prošlo značnou transformací, proto je vhodné nahlédnout na historický vývoj v různých oblastech, ve kterém se objevoval.

3.1 Koncept digitálního dvojčete

První myšlenku digitálního dvojčete formuloval v roce 2002 Michael Grieves na univerzitě v Michiganu v rámci nově navrženého přístupu k managementu životního cyklu produktu [8], popisovaného jako jednoduchý systém skládající se ze tří prvků: reálného objektu, digitálního objektu a interaktivní vazby mezi nimi. Tuto vazbu rozdělil na dvě části: tok dat z reálného do digitálního objektu, což se dá chápat jako měření veličin pomocí fyzických senzorů na reálném objektu, a tok informací a procesů z digitálního objektu do reálného (viz Obrázek 2).

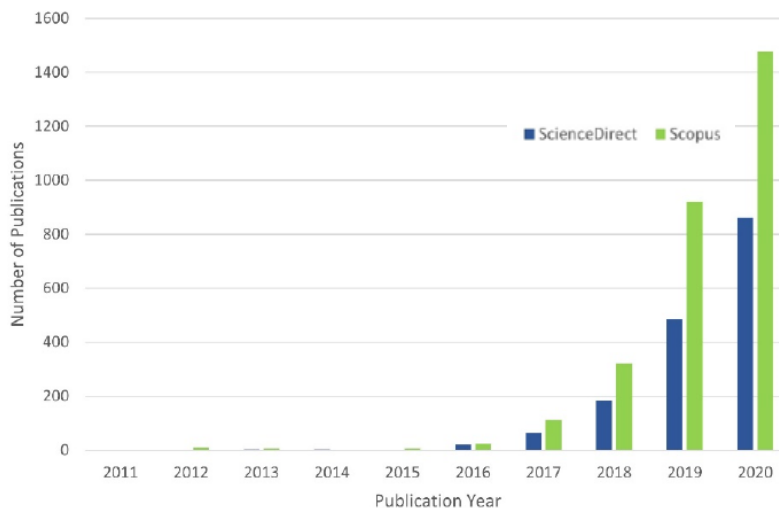


Obrázek 2: Schematické znázornění Grievesova konceptu digitálního dvojčete

Přestože byl Grievesův koncept zcela obecný a jeho novost spočívala v zahrnutí interaktivní vazby mezi reálným a digitálním objektem umožňující tok informací pro jejich komunikaci a aktualizaci, jeho potenciál byl v té době značně podceněn. Tento abstraktní koncept neměl ještě po několik let jednotný název, a první formální definici tohoto konceptu chápaného jako digitální dvojčete formulovala až v roce 2010 NASA v [9] jako: „*Integrovaná multifyzikální, vícestupňová a pravděpodobnostní simulace vozidlového systému, která využívá nejlepších dostupných fyzikálních modelů, aktualizovaných senzorických dat, historii provozu aj. s cílem zrcadlit stav jeho odpovídajícího létajícího dvojčete.*“

³ Například virtual twin, digital couple, digital clone, virtual mirror, virtual model, digital thread, digital shadow, product avatar aj.

Velký nárůst zájmu o DT lze pozorovat právě až po roce 2010, kdy tomuto konceptu byla dána specifická definice, a i přestože byl prvotně konceptualizován pouze pro potřeby letectví, začal nacházet uplatnění v širokém spektru průmyslových a inženýrských oblastí. Tento nově vznikající trend zapříčinil exponenciální nárůst publikací obsahujících pojem *digital twin* v letech 2011 až 2020, kdy v této relativně krátké době postupně narostl z řádu jednotek publikací až do řádu tisíců [10], přičemž hlavní zlom nastal okolo roku 2015 (viz Obrázek 3).



Obrázek 3: Vývoj množství publikací zaměřených na digitální dvojče (převzato z [21])

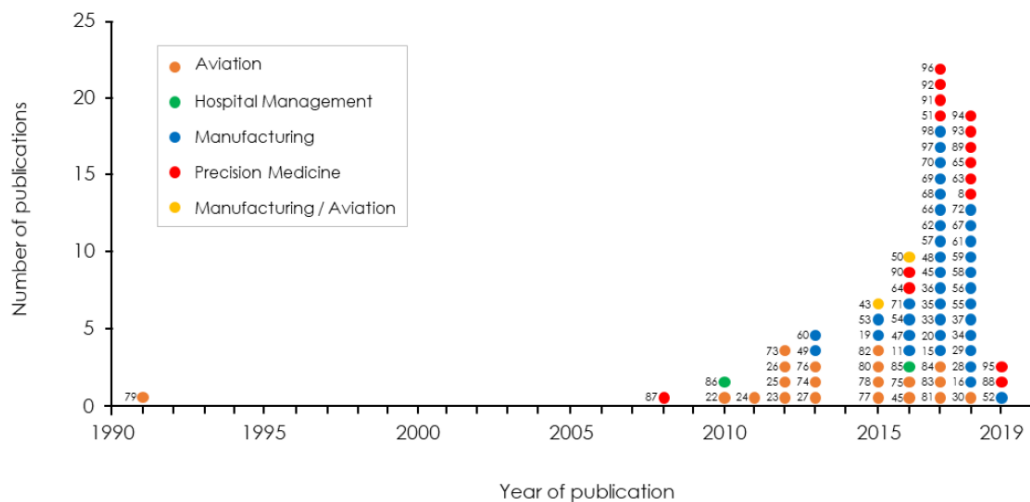
Každá nová aplikace a publikace s sebou bohužel přinesla i nový způsob chápání a interpretace konceptu digitálního dvojčete, a díky tomu je nyní velmi obtížné najít či formulovat jednotnou, obecně platnou definici digitálního dvojčete⁴. Je nutné si uvědomit, že popis a využití DT jsou velmi úzce spjaty s kontextem, ve kterém je uplatňován, a proto se mnozí v posledních letech věnovali přehledovým studiím definic DT, ve kterých autoři vkládají důraz nejen na jejich chronologický vývoj, ale právě i na kategorizaci vzhledem ke kontextu, ve kterém se objevují. Jednou z těchto publikací je například [8] z roku 2019, kde autoři provedli velmi rozsáhlou studii, ve které si dali za cíl nalézt odpověď na tři základní otázky spjaté s DT:

1. Jaké jsou aktuálně publikované definice digitálního dvojčete?
2. Jaké jsou hlavní charakteristiky digitálního dvojčete?
3. Jaké jsou hlavní zájmové oblasti, ve kterých se digitální dvojče využívá?

Na základě zhruba stovky relevantních publikací identifikovali několik desítek různých definic, přičemž závěrem jejich studie bylo, že za digitální dvojče jsou v literatuře zpravidla považovány digitální obrazy chytrých či inteligentních systémů. Jako chytré či inteligentní systémy jsou pak považovány ty fyzické objekty, které vykazují schopnosti inteligentního chování. Jakou nedílnou součástí DT charakterizovali především jejich propojení se svým okolím umožňující nepřetržitý tok informací. Jejich studie dále odhalila hlavní zájmové oblasti s ohledem na množství publikací, kterými byly (pořadí dle zastoupení): výrobní průmysl, letectví a zdravotnictví (viz Obrázek 4). Pro každou

⁴ Pokud vůbec existuje.

z těchto skupin autoři rovněž uvádí desítky konkrétních konceptů a aplikací, ve kterých lze DT produktivním způsobem využít.



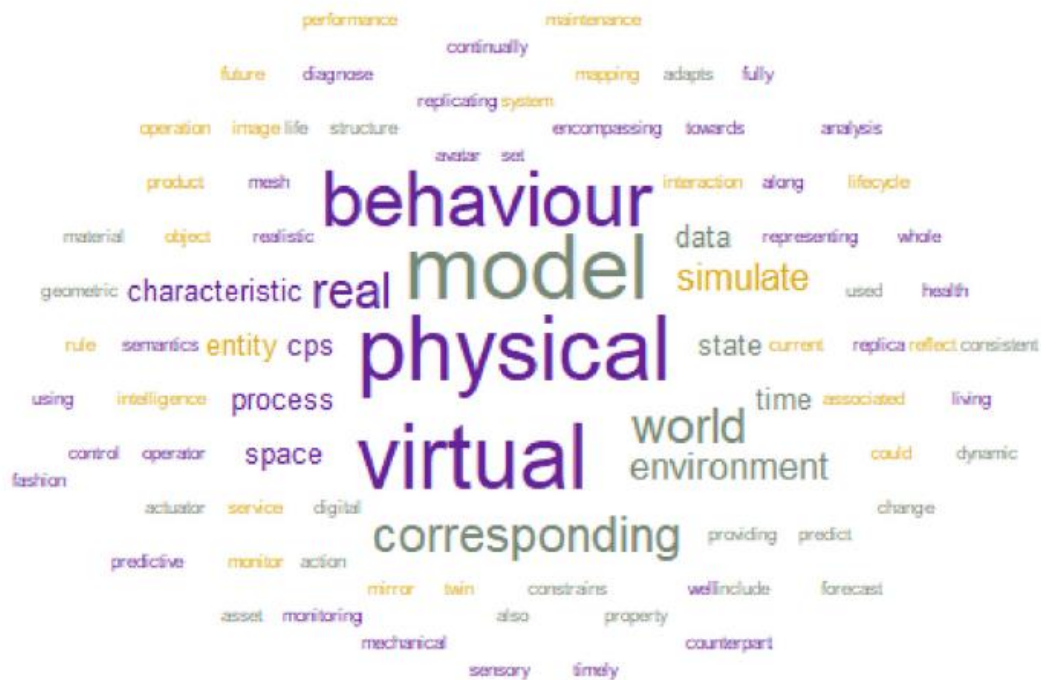
Obrázek 4: Časový vývoj publikovanosti konceptu digitálního dvojčete s ohledem na zájmovou oblast (převzato z [8])

Samotná identifikace zájmových oblastí však není dostatečná pro formulování jednotné definice DT a možnosti jejich uplatnění v praxi. Jak bylo zmíněno dříve, pojem digitální dvojče má zpravidla celou řadu synonym, a množina s ním souvisejících pojmů je mnohem rozsáhlejší. Studii výskytu pojmu DT v kontextu dalších, již zavedených konceptů, provedli v roce 2020 autoři [11], kteří na základě sofistikovaných *text mining*⁵ analýz na několika stovkách publikací identifikovali 30 různých definic virtuálního dvojčete, které hierarchicky rozřadili do pěti hlavních kategorií (clusterů) C1-C5, kde

- C1 obsahuje originální definici DT a bere ohled na propojení fyzické a virtuální entity v celém životním cyklu produktu
- C2 klade důraz na real-time propojení fyzické a virtuální entity a zakládá se na tzv. Cyber-Physical Systems (CPS)
- C3 zohledňuje využití real-time vazeb pro realizaci uzavřených smyček, které slouží k aktualizaci, řízení a optimalizaci funkce jednotlivých systémů
- C4 se zaměřuje na způsoby modelování fyzických entit
- C5 se zaměřuje na sběr a využití dat, dále pak na formulaci služeb, které digitální dvojče může poskytovat

V každé z těchto oblastí byly dále identifikovány množiny souvisejících klíčových slov, se kterými byly zmínky DT ve zkoumaných publikacích nejčastěji uvedeny. Tyto množiny pak dávají do souvislosti koncepty a pojmy, které se při aplikacích DT v daném zájmovém clusteru objevují. Obrázek 5 například vyobrazuje množinu klíčových slov spjatých s C4, kde si můžeme mimo základních pojmů jako *model*, *physical* a *virtual* dále všimnout například *CPS* či *sensors*.

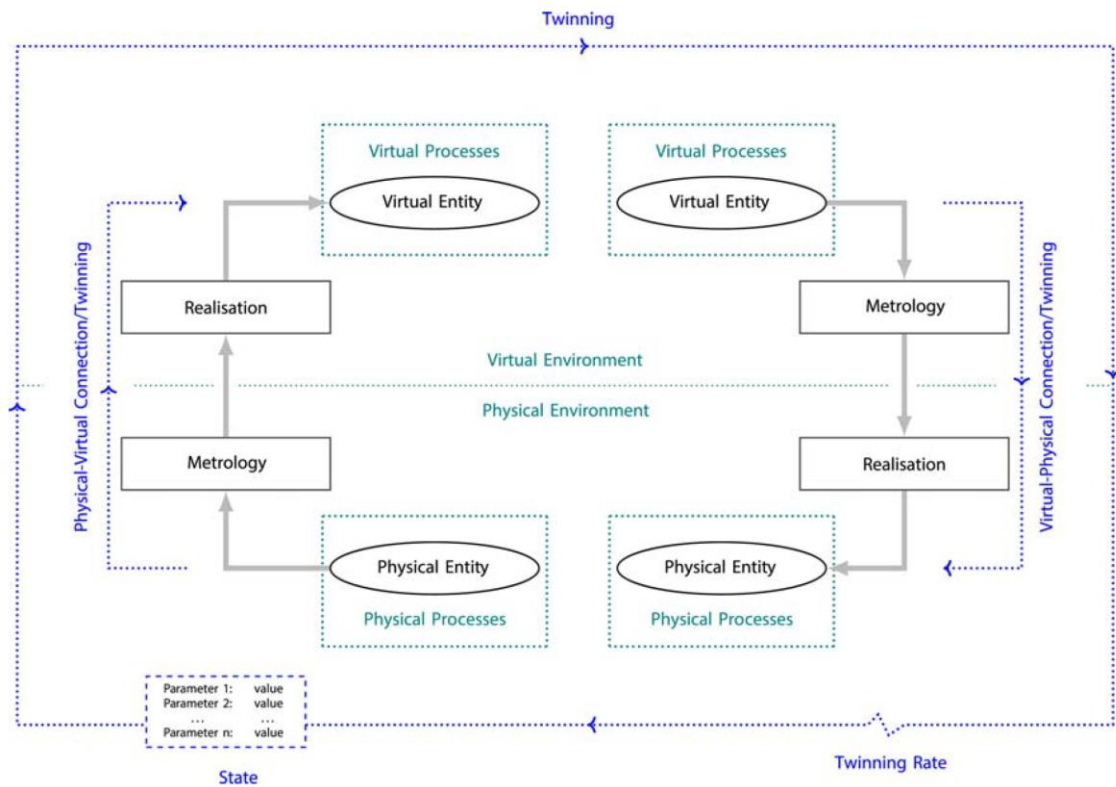
⁵ Automatizované získávání informací, klíčových slov či souvislostí z textu.



Obrázek 5: Shluková analýza klíčových slov souvisejících se souborem definic C4, velikost textu odpovídá četnosti výskytu (převzato z [11])

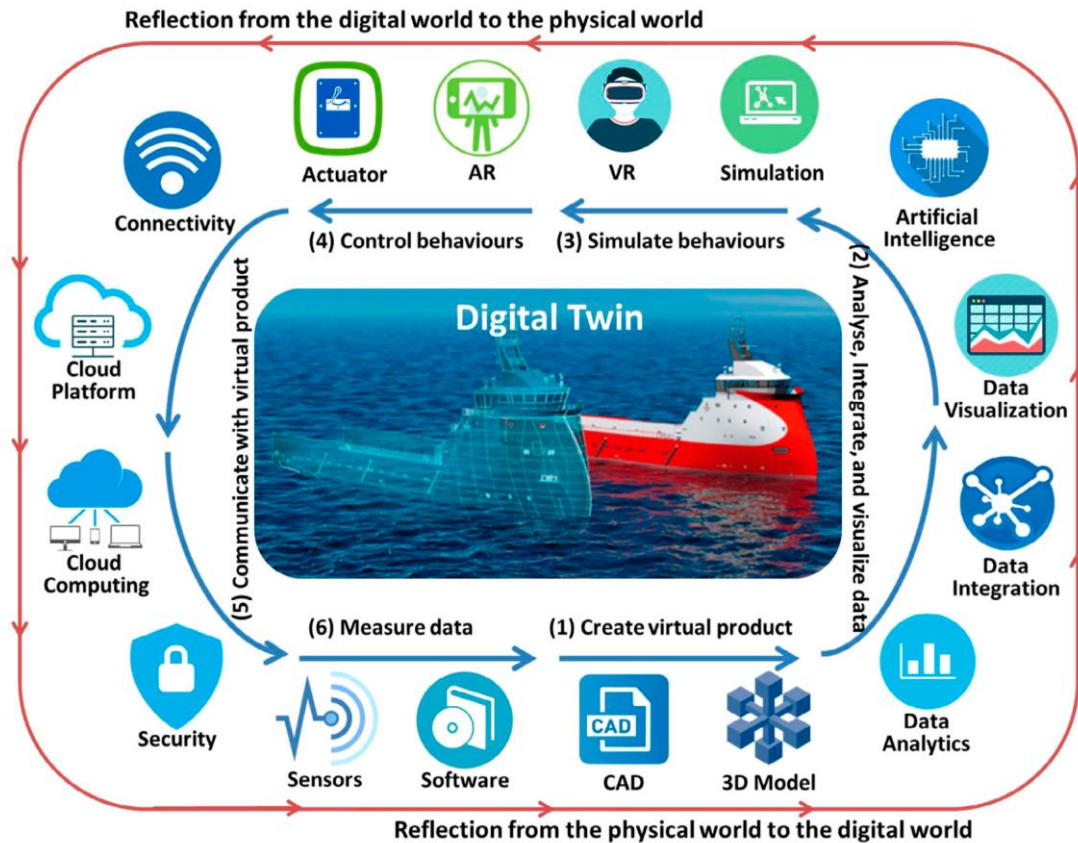
Podobné studii se věnovali autoři [12], kteří v roce 2020 provedli na základě vzorku zhruba stovky publikací systematickou a strukturovanou studii vývoje charakterizace digitálního dvojčete, na základě které vymezili desítky souvisejících pojmů a konceptů vzniklých v souvislosti s digitálním dvojčetem. Jejich cílem bylo sestavit jednotné schéma konceptu digitálního dvojčete s důrazem na vazby mezi fyzickým a digitálním objektem (, které by bylo univerzálně platné pro většinu užívaných definic DT. V mnohém se závěry autorů prolínají s těmi formulovanými autory [11], avšak jejich publikace obsahuje rozbor možných realizací charakteristických vazeb mezi fyzickými a digitálními entitami, jež vzhledem k jejich komplexitě schematicky vizualizují (viz Obrázek 6). Realizace vazeb a přenosu informací, tzv. dvojčatění⁶, je poté ilustrováno na rozšířeném schématu konceptu DT, a formulují význam experimentů a simulací při jejich realizaci.

⁶ Anglicky twinning.



Obrázek 6: Schéma vazeb mezi fyzickým a digitálním objektem (převzato z [12])

Ve velkém množství zdrojů, které na digitální dvojče nahlíží buď okrajově nebo koncepčně, se můžeme setkat s obdobnými schémata popisující podstatu digitálního dvojčete jako uzavřenou smyčku řady služeb, metod a postupů, z nichž se jednotlivé nachází buď na reálné nebo digitální platformě (viz Obrázek 7, nahoře digitální prostředí, dole fyzické prostředí). Tyto smyčky pak obsahují více či méně prvků, z nich však mnoho může představovat koncepční kroky, které u řady produktů (a s ohledem na vlastní chápání toho, co to digitální dvojče je) nemá smysl vůbec uvažovat. Například u DT strojní součásti není smysluplné uvažovat nadřazené služby, např. distribuční modely. Je nutné vzít v potaz, že tyto grafické reprezentace podstaty DT jsou často určeny pro marketingové potřeby a nemusí reflektovat skutečnou formu a podstatu konkrétního DT, protože obsahují právě tyto hierarchicky nadřazené služby, které na zvolené úrovni DT není možné uvažovat či realizovat.

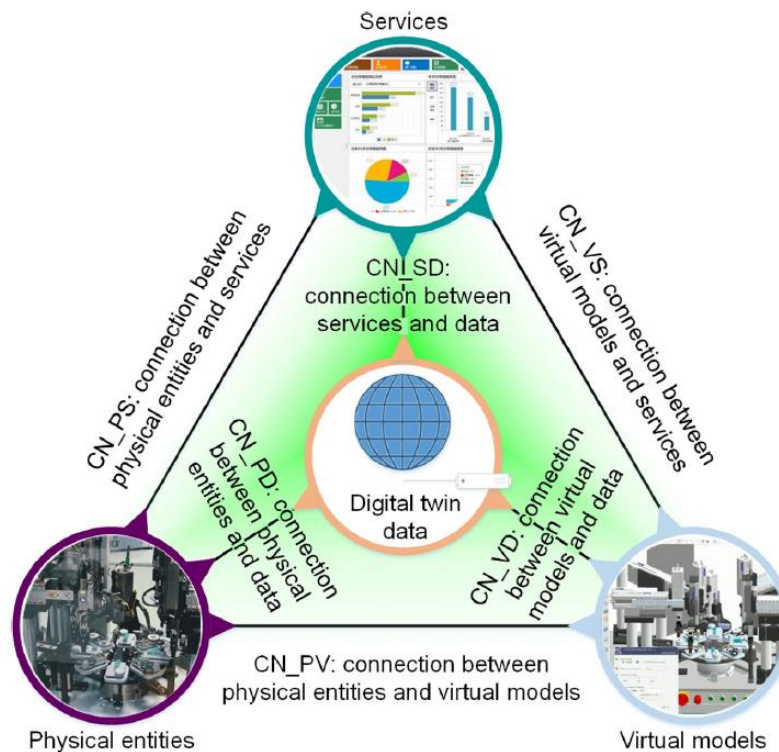


Obrázek 7: Technologie digitálního dvojčete (převzato z [13])

Grievesem formulovaná základní architektura DT o třech dimenzích sice tvoří jádro novějších popisů, avšak je nedostatečná pro koncepční zavedení významu jednotlivých služeb a jejich vazeb na digitální a fyzické entity. Tento problém se pokusili vyřešit autoři [14], kteří v roce 2019 definovali rozšířený obecnější model o pěti dimenzích formulovaný jako

$$M_{DT} = (PE, VM, Ss, DD, CN) \quad (3.1)$$

kde M_{DT} je model digitálního dvojčete, PE (physical entities) představuje fyzické entity, VM (virtual models) jsou digitální modely, Ss (services) zahrnuje služby, DD (data) představuje tok dat, a CN (connections) jsou vazby mezi jednotlivými prvky. Obrázek 8 znázorňuje schematickou interpretaci jejich konceptu.



Obrázek 8: Digitální dvojče o pěti dimenzích (převzato z [15])

Hlavním rozdílem je zavedení samostatné entity služeb, která umožňuje začlenění pouze těch vybraných služeb, které dávají smysl vzhledem k úrovni DT, přičemž přenos informací zajišťují samostatné entity datových toků a vazeb. V tomto pojetí představují fyzické entity všechny prvky fyzického světa využité ve digitálním dvojčeti, tj. zařízení a produkty, procesy na nich probíhající, zapojené organizace a ostatní subjekty, a obecně lze tyto fyzické entity kategorizovat do jedné ze tří úrovní: jednotky, systémy, a systémy systémů⁷ [15]. Digitální modely zahrnují veškeré digitální reprezentace geometrie, vazeb, okolí, vlastností a projevů dílčích fyzických entit, přičemž charakter a komplexita těchto modelů se odvíjí od požadované funkce digitálního dvojčete. Data využívaná ve digitálním dvojčeti lze získat z každé z jeho částí, především pak fyzické a digitální. Data pocházející z fyzických entit představují výstupy ze senzorů a výsledky měření, která nesou informaci o aktuálním provozním stavu. Data generovaná z digitálních modelů jsou převážně výsledky simulací a výstupy navazujících algoritmů, např. SHM⁸ nebo PM⁹. Data mohou být sbírána i ze služeb, případně mohou představovat znalostní bázi zapojených osob. Vazby u digitálních dvojčat slouží k zajištění komunikace a přenosu informací mezi službami, fyzickými, digitálními a datovými entitami.

⁷ V kontextu systémového inženýrství se jedná o tzv. Systems of systems (SoS), což jsou z hlediska distribuovaných síťových systémů právě CPS.

⁸ Structure Health Monitoring.

⁹ Predictive Maintenance.

3.2 Definice digitálního dvojčete

Pro vymezení a pochopení toho, co digitální dvojče má nebo nemá splňovat, je nutné nahlédnout na některé z obecně přijatých definic. Konkrétní formulace aktuálně přijatých definic uvedli například autoři [16], kdy ve své studii zohledňovali to, jak se chronologicky objevovaly v publikacích Z jejich celého seznamu bych zde uvedl bych zde pouze několik z nich (v přeložené formě):

Tabulka 1: Výběr charakteristických definic pojmu digitální dvojče (přeloženo z [16])

#	Rok	Definice
1	2010	Integrovaná multifyzikální, vícestupňová a pravděpodobnostní simulace vozidlového systému, která využívá nejlepších dostupných fyzikálních modelů, aktualizovaných sensorických dat, historii provozu aj. s cílem zrcadlit stav jeho fyzického dvojčete letounu.
2	2013	Spojený model reálného stroje, který je provozován na cloudové platformě a simuluje stav na základě integrovaných znalostí jak z datově řízených analytických algoritmů, tak dalších dostupných fyzikálních znalostí.
3	2015	Velmi realistický model aktuálního stavu procesu a jeho chování v interakci s reálným okolním prostředím.
4	2015	Digitální protějšek fyzického produktu.
5	2016	Digitální náhrada reálného objektu sestávající se z jeho digitální reprezentace a schopnosti komunikace, tvořící chytrý objekt jako inteligentní prvek Internetu věcí ¹⁰ a služeb.
6	2016	Simulace fyzického objektu s cílem predikovat jeho budoucí chování.
7	2016	Jednotný model systému, který dokáže koordinovat architekturu, mechanické, elektrické, softwarové, verifikační a další oborově specifické modely v celém životním cyklu, a který sdružuje modely sestavené na různých platformách a konfigurací-řízených úložištích.
8	2016	Integrovaná multifyzikální, vícestupňová a pravděpodobnostní simulace systému ve skutečném provedení realizovaném technologií Digitálního vlákna ¹¹ , která využívá nejlepších dostupných modelů, informací ze senzorů a vstupních dat s cílem zrcadlit a předvídat stav/výkon po dobu životnosti jeho odpovídajícího fyzického dvojčete.
9	2016	Digitální reprezentace reálného objektu v kontextu CPS.

Přestože poslední z definic je datována na rok 2016, novější publikace se zpravidla opírají o tyto souhrnné zdroje nebo v nich odkazované starší zdroje, a novější, výrazně se odlišující definice, se již po tomto roce v podstatě neobjevují. První z uvedených definic je originální definice od NASA, která byla původně určena v konceptu vývoje nové generace letounů, definice 8 je pak jejím přímým zobecněním pro potřeby širšího spektra průmyslových aplikací. Jak je vidět např. u definice 4, za digitální dvojče lze v mnohých oblastech považovat jakýkoli digitální obraz fyzického produktu bez toho, aniž by byly jakkoli specifikovány požadavky na parametry či komplexitu tohoto obrazu. Definice 5 v sobě zahrnuje požadavek na interakci s prostředím, komplexitu modelu však vymezuje

¹⁰ Internet of Things (IoT).

¹¹ Digital Thread, koncept DT využívaný k popisu životního cyklu produktů.

pouze vágním termínem „velmi realistický¹²“. Definice 7 je velmi blízká obecně přijatému multidisciplinárnímu (mechatronickému) přístupu při modelování soustav. V definici 6 se poprvé objevuje požadavek na schopnost predikovat budoucí chování objektu, což je něco, co spadá do oblasti SHM a PM. V definici 5 můžeme vidět návaznost na problematiku IoT (Internet of Things), což je další z klíčových konceptů Průmyslu 4.0. Poslední z frekventovaně se vyskytujících pojmů, který stojí za zmínku, je tzv. Kyberfyzikální systém v definici 9. Jak znázorňuje Obrázek 1, CPS je možné považovat za jeden ze základních stavebních bloků nových metodik Průmyslu 4.0, a tvoří nedílnou součást digitálních dvojčat fyzických systémů.

Závěrem lze říci, že pohled na digitální dvojče lze rozdělit na dva přístupy, kdy první jej chápe pouze jako digitální obraz reálné entity, zatímco druhý k tomu navíc vyžaduje interaktivní vazbu mezi reálnou a digitální entitou. Taktéž je nutné zohlednit, že většina interpretací DT uvažuje nejvyšší možnou proveditelnou fidelitu¹³ bez ohledu na požadavky definované pro konkrétní aplikaci, na což poukazují i autoři [17].

3.3 Služby poskytované digitálními dvojčaty

Služby tvoří nedílnou součást digitálních dvojčat a zahrnují nejen veškeré aplikační výstupy pro uživatele, tj. výstupy simulací, monitorování, optimalizace, diagnostiky, SHM a PM, ale i služby třetích stran využívané při sestavení a provozu digitálního dvojčete včetně softwarových služeb využitých při modelování, sběru, vyhodnocení a ukládání dat. V dnešní době digitalizace je velký zájem o tyto služby, a díky tomu je velmi vysoká nabídka centralizovaných řešení na bázi cloud computingu¹⁴ a vzdáleného přístupu. Řešení se přesouvají z lokálních zařízení na centralizované nebo cloudové platformy, díky čemu se koncept Vše jako Služba¹⁵ stal trendem a distribuce služeb již zahrnuje nejen software, ale i hardware, případně kombinaci obojího. Pro potřeby pochopení dílčích kategorií služeb lze služby obsažené v XaaS lze rozdělit do několika základních skupin:

- **Software** (Software as a Service, SaaS) – přístup k aplikacím bez nutnosti kupovat aplikaci samotnou (např. Google Apps, Office 365)
- **Platforma** (Platform as a Service, PaaS) – zázemí pro tvorbu a šíření aplikací a služeb na internetu (např. Apache Stratos, Amazon Web Services)
- **Infrastruktura** (Infrastructure as a Service, IaaS) – veškerá infrastruktura zahrnující servery, firewally, síťové prvky, datová úložiště atd. (např. Azure, Google Computing Engine)
- **Hardware** (Hardware as a Service, HaaS) – instalace a pronájem hardware, distribuční model podobný IaaS
- **Zálohování** (Backup as a Service, BaaS) – zálohování a obnova dat, přičemž záloha je vedena na straně poskytovatele, nikoli lokálně
- **Monitoring** (Monitoring as a Service, MaaS) – online monitoring a vyhodnocení dat ze sítí, serverů nebo systémů (např. Google App Engine).

¹² V původním znění skutečně jako „very realistic“.

¹³ Můžeme chápat jako stupeň provázání či výstižnost, ne nutně přesnost.

¹⁴ Specializované internetové služby dostupné odkudkoli skrze klientské aplikace.

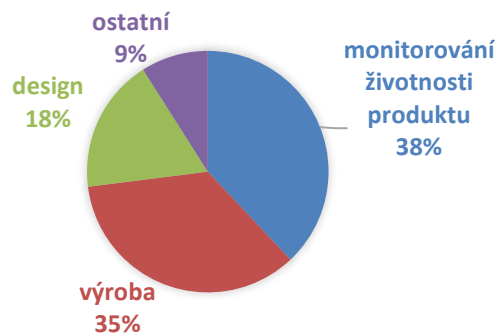
¹⁵ Everything as a Service (XaaS).

- **Komunikace** (Communication as a Service, CaaS) – aplikace pro vzdálenou komunikaci a videohovory (např. technologie Instant Messaging, Voice over Internet Protocol)

Hlavní výhodou XaaS je snížení požadavků na lokální infrastrukturu, snížení pořizovacích a provozních nákladů na software a hardware, dále pak zajištění dynamického přizpůsobení a automatické aktualizace cloudových služeb.

3.4 Využití digitálních dvojčat

Jednou z prvních motivací k tvorbě a využití DT byla implementace virtuální reality (VR) v kontextu nových technologií Průmyslu 4.0, čemuž se věnovala publikace [V15]. S rozvojem výpočetních nástrojů vzrostla nejen úroveň interaktivity mezi digitální a fyzickou rovinou, ale i věrnost digitálních obrazů fyzických entit a jejich aktualizace v reálném čase. Nyní DT nachází uplatnění v širokém spektru průmyslových aplikací. Na základě publikace autorů [18], kteří se ve své studii zaměřili na zhodnocení publikací, patentů a aktuálně využívaných praktik významných průmyslových společností, lze zhodnotit zastoupení DT v jednotlivých fázích životního cyklu produktu (viz Obrázek 9). Lze si všimnout, že zhruba třetina všech aplikací DT se odehrává ve výrobní fázi životního cyklu, třetina v provozní fázi pro monitorování životnosti produktu a poslední třetina ve fázi návrhu a ostatních fázích životního cyklu.



Obrázek 9: Využití digitálního dvojčete v průběhu životního cyklu produktu

V oblasti návrhu hraje digitální dvojče významnou roli, protože umožňuje provést kompletní konceptualizaci, design a testování finálního produktu bez nutnosti tvorby fyzických prototypů, které proces vývoje značně zpomalují. Veškeré změny v návrhových parametrech mohou být zohledněny přímo v digitálním prostředí, a kvalita a funkčnost produktu mohou být zhodnoceny ve velmi raných fázích vývojového cyklu. Přestože přístup založený na digitálním modelování¹⁶ je přijatým standardem již po mnohem delší dobu, než je existence konceptu digitálních dvojčat, v některých aspektech jsou velmi podobné a v mnohém se prolínají. Hlavním rozdílem je interaktivita mezi jednotlivými dílčími částmi (ať už jedno- nebo více-oborovými) a jejich vazba na výrobu a provoz výsledného produktu. V oblasti výroby nachází digitální dvojčata uplatnění ve všech vrstvách výrobního procesu, od vlastního výrobku, přes výrobní procesy až po

¹⁶ Digitální modelování představuje pouze jednu z částí metodiky model-based design.

komplexní výrobní linky. Zde je již nutné rozlišovat komplexitu digitálního dvojčete, protože od ní se odvíjí jeho způsob realizace a funkcionalita.

Zastoupením DT v jednotlivých průmyslových odvětvích se zabývali autoři [19], kteří na základě své studie specifikovali pět hlavních oblastí, ve kterých DT nachází využití. Těmi jsou zdravotnictví, transportní průmysl, výrobní průmysl, letecký průmysl a civilní inženýrství. Autoři [20] pak blíže specifikovali některé dílčí problémy v těchto jednotlivých oblastech:

- Transportní a automobilový průmysl: optimalizace výroby, zakázková výroba, prediktivní údržba, zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti atd.
- Výrobní průmysl: návrh a testování nových produktů, optimalizace výrobních operací, prediktivní údržba a plánování údržbových zásahů, návrh chytrých továren, minimalizace energetických požadavků, recyklace odpadních produktů atd.
- Letecký průmysl: zvyšování spolehlivosti, prediktivní údržba, zrcadlení provozních podmínek pro účely predikce možných stavů, návrh a optimalizace strukturních částí atd.

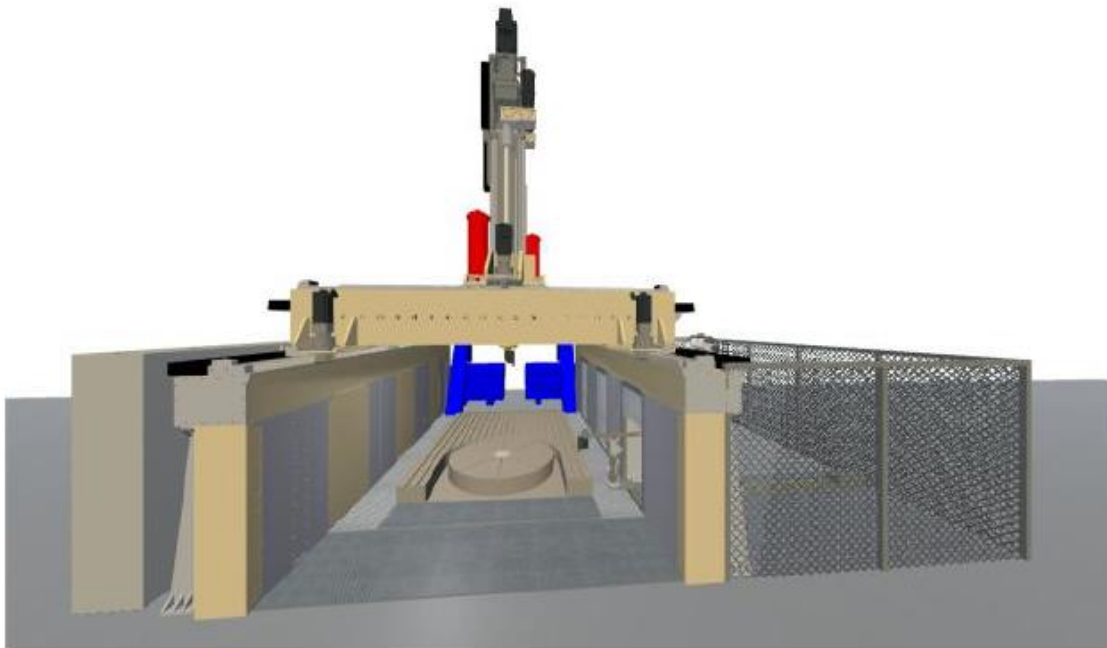
Konkrétním aplikacím se věnovali autoři [21], kteří ve své studii na konkrétních příkladech demonstrovali možnosti využití DT. Autoři [22] ve své souhrnné studii rovněž uvádí řadu příkladů využití DT v oblastech robotiky, leteckého a výrobního průmyslu. S ohledem na vývoj a aplikace v těchto průmyslových oblastech lze identifikovat řadu velkých společností, které se aktivně věnují digitálním dvojčatům, například GE Predix [23], Siemens [24]–[25], ABB [26], Microsoft Azure, IBM Watson, Dassault [27], Oracle Cloud, Aveva aj.

V akademickém prostředí na FSI VUT se digitálním dvojčatům věnuje například výzkumný tým z ÚAI, který vytvořil DT robotické buňky v prostředí Unity3D [28] (viz Obrázek 10).



Obrázek 10: Digitální dvojčte robotické buňky (převzato z [28])

Dalším příkladem je využití metodiky digitálního dvojčete pro sestavení digitálního obrazu obráběcího centra ve virtuální realitě [29] (viz Obrázek 11) a pro digitalizaci výrobních buněk v obráběcím průmyslu [30].



Obrázek 11: Multifunkční obráběcí centrum ve virtuální realitě (převzato z [29])

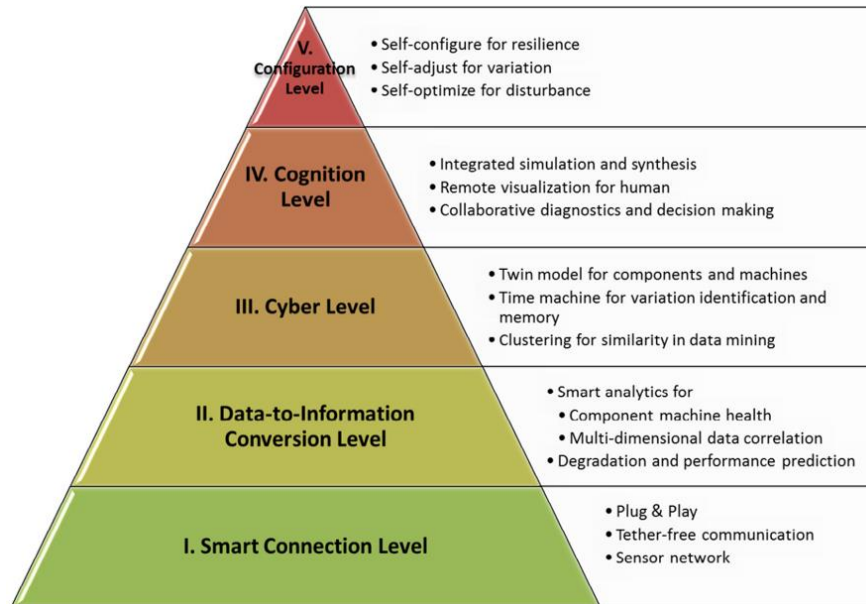
3.5 Kyber-fyzikální systém

Vznik pojmu kyber-fyzikální systém (CPS) lze datovat na rok 2006, kdy byla v Texase pořádán NSF Workshop on Cyber-Physical Systems [31], která přinesla novou vlnu myšlení při návrhu nové generace mechatronických systémů. V dnešní době tvoří jeden ze základních stavebních bloků v konceptu DT a lze je považovat za dílčí embedded¹⁷ mechatronické systémy, avšak s hlubší provázaností fyzických a softwarových prvků a s inherentní možností interaktivního propojení s ostatními entitami v systému. Zatímco fyzický svět obsahuje všechna zařízení, která chceme monitorovat či řídit, softwarová vrstva v kyberprostoru zajišťuje správu dat a jejich vyhodnocení v rámci požadovaných analýz či rozhodovacích procesů. V kontextu digitálních dvojčat lze za CPS považovat (i s ohledem na některé z definic DT v kapitole 3.2) digitální reprezentaci fyzické entity v kyberprostoru. CPS se skládá ze dvou hlavních částí. První z nich je schopnost zajišťovat sběr dat z fyzické entity v reálném čase a jejich vyhodnocení v rámci zpětné vazby zpět z kyberprostoru do fyzického světa. Druhou je pak správa dat a realizace potřebných analýz a výpočtů, které tvoří vlastní kyberprostor. CPS lze tedy charakterizovat jako systém senzorů (případně akčních členů), přičemž vazba mezi fyzickým světem a kyberprostorem je realizovaná pomocí toku digitálních dat získaných digitalizací signálů poskytovaných těmito analogovými senzory. Na základě rozhodovacích algoritmů je pak možné aktivovat aktuátory a akční členy v rámci zpětné vazby do fyzického světa.

Aby bylo možné CPS realizovat v kontextu potřebných aplikací, Lee et. al. v roce 2014 ve své publikaci [32] navrhl 5C architekturu, která sestává sekvenční postup při návrhu a

¹⁷ V překladu vestavěné systémy, embedded systémy jsou počítačové systémy plnící specifické funkce uvnitř větších elektromechanických celků.

tvorbě CPS. Jím navržená architektura byla míněna především pro aplikace ve výrobním průmyslu, lze ji však považovat za dostatečně univerzální i pro širší spektrum aplikací. Název 5C se odvíjí od označení jednotlivých vrstev (v angličtině), jmenovitě connection, conversion, cyber, cognition a configuration (viz Obrázek 12).



Obrázek 12: 5C architektura CPS (převzato z [32])

- Vrstva připojení (connection) zajišťuje sběr dat z fyzického světa a jejich přenos do kyberprostoru. Může se jednat o fyzikální data ze snímačů (mechanické vibrace, teplota, elektrické veličiny, aj.), vizuální data z kamer, provozní data z interních řídicích systémů zařízení či jinak získaná metadata o fyzické entitě a na ní probíhajících procesech.
- Vrstva konverzní (conversion) zajišťuje zpracování dat a jejich transformaci v užitečné informace z hlediska provozu, integrující metody pro monitorování konstrukcí¹⁸, prediktivní údržby¹⁹ či diagnostiky²⁰.
- Vrstva kyberprostoru (cyber) obsahuje výpočtové modely fyzické entity, modely sestavené na základě identifikace dynamických systémů či metody pro hlubší analýzu získaných dat z fyzické entity. Tato vrstva tvoří centrální uzel v této architektuře, a jsou do ní koncentrována data ze všech připojených zařízení.
- Vrstva kognitivní (cognition) slouží k prezentaci a vizualizaci dat a poznatků koncovému uživateli nutných pro realizaci informovaných zásahů do systému.
- Vrstva konfigurační (configuration) slouží k zajištění zpětných vazeb z kyberprostoru do fyzického světa v rámci řízených samočinných konfiguračních a adaptačních procesů.

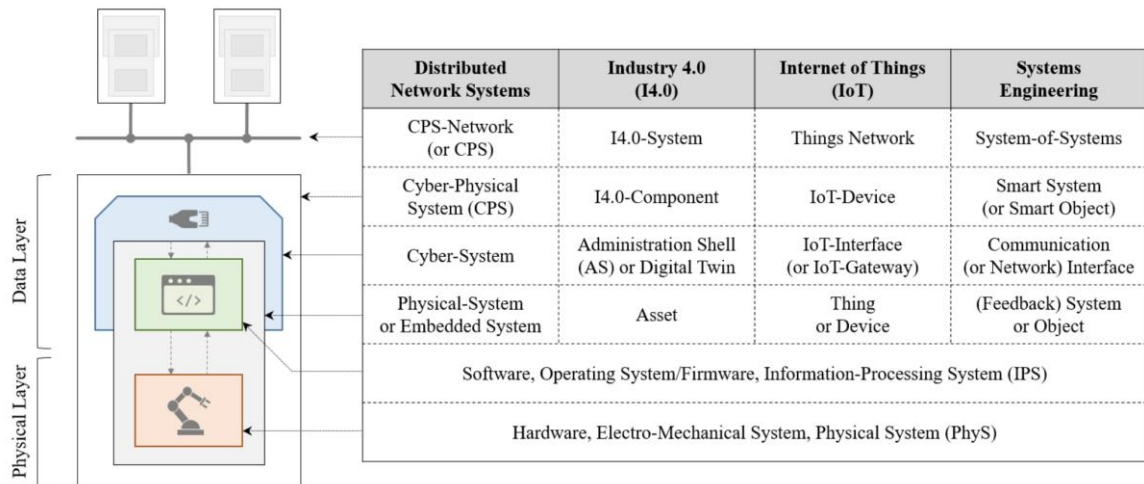
Pro realizaci CPS v kontextu technických aplikací je nutné nahlédnout na jejich strukturu, která se odvíjí od konkrétní oblasti, ve které jsou vyvíjeny. Dahmen a Rossmann ve své publikaci [33] identifikovali čtyři aktuálně nejvýznamnější oblasti vývoje CPS, konkrétně

¹⁸ Structure health monitoring, SHM.

¹⁹ Predictive maintenance, PM.

²⁰ Condition monitoring, CM.

distribuované síťové systémy, Průmysl 4.0, Internet věcí a systémové inženýrství (viz Obrázek 13). Vzhledem k těmto oblastem pak CPS plní funkci buď IoT zařízení, chytrého systému či I4.0 komponent, kde jeho jádro vždy tvoří fyzický elektromechanický (mechatronický) systém.



Obrázek 13: Čtyři hlavní oblasti vývoje CPS (převzato z [33])

Obdobně jako u DT, definice CPS není zcela jednotná, a aktuálně lze rozlišit dva základní způsoby chápání. V prvním uvažujeme každý mechatronický systém jako CPS, přičemž elektromechanické komponenty tvoří jeho fyzickou část a softwarová část tvoří nadřazený kyberprostor. Druhý způsob chápání předpokládá, že mechatronický systém je pouze fyzický systém, který se stane CPS až po zavedení síťových vazeb s ostatními prvky, přičemž toto rozhraní sestává kyberprostor. V řadě případů může být dostačující, že systém do kyberprostoru dodává kontinuální stream dat. Je nutné podotknout, že pouze druhý náhled přináší oproti základnímu mechatronickému přístupu nějakou přidanou hodnotu.

3.6 Nástroje pro tvorbu, správu a využití DT a CPS

Komplexita DT vyžaduje využití velké řady různých softwarových nástrojů pro implementaci jednotlivých částí a funkcí. V dnešní době je pro dílčí úlohy dostupná celá řada nástrojů, avšak což na jednu stranu přináší široké spektrum alternativ při výběru software, na druhou stranu může způsobit problémy s implementací dílčích modelů do funkčního celku z důvodu nekompatibility či obtížného předávání dat mezi jednotlivými software. Velká řada velkých průmyslových a softwarových společností začíná ve svých portfoliích nabízet jednotná řešení, která umožňují využívat nástroje třetích stran a integrovat výstupy z nich v jednom centralizovaném prostředí. Z tohoto důvodu je tedy hlavním problémem především nedostatečné povědomí o aktuálně dostupných nástrojích a jejich provázání, proto si tato kapitola dává za cíl systematicky kategorizovat jednotlivé zájmové oblasti a příslušné dostupné nástroje nutné k jejich realizaci.

Zcela obecně lze nástroje pro tvorbu, správu a využití DT rozdělit do obdobných pěti kategorií, jako v případě 5D modelu digitálního dvojčete (viz Obrázek 8) uvedených v [15]:

- Fyzické entity
- Digitální entity – modely fyzických entit
- Vazby a propojení
- Data
- Služby

Oblast fyzických entit zpravidla zahrnuje nejen vlastní fyzickou část DT, ale i senzorické systémy pro měření podstatných veličin, aktuátory a aktivační členy pro ovládání, řízení a vnášení zásahů do fyzické soustavy. Oblast modelování zahrnuje veškeré dílčí kroky tvorby digitálního obrazu fyzické entity, které jsou zpravidla založeny na modelování geometrie, fyzikálního modelování²¹, modelování pravidel²² a modelování chování²³. Vazby a propojení zahrnují veškeré systémy zajišťující komunikaci a interakci mezi jednotlivými entitami, přičemž se nejedná pouze o fyzické propojení jednotlivých fyzických prvků DT, ale i veškeré komunikační kanály uvnitř jeho digitální části, zpravidla na bázi cloudového řešení. Do oblasti dat spadá vše od sběru a získání dat, jejich přenosu, ukládání, zpracování a vyhodnocení, až po jejich fúzi a vizualizaci.

Služby zajišťují veškeré dílčí procesy probíhající na DT a již jim byla věnována pozornost v kapitole 3.3. V kontextu této kapitoly se jedná především u služby typu SaaS, IaaS, PaaS, BaaS a MaaS, které lze dle funkce dále rozdělit do několika základních kategorií: servisní platformové služby, simulační služby, diagnostické a prognostické služby, a optimalizační služby. Platformové služby umožňují integraci nových pokročilých technologií založených na metodách umělé inteligence²⁴, centralizují komunikaci a přenos dat pomocí Big Data²⁵ a integrují jednotlivé systémy a DT do větších inteligentních IoT nebo IIoT²⁶ celků. V rámci těchto větších celků nachází uplatnění technologie M2M²⁷, která slouží ke komunikaci a interakci inteligentních zařízení připojených v síti bez nutnosti lidského zásahu [34], přičemž koncept tohoto komunikačního protokolu je rozšířením původních nízkonákladových technologií sloužících k propojení senzorů s koncovými výpočetními zařízeními.

²¹ Modely implementující fyzikální charakteristiky entity. V případě mechanické domény se jedná např. o modely materiálu, vazeb, okrajových podmínek, degradačních procesů aj. V případě mechatronických systémů integrují i fyzikální charakteristiky z ostatních domén (elektrické, magnetické, hydraulické atd.).

²² Modelování logiky, zákonů a pravidel fyzikálních projevů entity, např. na základě strojového učení.

²³ Modelování vlastností entity s cílem popsat jejich schopnost reagovat na změny, podněty, interakce s ostatními entitami, regulovat interní procesy, provádět monitorování provozních podmínek atd.

²⁴ AI, Artificial Intelligence

²⁵ Datové soubory, jejichž objem, struktura či rychlost aktualizace neumožňuje pro jejich analýzu využití konvenčních metod, přičemž jejich správa, zpracování a vyhodnocení jsou zpravidla zajištěny cloudovými službami.

²⁶ Industrial Internet of Things, IoT řešení uzpůsobené pro konkrétní průmyslové aplikace.

²⁷ Machine to machine communication, v kontrastu s IoT se zajímá pouze o část týkající se propojení vlastních zařízení, nikoli to, jakým způsobem mohou být předávané informace zpracovány a zohledněny v rozhodovacích akcích. Přestože je M2M a IIoT v průmyslu často zaměňováno, M2M se týká především P2P propojení zařízení, zatímco IIoT propojením s cloudem.

Simulační služby představují jednu z hlavních částí inženýrské činnosti v kontextu DT a zahrnují činnosti, ve kterých se integrují data ze senzorických sítí, vstupní požadavky a další klíčové informace s cílem analyzovat chování systému, např. v závislosti na daných vstupních parametrech, zkoumat vliv změn parametrů systému na jeho funkci atd. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.3, simulační služby můžeme rozdělit na interní, kdy je přímo uživatel provádí na lokální platformě, nebo cloudové, u kterých je jedním třetí stranou zajištěno nejen inženýrské know-how, ale i veškeré softwarové a výpočetní zázemí²⁸.

V této kapitole uveden pouze úzký výběr aktuálně dostupných nástrojů využívaných v jednotlivých krocích tvorby DT, přičemž je výběr orientován s ohledem na inženýrské a průmyslové aplikace v oblasti modelování dynamických soustav (Obrázek 14). V uvedeném seznamu jsou mimo výše uvedené dílčí oblasti uvedeny nástroje pro komplexní modelování digitálních dvojčat jako celku (množina vlevo nahoře), jako například ANSYS Twin Builder (od verze 2022) [35] či Autodesk Tandem [36]. V rámci předcházejícího roku došlo díky vysokým požadavkům na digitalizaci k rapidnímu nárůstu počtu dostupných nástrojů, z velké části proto, že velké řada hlavních průmyslových lídrů (např. Siemens, ABB nebo Bosch) uvedla na trh vlastní řešení. U těchto nástrojů je však třeba předpokládat možnost jejich efektivní využití převážně pro hardwarová řešení pouze od těchto dodavatelů, což může být velmi limitující nebo nákladné pro řadu potenciálních uživatelů. Často jsou tedy v inženýrské praxi využívány univerzální simulační a výpočetní nástroje (Matlab, ANSYS atd.), které již nyní nabízí široké spektrum možností a služeb využitelných ve většině dílčích oblastech digitálních dvojčat. Jiným, často se objevujícím řešením, je využití některého ze základních programovacích jazyků (např. Python, Java, C++, SQL, Modelica), které jsou integrovány v řadě open-source softwarových nástrojů s vestavěnými funkcemi pro realizaci dílčích částí DT, práci s daty či jejich vyhodnocování.

²⁸ Cloudová řešení nabývají v dnešní době velké popularity, především pak pro náročné výpočty a simulace požadované menšími subjekty, které nedisponují dostupnou znalostní bází, přístupem k dostatečně výkonné lokální výpočetní stanici nebo licencemi požadovaných software.

4. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

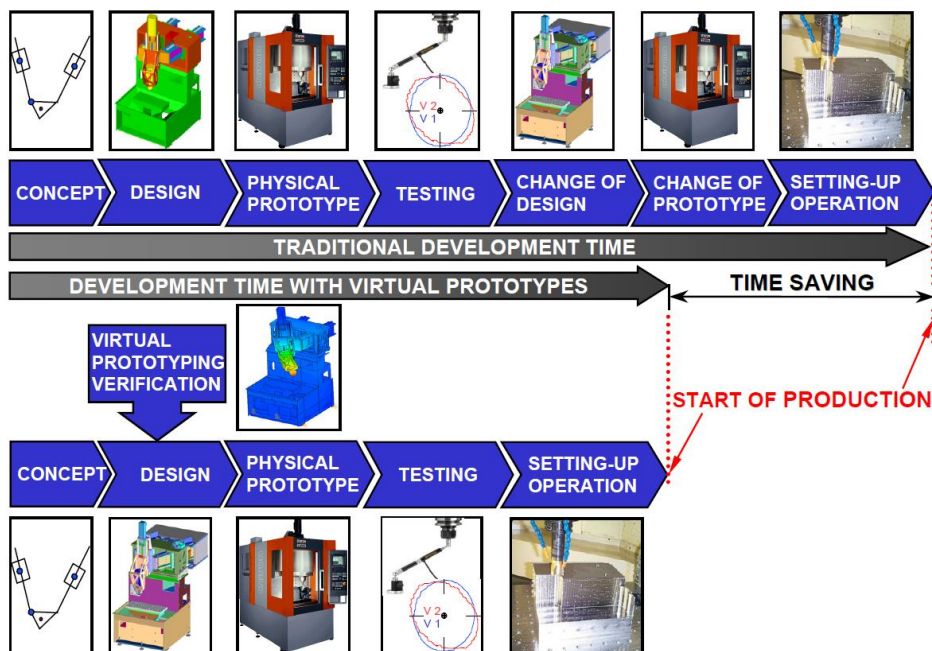
Nejednoznačnost chápání DT a CPS v kontextu průmyslových aplikací výrazně komplikuje proces tvorby jednotné metodiky pro jejich tvorbu. Za základě rozsáhlé studie uvedené v předchozí kapitole byly vymezeny jejich dílčí náležitosti a proveden výčet možných software použitelných při realizaci jejich dílčích částí, a pro zajištění toku dat mezi fyzickým a digitálním systémem jakožto hlavního chybějícího článku při realizaci funkčních CPS tvořících jádro DT byly formulovány tyto dílčí cíle práce:

1. Návrh a demonstrace metodiky pro tvorbu výpočtových modelů vhodných pro implementaci do DT s použitím komerčně dostupných software.
2. Výpočtové modelování a matematický popis piezokeramických senzorů pro potřeby integrace do výpočtových modelů soustav a fyzikální interpretace jejich odezvy.
3. Konceptualizace a realizace CPS systému ve zvolených průmyslových oblastech.
4. Rozšíření funkcionality těchto CPS systémů a jejich integrace do IoT pro potřeby zpracování a vyhodnocení dat v souladu s požadavky DT a pokročilých metod CM, SHM a PM.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

V předchozí kapitole byla uvedena řada dostupných nástrojů pro realizaci dílčích částí digitálních dvojčat dynamických soustav, a v této kapitole budou uvedeny dílčí příklady jejich využití pro konkrétní aplikaci. Teoretické základy týkající se problematiky modelování dynamických soustav jsou shrnuty v rámci diplomové práce autora [37], dále se budeme zabývat příklady aplikací ve třech hlavních zájmových oblastech souvisejících s aktuálně řešenými projekty na pracovišti, a to obráběcím průmyslu, letectví a železničním průmyslu. V návaznosti na pojetí konceptu DT budou v těchto oblastech formulovány dílčí problémy, které konkretizují požadavky na jejich finální podobu a na jejichž řešení budou demonstrovány možné přístupy k realizaci.

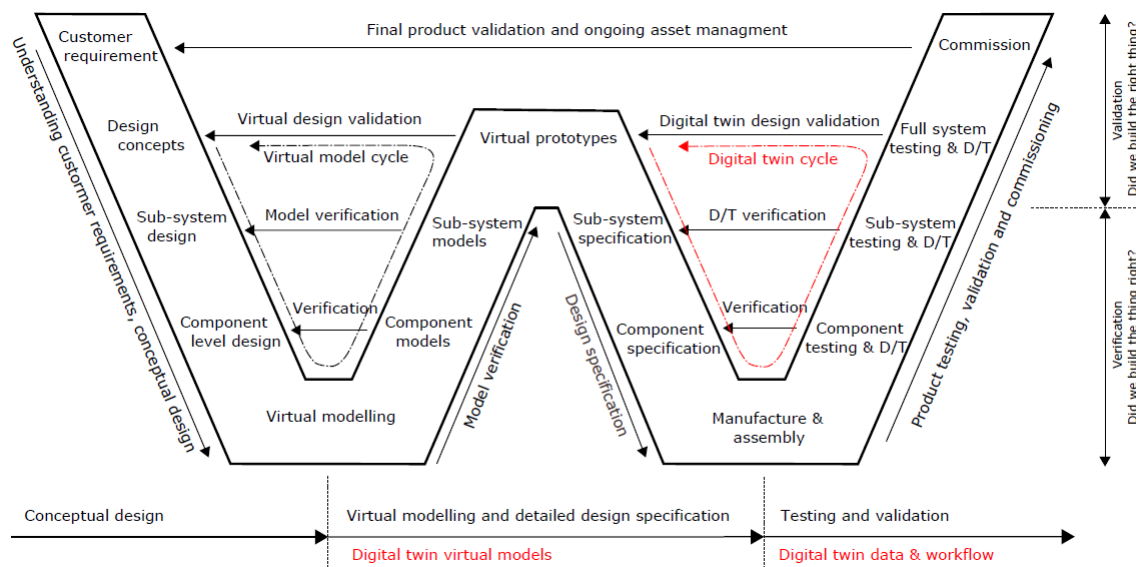
Výpočtové modelování a simulace chování dynamických soustav prochází vývojem již od 60. let minulého století, přičemž až od 90. let plní funkci základního nástroje v inženýrské praxi. Mechatronický přístup pro návrh multidisciplinárních systémů založený na model-based designu (viz Obrázek 15) se stal standardem zhruba od přelomu tisíciletí, kdy výpočtové a simulační modelování začalo být hlavním nástrojem v předvýrobní fázi technických soustav a umožnilo výrazné zkrácení potřebného času od návrhu k výrobě produktu. S rozvojem konceptu digitálního dvojčete začaly pronikat i do ostatních fází životního cyklu produktu a nyní je jejich role úzce spjata i s vlastním provozem zařízení (např. v rámci prediktivní údržby). Jejich významnost potvrzují i autoři [38], kteří považují dobu od roku 2015 až do současnosti za zlatou éru simulačního a výpočtového modelování.



Obrázek 15: Srovnání návrhu pomocí digitálního modelování s klasickým návrhem (převzato z [39])

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

Návrh mechatronických systémů se do současnosti opírá o tradiční V model, který popisuje dílčí vývojové cykly od návrhu, přes výrobu až po provoz. Autoři Wagg et. al. ve své publikaci [19] rozšířili tento přístup pro potřeby návrhu DT, a to do podoby tzv. W modelu (viz Obrázek 16), který v podstatě kombinuje dva základní V modely do jedné vývojové smyčky.



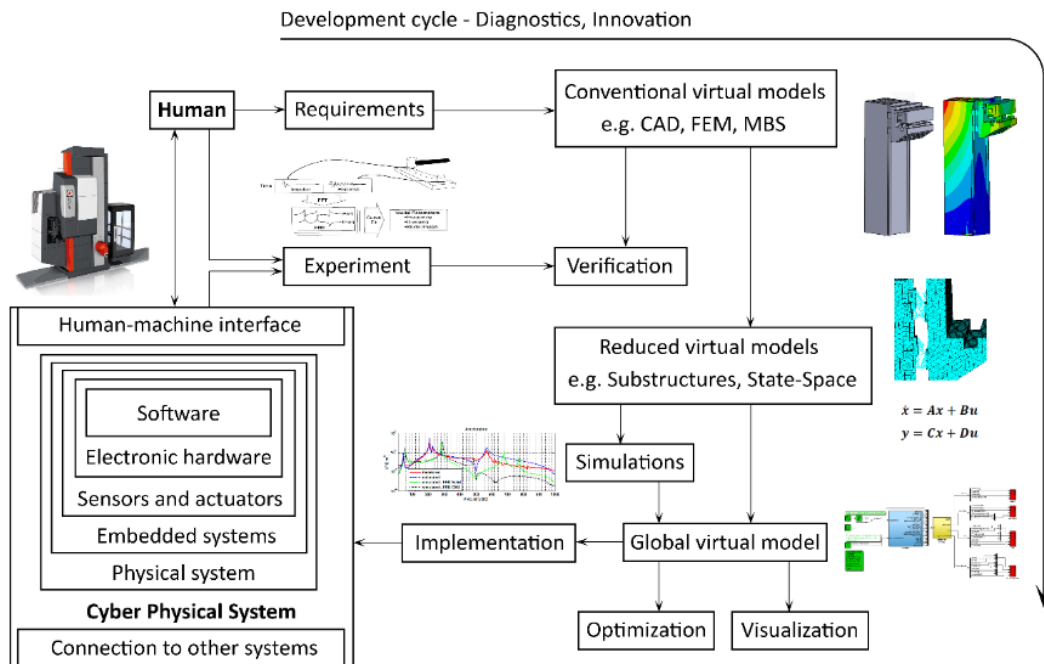
Obrázek 16: W model pro návrh DT (převzato z [19])

Jak vyplývá ze závěrů uvedených v kapitole 3.1, virtuální model tvoří jádro CPS a DT. Příklad začlenění konvenčních přístupů výpočtového a simulačního modelování v kontextu CPS schematicky znázorňuje Obrázek 17, kde si lze všimnout, že digitální nástroje tvoří nejen vazbu mezi CPS a člověkem skrze vizualizační nástroje, ale i zpětnovazební smyčku ve vlastním CPS zajišťující informační tok mezi fyzickou entitou a aktivačními členy obsaženými v CPS, které na základě automatizovaného zpracování dat jsou schopny buď plně automaticky nebo s asistencí člověka provádět funkční zásahy do provozu zařízení. demonstrovány možné přístupy k realizaci.

S ohledem na interní strukturu CPS (viz Obrázek 13) lze z hlediska realizace výpočtových modelů na konkrétních vrstvách nahlížet do tří hlavních kategorií:

- Fyzické objekty – výpočtové modely strojních součástí, mechanických celků, kontaktů, vazeb aj.
- Sensorické systémy – výpočtové modely senzorů, jejich rozmístění, přenosu a předzpracování dat aj.
- Data, simulace a služby – modely projevů entit, predikce jejich chování aj.

V případě mechatronických soustav, za které lze v dnešní době považovat drtivou většinu moderních průmyslových zařízení, se kombinují prvky mechaniky, elektroniky a řízení v jeden funkční celek [40–42], což zvyšuje požadavky na využitelné nástroje pro jejich realizaci. Pro potřeby DT je vhodné centralizovat dílčí modely, simulace a zpracování v jednotném prostředí, v rámci této práce byl zvolen Matlab/Simulink, který představuje univerzální nástroj umožňující postihnout většinu dílčích částí DT (viz Obrázek 14).



Obrázek 17: Schematické znázornění významu výpočtových modelů v konceptu CPS (publikováno ve [V15])

5.1 Hardware a software použitý k výpočtům a simulacím

Výpočtové modely a simulace byly realizovány na PC s těmito parametry:

- Procesor Intel i7-4790K, taktovací frekvence 4000 MHz, 4 jádra, 8 vláken
- Grafická karta NVIDIA GeForce GT740, 384 CUDA jader, 1024 MB paměti
- 32 GB RAM, rychlost 1600 MHz

Byly využity dostupné nástroje licencované na pracovišti, mezi které patří:

- Matlab (R2016b – R2021b) včetně řady vestavěných toolboxů
- ANSYS APDL 17.1, licence Academic Research, a modul ANSYS aaS, který umožňuje vzdálený přístup k jádru ANSYS z prostředí Matlab
- SolidWorks 2019, licence Standard

5.2 Výpočtové modelování vertikální frézky

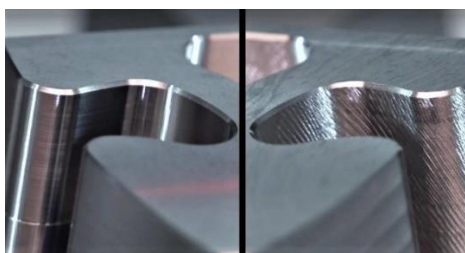
Cílem moderního obráběcího průmyslu je vyrobit požadovanou součást v co nejvyšší kvalitě, v nejkratším možném čase a s co nejnižšími náklady. Nároky na obráběcí stroje jsou stále zvyšovány a požadavky na jejich návrh, optimalizaci a řízení jsou stále přísnější. Systém podstatných veličin je tedy nutné rozšiřovat o ty, které v předchozích etapách návrhu nebyly považovány za podstatné. Velká řada těchto veličin zohledňuje dříve opomíjené dynamické procesy a vlivy působící při provozu obráběcích strojů, které však výrazně ovlivňují jejich schopnost provozu.

V rámci výzkumné činnosti, které byly věnovány články [V11] a [V13] byla studována problematika digitálního modelování vertikální frézky s cílem predikovat její dynamické chování. Studie byla zaměřena na tvorbu digitálního modelu, který by umožňoval

provádění simulací náročných na výpočetní výkon a čas, převážně pak simulací přechodových dějů v reálném čase. Konvenční přístupy založené pouze na MKP jsou pro simulace v časové, případně pak ve frekvenční či časově-frekvenční oblasti, zcela nedostačující. Z tohoto důvodu byla pozornost zaměřena na nalezení způsobu, jak převést komplexní výpočtové modely v modely jednodušší, které by vzhledem ke kladeným požadavkům svou přesností odezvy odpovídaly původním neredukovaným modelům.

5.2.1 Formulace problému

Proces třískového obrábění je jedním ze základních operací ve výrobním průmyslu. Řezný proces u třískového obrábění je komplexní proces interakce nástroje a obrobku ve složité silové soustavě [43]. Hlavní charakteristikou řezného procesu je řezná síla závislá na celé řadě parametrů, jako například řezné rychlosti, šířce třísky, materiálu nástroje a obrobku, geometrie nástroje, teplotě aj. [44]. U procesu třískového obrábění může při nevhodné kombinaci těchto parametrů docházet k fenoménu zvanému *regenerative chatter*²⁹, který představuje vznik samobuzených vibrací stroje [45, 46]. Tento jev má za následek výrazné snížení kvality povrchu (viz Obrázek 18), nadměrné opotřebení nástroje a ložisek, v kritickém případě poškození nástroje či části frézky. Vzhledem k velkému množství ovlivňujících faktorů se často používají zjednodušené matematické modely řezného procesu zohledňující pouze některé z těchto z nich. Stabilita řezného procesu se zpravidla posuzuje na základě tzv. *stability lobe diagramů* (SLD), které představují závislost limitní šířky třísky na otáčkách stroje.



Obrázek 18: Důsledky vzniku samobuzeného kmitání na kvalitu obráběného povrchu, vlevo před vznikem, vpravo po vzniku.

Pro účely predikce stability řezného procesu je mimo model řezné síly klíčovou charakteristikou dynamická tuhost stroje³⁰, která představuje přenosovou funkci mezi dynamickou odezvou nástroje, vřetene a vřeteníku a zbytku stroje na časově proměnnou řeznou sílu. Dynamická tuhost se zpravidla určuje experimentálně pomocí metody OMA (Operational Modal Analysis), což je experimentální modální analýza (EMA) provedená za provozu, při kterém je zařízení buzeno širokospektrálním signálem, zpravidla vlastním řezným procesem nebo bílým šumem [47, 48]. Jiný přístup pro určení dynamické poddajnosti u obráběcích strojů využívá tzv. RCSA³¹ metodu [49], což je analytický přístup založený na znalosti dynamické odezvy jednotlivých komponent stroje, a to určené buď výpočtově nebo experimentálně, a vhodných parametrů popisujících

²⁹ Zjednodušeně lze říct, že samobuzené vibrace nastanou tehdy, když má nástroj, vřeteno či stroj samotný nedostatečnou tuhost. Vlastní vznik je pak při přejezdu zubu nástroje po zvlněném povrchu obrobku způsobené přerušovaným záběrem zubů nástroje během obrábění, kdy je vybuzena některá z vlastních frekvencí stroje.

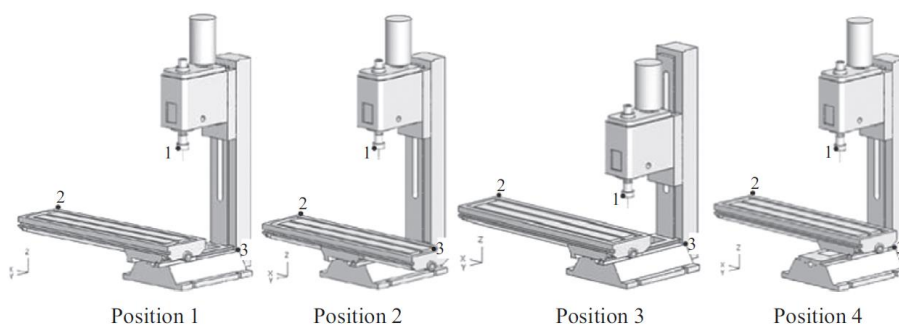
³⁰ Převrácená hodnota dynamické poddajnosti, kterou lze interpretovat jako frekvenční odezvu stroje.

³¹ Receptance Coupling Substructure Analysis.

mechanické vazby mezi nimi. Implementace této metody je však zpravidla možná jen v případě, že je možné stroj fyzicky rozdělit na dílčí komponenty a změřit jejich dynamické odezvy odděleně, a u složeného stroje je její realizace často týká pouze vlastního vyměnitelného nástroje nebo nástrojového držáku / kleštiny.

Dynamická tuhost se v rámci experimentálního měření vzhledem k jeho časové náročnosti a obtížné automatizaci často určuje pro jednu či několik poloh na jednotlivých osách a několik vybraných kombinací ostatních ovlivňujících parametrů. Bylo však dokázáno, že poloha vřeteníku (případně stolu) v rámci operačního prostoru výrazně ovlivňuje dynamickou tuhost frézky [50], což má za následek chybné určení parametrů pro zajištění stability řezného procesu. Je tedy vhodné zohlednit topologii frézky v celém operačním prostoru a pro celé spektrum možných řezných podmínek, což je experimentálně obecně velmi náročné, případně nemožné, pokud chceme minimalizovat pravděpodobnost vzniku tohoto jevu již v předvýrobní fázi stroje. Jeden z možných přístupů popisu vlivu proměnné topologie je založen na matematickém vztahu vlastních frekvencí stroje a experimentálně určených vlastních tvarech stroje [51], což však neumožňuje jednoduchou implementaci do výpočtových modelů. Jiný způsob zohledňuje vzájemné pozice jednotlivých dílů změnou polohy vazeb a vliv proměnné topologie zhodnotit například pomocí modální analýzy [49].

Z tohoto důvodu se nabízí predikovat oblasti stabilního řezného procesu pomocí výpočtového modelování, což však vzhledem k časově proměnnému charakteru řezného procesu zpravidla vede na velmi komplikované modely a časově náročné simulace.



Obrázek 19: Příklad proměnné topologie vertikální frézky (převzato z [50])

5.2.2 Cíle řešení

Problematika predikce stability řezného procesu vertikální frézky zapadá do konceptu tvorby digitálního dvojčete, a bude sloužit pro demonstraci možného přístupu k modelování komplexních dynamických struktur pro potřeby vyhodnocení provozních parametrů v reálném či kvazi-reálném čase. Uvedený postup je konkretizován na tomto demonstračním problému, vzhledem k jeho univerzálnosti je však možné jej přenést co celého spektra dalších inženýrských či průmyslových aplikací.

Pro účely predikce stability řezného procesu je využit zavedený přístup založený na určení limitní třísky, při které ještě nedochází ke vzniku samobuzených vibrací pomocí. Použitá teorie je založena na znalosti dvou parametrů: dynamické odezvy stroje a modelu řezné síly. Tato teorie se opírá o literaturu, která je uznávána za standart při řešení dynamiky obráběcích strojů, konkrétně knihu [44] autora Jiřího Tlustého a knihu [53] autorů Smitha a Schmitze.

Jedním z hlavních vstupních parametrů je dynamická tuhost, která je určena pomocí výpočtového modelování tříosé vertikální frézky, respektive její části sestávající se pouze ze sestavy vertikální osy Z. Metodika využitá k vytvoření výpočtového modelu ve formě substruktur byla založena na výše zmíněném přístupu RCSA zohledňující různou topologii stroje, přičemž všechny dílčí části struktury byly realizovány v digitálním prostředí. Vzhledem k výpočetní náročnosti dynamických analýz na takto komplexních modelech jsou implementovány pokročilé metody redukce založené na substrukturování pomocí modální syntézy a transformace do podoby stavového modelu. Do výpočtového modelu jsou integrovány experimentálně určené hodnoty modálního tlumení a vybrané vstupní parametry pro zvolenou řeznou operaci a výsledný umožňuje realizaci časově nenáročných simulací stability ve kvazi-reálném čase, a to v podobě parametrizovaných funkcí a skriptů vhodných pro potenciální implementaci do cloudových řešení.

Protože se chatter projevuje mimo jiné nadměrnými vibracemi stroje, dalším cílem je návrh a realizace integrovaného senzorického systému založeného v podobě CPS umožňujícího kontinuální monitorování vibrací v reálném čase a jejich vyhodnocení pro potřeby obsluhy stroje, kterému bude věnována kapitola 5.3.

5.2.3 Teorie stability řezného procesu

Řezné podmínky lze měnit dvěma základními parametry – otáčkami vřetene a šířkou odebírané třísky. Algoritmus pro určení limitní šířky třísky pomocí přístupu založeného na průměrném úhlu zubů v záběru³² lze popsat soustavou tří rovnic [53]:

$$b_{lim} = \frac{-1}{2K_s N_t^* Re(FRF_o)} \quad (5.1)$$

$$\frac{f_c}{\Omega N_t} = N + \frac{\varepsilon}{2\pi} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon = 2\pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{Re[FRF_o]}{Im[FRF_o]} \right) \quad (5.3)$$

kde b_{lim} představuje limitní šířku třísky, K_s představuje tzv. *cutting stiffness coefficient*³³ [46], N_t^* představuje průměrný počet zubů v záběru, FRF_o představuje orientovanou přenosovou funkci stroje³⁴, f_c je frekvence chatteru, Ω je úhlová frekvence vřetene, N_t je celkový počet zubů nástroje, $N = 1, 2, 3, \dots$ představuje počet uvažovaných stabilitních křivek a ε je fázový posuv mezi aktuální a předchozí vibrací nástroje.

Průměrný počet zubů v záběru N_t^* lze určit jako

$$N_t^* = \frac{\Phi_e - \Phi_s}{\frac{360}{N_t}} \quad (5.4)$$

kde Φ_e představuje vstupní úhel zubu nástroje a Φ_s představuje výstupní úhel zubu nástroje. hodnoty těchto úhlů se odvíjí od toho, zda-li odebíráme třísku ve nebo proti

³² Average Tooth Angle approach.

³³ Empiricky určený koeficient kvantifikovaný pro materiál obrobku a typ nástroje, někdy též nazývaný *specific force*.

³⁴ FRF je zkratkou pro Frequency Response Function.

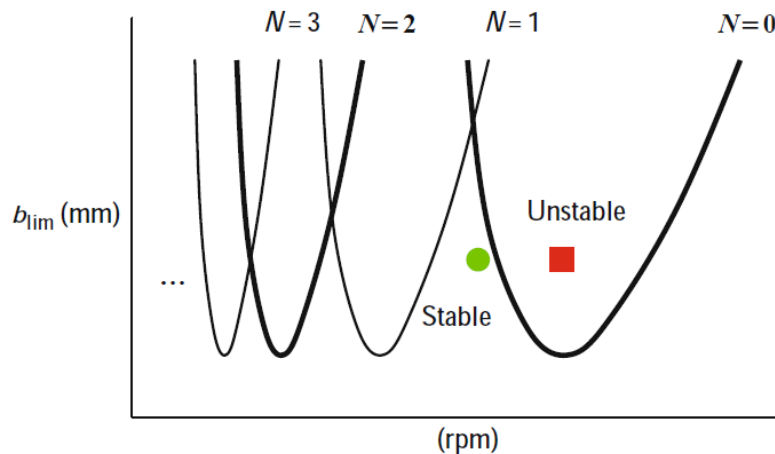
5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

směru pohybu nástroje. Pro operaci zajiždění frézy do plného materiálu³⁵ nabývají tyto úhly hodnot $\Phi_e = 180^\circ$ a $\Phi_s = 0^\circ$. Orientovaná přenosová funkce FRF_o souvisí s typem operace, od které se odvíjí zastoupení složek FRF ve zvolených osách v poměru daném váhovými koeficienty, a to dle vztahu

$$FRF_o = \mu_x FRF_x + \mu_y FRF_y \quad (5.5)$$

kde μ_x a μ_y představují váhové koeficienty, FRF_x a FRF_y přenosové funkce stroje v osách x a y , které tvoří řeznou rovinu. Váhové koeficienty se určují na základě typu řezné operace, respektive orientaci vektoru celkové řezné síly. Detailně je proces určení těchto koeficientů popsán v knize [53], dále budeme pracovat s hodnotami pro operaci zajiždění stopkové frézy do plného materiálu, pro kterou nabývají váhové koeficienty hodnot $\mu_x = \cos \beta = \cos 90^\circ = 1$ a $\mu_y = \cos(90^\circ - \beta) = 0$, kde β obecně představuje úhel mezi celkovou řeznou silou a její normálovou složkou.

Kombinací rovnic (5.1) - (5.5) při uvažování konečného počtu stabilitních křivek N dostaneme N závislostí limitní šířky třísky na otáčkách vřetene stroje, které mají obecně v nejjednodušší formě charakter vzájemně posunutých sedlovitých křivek mající stejné lokální minimum (viz. Obrázek 20). Průnik jednotlivých oblastí křivek dělí rovinu grafu na dvě poloviny, přičemž horní část představuje oblast nestabilního provozu a spodní stabilního provozu.



Obrázek 20: Příklad stability lobe diagramu v základní podobě (převzato z [53])

Často se konzervativně uvažují hodnoty limitní třísky pod pomyslnou vodorovnou tečnou k těmto křivkám, avšak z důvodu zvyšování produktivity strojů je snahou je provozovat nad těmito hodnotami, v pilovitých částech stabilní oblasti (Obrázek 20, zelený bod). Z předchozích vztahů je zřejmé, že při změně operace, geometrie nástroje, materiálu nástroje či obrobku, v neposlední řadě i topologie stroje ovlivňující FRF, nabývají SLD zcela odlišných tvarů a znemožňují přesnou lokalizaci bezpečných pracovních bodů, nejen z důvodu výpočetní náročnosti, ale protože z podstaty věci hledáme optimální řezné parametry v oblasti o vysokém počtu dimenzí.

³⁵ V angličtině *slotting cut*.

5.2.4 Postup tvorby výpočtového modelu

V návaznosti na výše uvedenou teorii určování stability řezného procesu pomocí limitní šířky třísky je hlavním cílem výpočtového modelu poskytnout dynamické odezvy obráběcího stroje ve frekvenční oblasti umožňující zohlednění nejen různých typů nástrojů a řezných operací, ale především proměnné polohy vřeteníku ve vertikálním směru (ose Z). Jako demonstrační zařízení byla zvolena tříosá vertikální frézka (viz Obrázek 21), ke které byl v rámci pracoviště umožněn přístup a byly poskytnuty CAD modely vybraných částí stroje. Pouze osa Z byla vybrána především z konstrukčního hlediska stroje, kdy je sloup vertikální osy upevněn na velmi robustní a tuhé základně a byl tedy zaveden předpoklad, že mechanické vibrace z osy Z nebudou přenášeny skrze tuto základnu na stůl s posuvy X a Y (a naopak). Navíc se první radě jednalo o ověření konceptu³⁶ a zahrnutí všech tří os by realizaci výpočtových modelů a simulací značně zkomplikovalo.

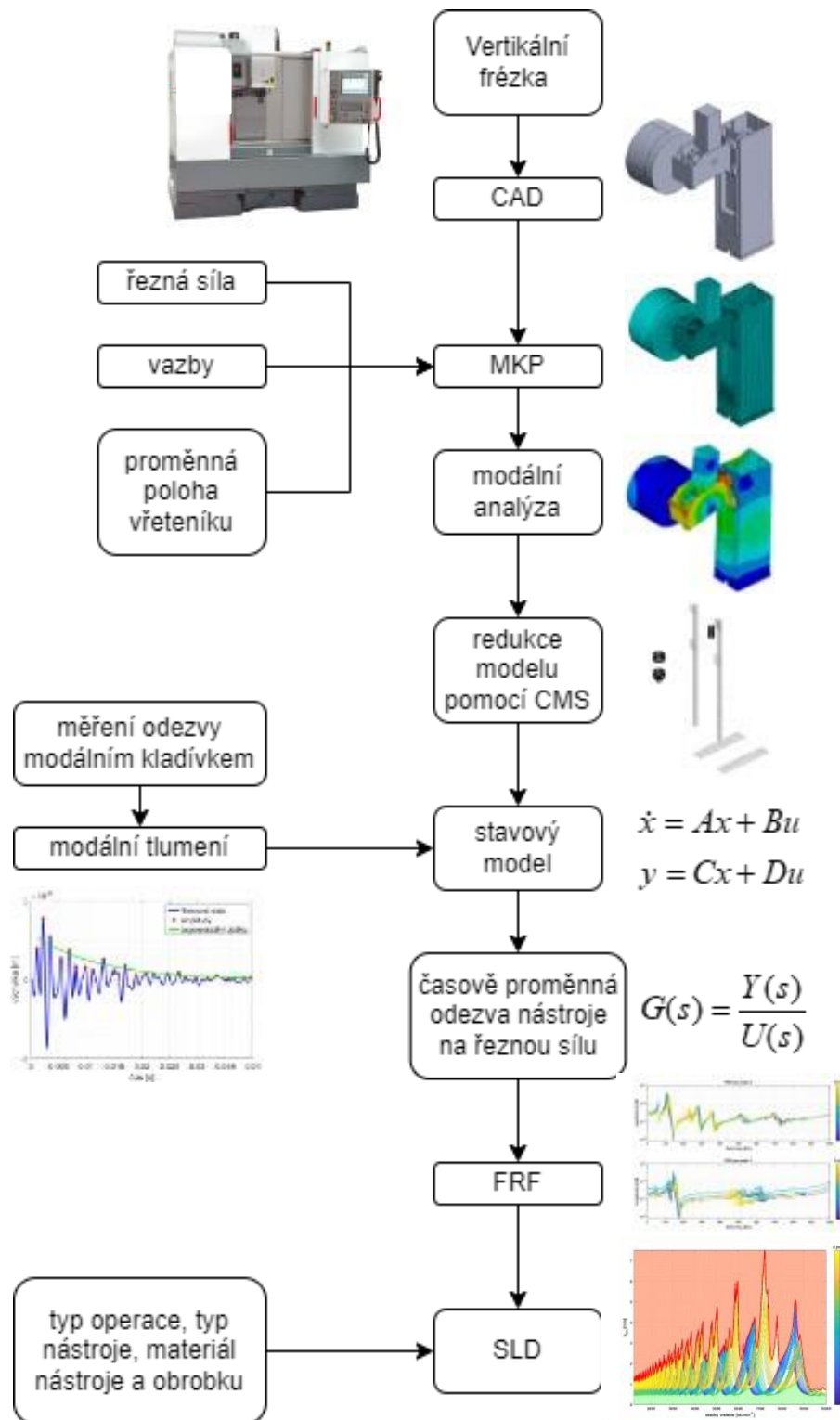


Obrázek 21: Zvolená tříosá vertikální frézka

Celý proces tvorby výpočtových modelů, jejich redukce a využití pro potřeby určení stability řezného procesu je schematicky vyobrazen níže (Obrázek 22). V rámci této kapitoly bude pozornost věnována především dílčím krokům týkajících se redukce stupňů volnosti a určení SLD diagramů, protože tyto kroky představují hlavní přínos navrženého přístupu.

³⁶ Feasibility study, proof of concept (POC).

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS



Obrázek 22: Schematické znázornění postupu tvorby výpočtového modelu vertikální frézky pro určení stability řezného procesu

5.2.5 MKP model

Sestava vertikální osy frézky se sestává z pěti funkčních částí: sloupu, vřeteníku, vřetene, pohonu vřetene a zásobníku nástrojů. Jako nástroj byla uvažována stopková fréza o průměru 20 mm a délce od konce vřetene 70 mm, typ a geometrii frézky lze však snadno modifikovat v příslušném submodelu. Všechny uvedené komponenty jsou uvažovány z oceli, zahrnuté do MKP modelu jako lineární materiálový model, je však v obecném hledisku nutno vzít v potaz, že u moderních strojů se již často objevují materiály s vysokými tlumivými vlastnostmi, například betonu či kompozitních materiálů, pro které je nutné použít materiálové modely komplikovanější [56]. V rámci výpočtových modelů nebyly uvažovány mechanicky nefunkční kryty, pneumatické systémy pro upínání nástrojů, kabeláž atd. CAD modely jednotlivých dílů byly upraveny pro potřeby dynamických analýz, tj. veškeré drobné otvory, rádiusy, závitů atd., které by znemožňovaly vytvoření pravidelné sítě, byly odstraněny. CAD modely jednotlivých dílů sestavy byly pomocí maker volaných z prostředí Matlab pomocí knihovny ANSYS aaS načteny do prostředí ANSYS APDL, kde na nich byla vytvořena pravidelná síť pomocí osmiuzlových SOLID185 prvků. Na všech rozhraních mezi jednotlivými díly byla vytvořena pravidelná mapovaná síť a byly implementovány zjednodušené modely vazebních prvků, tj. kuličkového šroubu (Obrázek 23, modrá barva), lineárních vedení (Obrázek 23, zelená barva) a kuličkových ložisek (Obrázek 23, fialová barva). Tyto prvky byly realizovány pomocí elementů typu hmotnost – tuhost – tlumení³⁷, konkrétně 1 DOF³⁸ prvek COMBIN14 pro lineární vedení a kuličkový šroub, rovinný prvek s radiální tuhostí COMBI214 pro kuličková ložiska. Parametry tuhosti lineárního vedení a ložisek byly určeny z katalogu výrobce, v případě ložisek se jednalo o řazení a předpětí pro konkrétní typ ložisek s kosoúhlým stykem. Ke kuličkovému šroubu nebyly k dispozici žádné podklady od výrobce, proto byla uvažována především axiální tuhost kuličkové tyče šroubu na základě teorie pružnosti a pevnosti pro axiálně zatížený prut kruhového průřezu, se zohledněním aktuální pozice vřeteníku byla velikost tohoto parametru proměnná. Statické a dynamické vlastnosti těchto vazebních prvků často výrobci neuvádějí a je nutné je určit experimentálně či výpočtově [57], což však v případě již složených zařízení není bez jejich demontáže v podstatě možné.

Tabulka 2: Hodnoty tuhostí vazebních prvků v MKP modelu

Vazba	Parametr tuhosti	Popis	Tuhost
			[N/m]
Lineární vedení	k_X	Tuhost ve směru X	$7,7 \cdot 10^8$
	k_Y	Tuhost ve směru Y	$7,7 \cdot 10^8$
Kuličkový šroub	k_Z	Tuhost ve směru Z	$\langle 3,3 \div 169,0 \rangle \cdot 10^8$
Valivá ložiska	k_R	Tuhost v radiálním směru	$0,60 \cdot 10^8$
	k_Z	Tuhost v axiálním směru	$1,19 \cdot 10^8$

Oddělení vazebních prvků od jednotlivých částí struktury umožňuje nejen jednodušší realizaci substruktur, ale především snazší modifikaci parametrů vazeb. Celkový počet stupňů volnosti se pohybuje v řádu stovek tisíc (viz Tabulka 3), a to pro relativně hrubou

³⁷ Mass-spring-damper element.

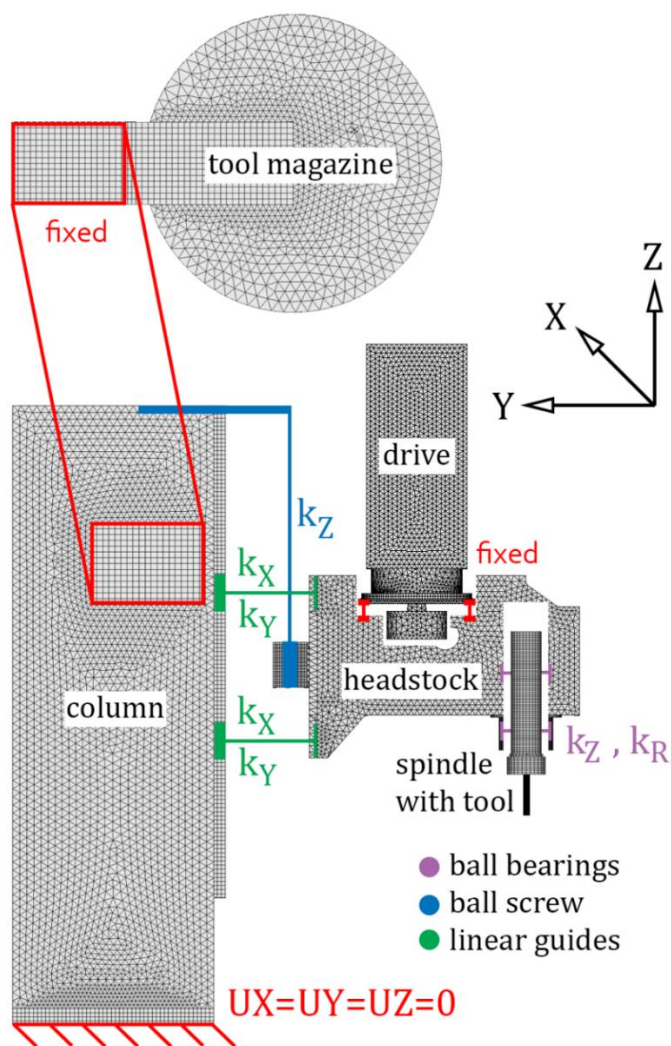
³⁸ Degree of Freedom, stupeň volnosti.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

sít uzpůsobenou pro dynamické analýzy, což je pro realizaci simulací řezných procesů v časové oblasti (transientních simulací) na běžném výpočetním hardwaru časově velmi náročný problém. Z tohoto důvodu je redukce stupňů volnosti nutností.

Tabulka 3: Celkový počet prvků MKP modelu frézky

Typ prvku	Počet
SOLID185	~270000
COMBIN14	13
COMBI214	4



Obrázek 23: MKP model vertikální frézky s vazbami mezi jednotlivými díly sestavy (publikováno ve [V14])

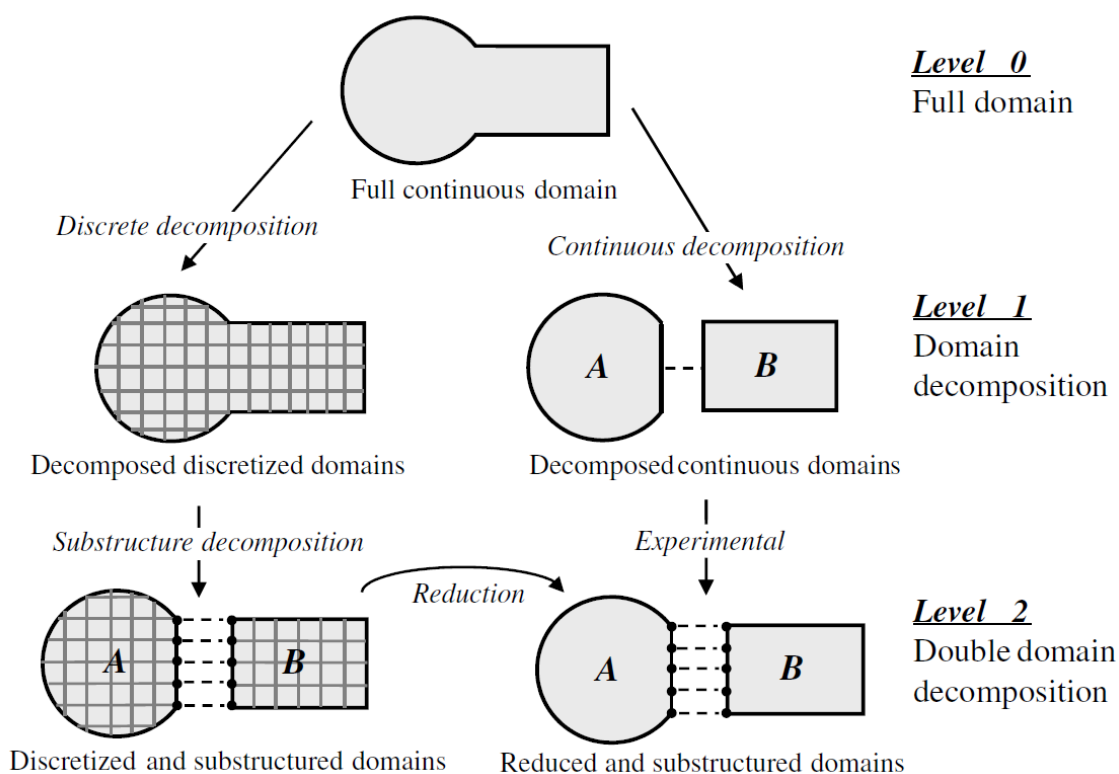
5.2.6 Redukce stupňů volnosti

Jak je zřejmé z předcházející kapitoly, výpočtové modely moderních zařízení založené na MKP vedou na modely se stovkami tisíc až miliony DOF, což pro komplexní simulace v časové oblasti, kterými právě simulace řezných procesů jsou, znemožňuje na běžně dostupném výpočetním hardwaru realizovat dynamické analýzy. Substrukturování,

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

respektive redukce výpočtových modelů (Reduced-Order Model, ROM), lze považovat za nutný krok pro zajištění dostatečně rychlých simulací a výpočtů, které případně mohou poskytovat data pro potřeby DT během jejich provozu.

S ohledem na topologii a strukturu obráběcího stroje je vhodné k sestavení výpočtových modelů pomocí MKP využít některou z metod substrukturování, které umožňují dekomponovat celý stroj na množinu samostatných entit nazývané substruktury, a na základě dynamických vlastností jednotlivých entit určit dynamické vlastnosti celé struktury (viz Obrázek 24, diskrétní substrukturování). Pro jednotlivé substruktury jsou charakteristické jejich vazby se svým okolím a rozhraní se sousedními substrukturami, přičemž musí být splněny dvě základní podmínky: kompatibilita substruktur na jejich rozhraní a silová rovnováha stupňů volnosti rozhraní [58]. Protože může být každá substruktura definována pouze pomocí těch stupňů volnosti, které tvoří rozhraní s okolím, substrukturování umožňuje velmi výraznou redukci celkového počtu stupňů volnosti a s tím spojené snížení výpočetní náročnosti navazujících simulací.



Obrázek 24: Podstata substrukturování dynamických soustav (převzato z [58])

Pro modely dynamických soustav jsou z jejich podstaty výhodné metody substrukturování založené na modální redukci (Component Mode Synthesis, dále CMS) [59], jako například Craig-Bamptonova metoda představená už v 70. letech minulého století [60]. Metody substrukturování jsou dnes již implementovány do celé řady výpočetních softwarů založených na metodě konečných prvků (např. ANSYS). Hlavním problémem u redukovaných modelů je zajištění jejich věrohodnosti a přesnosti pro potřeby zvolených analýz, v případě dynamických analýz pak především zajištění nezkreslených odezev v časové a frekvenční oblasti. Problematice redukce dynamických systémů včetně verifikace jejich přesnosti byla věnována diplomová práce autora [37], ve

kteřé jsou detailně popsány matematické základy CMS metod a jejich realizace v prostředí softwaru ANSYS včetně zhodnocení jejich přesnosti a využitelnosti, proto bude zvolený přístup pro potřeby této práce uvažován jako vhodný a dostatečně přesný.

V případě vertikální frézky byla zvolena metoda CMS založená uvažující rozhraní mezi subsystémy jako vetknutá. Tato metoda vyžaduje dva základní uživatelské vstupy: definici hraničních, zatížených a pozorovaných prvků, a počet uvažovaných módů, které budou v nových, po redukci modálních souřadnicích uvažovány. Počet uvažovaných módů se zpravidla určuje buď pouze na základě frekvenčního pásma probíhajících dynamických dějů, nebo v případě sofistikovanějšího přístupu pomocí tzv. *participation factoru*, který kvantifikuje významnost kmitání v jednotlivých souřadných směrech. Pomocí něj je možné vypočítat efektivní hmotu³⁹, která na daném tvaru kmitá, přičemž je počet tvarů zvolen tak, aby bylo dohromady kmitalo minimálně 90% celkové hmoty tělesa / sestavy. Tyto parametry lze určit pomocí rovnic

$$\gamma_i = \{\Phi_i\}^T [M] [D] \quad (5.6)$$

$$M_{eff,i} = \gamma_i^2 \quad (5.7)$$

kde γ_i představuje i-tý *participation factor*, $\{\Phi_i\}$ je i-tý vlastní tvar, $[M]$ je matice hmotnosti, $[D]$ je tzv. *excitation direction vector*⁴⁰ a $M_{eff,i}$ představuje efektivní kmitající hmotu pro i-tý vlastní tvar.

U jednotlivých dílů sestavy byly specifikovány uzly na rozhraní s ostatními částmi a byla provedena analýza typu SUBSTR, jejíž výstupem jsou modely s prvky typu MATRIX50. Tyto superelementy kombinují všechny prvky vstupního modelu jako jediný prvek, se stupni volnosti definovanými master uzly, přičemž deformaci vnitřních uzlů lze z podstaty CMS popsat jako kombinaci příspěvků vazebných a vnitřních módů. V posledním kroku byly tyto jednotlivé superelementy propojeny vazebnými prvky (viz Tabulka 2) v jeden celek.

5.2.7 Modální analýza

Na redukovaném modelu byla realizována modální analýza, na které bylo možno pozorovat výkyvy vlastních frekvencí pro různé polohy vřeteníku. Vzhledem k provozním parametrům stroje bylo jako zájmová oblast zvoleno frekvenční písmo 0–1000 Hz, na základě modální analýzy bylo uvažováno prvních 50 vlastních frekvencí spadajících do pásma 0–1300 Hz. Větší rozsah byl zvolen s ohledem na možné výkyvy frekvencí.

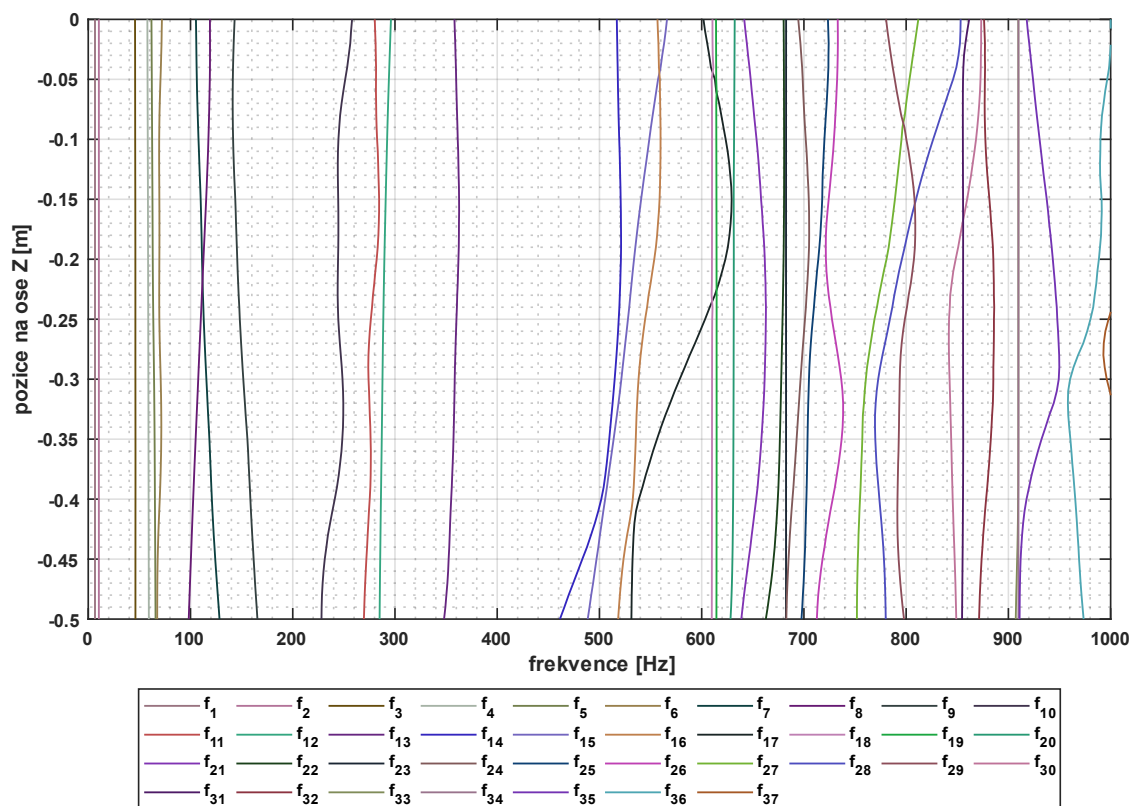
Protože dynamická tuhost stroje, která je vstupem do algoritmu určení stability řezného procesu, je přímo závislá na dynamické odezvě stroje, tj. jeho modálních vlastnostech, změna vlastních frekvencí pro jeho různou topologii má přímý vliv na polohu stabilních oblastí. Obrázek 25 znázorňuje výkyvy vlastních frekvencí ve zvoleném pásmu, přičemž je možné pozorovat řadu frekvencí, které se pro různou polohu nijak výrazně nemění, ale také ty, které se mění velmi významně. Je možné si povšimnout, že řada frekvencí má lokální extrémy v jiných než krajních polohách. Nelze tedy obecně říci, pro kterou polohu

³⁹ V anglické literatuře *effective mass*.

⁴⁰ Považovaný za jednotkový vektor posuvů závislý na směru buzení ve všech směrech globálního souřadného systému.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

vřeteníku bude hodnota dynamické tuhosti dosahovat svého maxima, případně minima, protože průběh vlastních frekvencí pro různé módy je charakterizován jinou funkcí.



Obrázek 25: Závislost vlastních frekvencí na poloze vřeteníku

Absolutní a procentuální výkyvy vlastních frekvencí pro vybrané módy obsahuje Tabulka 4. Je možné pozorovat, že pro tyto frekvence dochází k výkyvům v řádu desítek Hz, respektive relativním výkyvům až do výše 15% jejich minimální hodnoty. Tyto výkyvy lze považovat za zcela zásadní při vyhodnocování dynamické tuhosti stroje v jeho celém operačním prostoru.

Tabulka 4: Výkyvy vlastních frekvencí pro vybrané módy

Číslo módu	Minimální frekvence	Maximální frekvence	Rozdíl	
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[%]
7	98,3	111,6	13,3	13,5
8	111,8	128,4	16,6	14,8
9	141,3	165,4	24,1	17,1
10	228,1	258,0	29,9	13,1
14	461,3	521,2	59,9	13,0
15	488,5	558,2	69,7	14,3
17	531,2	610,1	78,9	14,9

5.2.8 Stavový model

Síla redukce pomocí substrukturování se nejevila pro potřeby dynamických analýz v kontextu DT dostatečná, proto byly zkoumány další možnosti redukce stupňů volnosti, které by umožnily simulovat dynamické děje v reálném či alespoň kvazi-reálném čase, tj. maximálně v řádu sekund až desítek sekund. výrazné zesílení redukce ve strukturní formě modelu nebylo již možné, proto byl zvolen přístup založený na transformaci do podoby stavového modelu. U dynamických soustav se zpravidla stavové modely sestavují pomocí strukturních matic hmotnosti, tuhosti a tlumení, což by v tomto případě z důvodu velkého počtu stupňů volnosti vedlo ke zvýšení komplexity modelu namísto kýžené redukce. Proto byl zvolen přístup na transformaci do modálních souřadnic, ve kterých bylo možné sestavit stavové matice na základě modálních charakteristik soustavy. Vstupy do stavového modelu jsou vektorové složky řezné síly na konci nástroje a výstupy jsou posuvy a rychlosti nástroje v globálním souřadném systému, případně výchylky a rychlosti

Výchozí popis stavového modelu vychází z obecně známých rovnic

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (5.8)$$

kde A je stavová matice, B je matice vstupů, C je matice výstupů, D je matice přímých vazeb, x je vektor stavů, u je vektor vstupů a y je vektor výstupů. Dílčí matice jsou sestaveny jako

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \Gamma_1 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \Gamma_3 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \Gamma_4 & 0 \\ 0 & \Gamma_4 \\ \Gamma_4\Gamma_1 & \Gamma_4\Gamma_2 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Gamma_3\Gamma_4 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

kde matice Γ_1 a Γ_2 lze zapsat jako

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} -\omega_1^2 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -\omega_n^2 \end{bmatrix} \quad \Gamma_2 = \begin{bmatrix} -2\xi_1\omega_1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -2\xi_n\omega_n \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

a ve kterých ω_i představuje i -tou vlastní úhlovou frekvenci a ξ_i představuje modální tlumení i -tého vlastního tvaru. Matice Γ_3 lze vyjádřit jako

$$\Gamma_3 = [\Phi]^T [F_u] \quad (5.11)$$

kde $[\Phi]$ je modální matice soustavy a $[F_u]$ je matice jednotkových sil⁴¹, která obsahuje jedničky na pozicích odpovídajících zatíženým stupňům volnosti. Matice Γ_4 má tvar

$$\Gamma_4 = [U_u][\Phi] \quad (5.12)$$

kde $[U_u]$ představuje matici jednotkových posuvů⁴², která obsahuje jedničky na pozicích, ve kterých je požadovaný výstup. Výstupy systému mohou být posuvy, rychlosti a

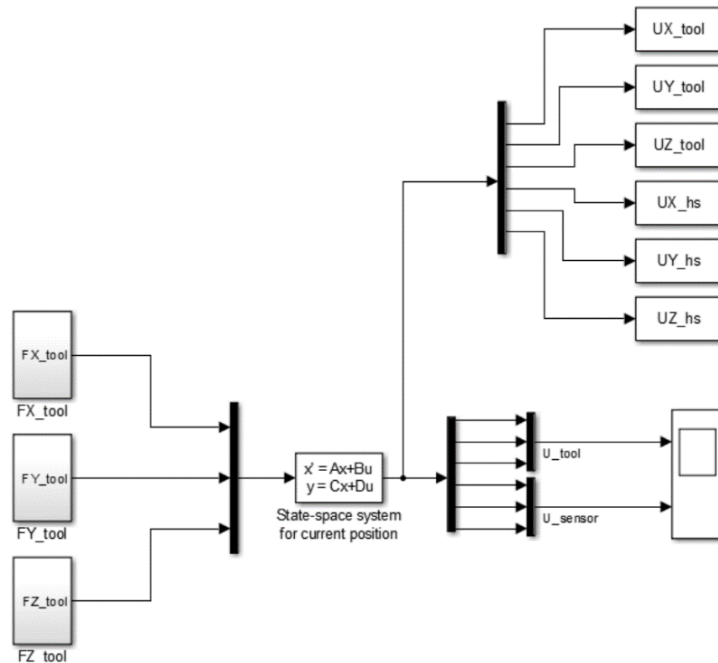
⁴¹ V anglické literatuře *unit force matrix*.

⁴² V anglické literatuře *unit displacement matrix*.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

zrychlení jednotlivých stupňů volnosti, přičemž nechceme-li zahrnout zrychlení, pak v rovnici (5.9) neuvažujeme u matic C a D jejich poslední řádek.

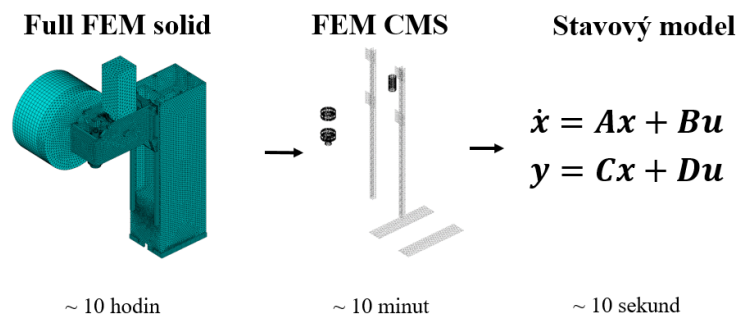
Po sestavení výše uvedených stavových matic byly vyexportovány do prostředí Matlab/Simulink, ve kterém byly využity pro požadované simulace.



Obrázek 26: Implementace stavového modelu vertikální frézky v prostředí Simulink

5.2.9 Zhodnocení efektivity redukce

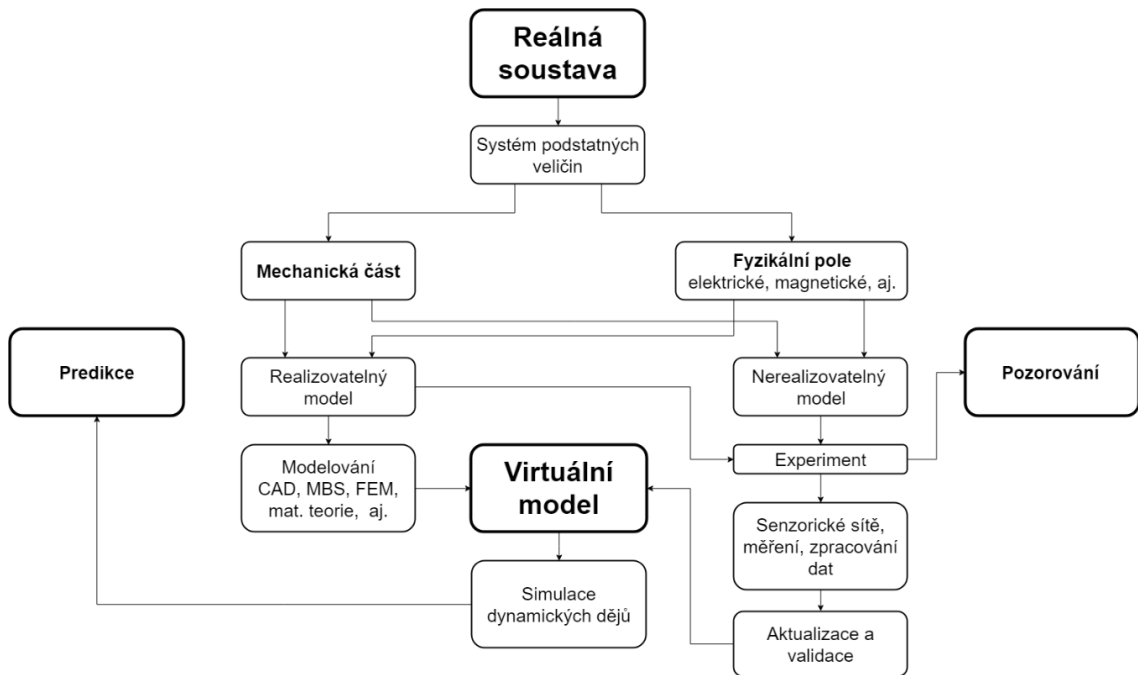
V tomto kroku je zhodnotit, zda-li byl zvolený přístup efektivní pro potřeby zrychlení dílčích simulací v časové a frekvenční oblasti. Je nutné podotknout, že nebyly provedeny referenční transientní analýzy na plném, neredukovaném MKP modelu ze SOLID prvků, avšak vzhledem k předchozím analýzám v diplomové práci autora [37] provedených na jednodušších výpočtových modelech lze očekávat, že transientní analýza v požadovaném rozsahu by na použitém výpočetním hardware trvala v řádu desítek hodin. Přechodové analýzy provedené na modelu redukovaném pomocí CPS by se pak pohybovaly v řádu desítek minut až hodin, ve stavovém prostoru pak v řádu sekund až desítek sekund (viz Obrázek 27).



Obrázek 27: Srovnání výpočetní náročnosti přechodových analýz na dílčích výpočtových modelech

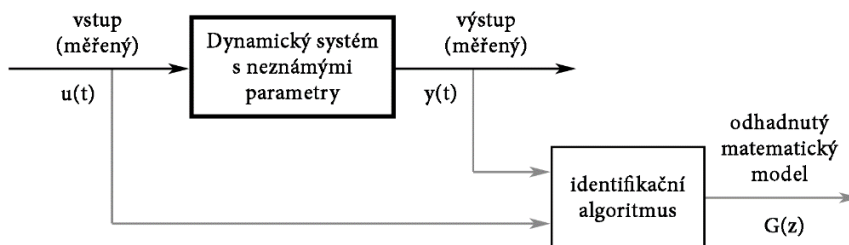
5.2.10 Experimentální určení tlumení frézky

Experiment byl historicky ve výpočtovém modelování považován za nástroj pro validaci vytvořeného výpočtového modelu, tj. kontrolu jeho vlastností a projevů porovnáním s vlastnostmi a projevy reálného (modelovaného) objektu. V současnosti je však role experimentu velmi významná i při vlastní tvorbě výpočtového modelu, protože nám umožňuje implementovat vlastnosti systému, pro které neexistuje jiný aparát vhodný pro jejich určení (např. matematická teorie). Roli experimentu ve výpočtovém modelování schematicky znázorňuje Obrázek 28, přičemž slouží převážně pro sestavení jinak nerealizovatelných modelů vlastností či procesů.



Obrázek 28: Role experimentu ve výpočtovém modelování

V případě nutnosti vytvoření matematického modelu odezvy reálného zařízení vhodného ke syntéze s výpočtovým modelem se nabízí využít některou z metod identifikace dynamických systémů vyvíjených již od 70. let minulého století [61] až do současnosti [62–64]. Tyto metody slouží k nalezení parametrů vybraného matematického modelu, jehož odezva co nejpřesněji popisuje odezvu experimentálně určenou.



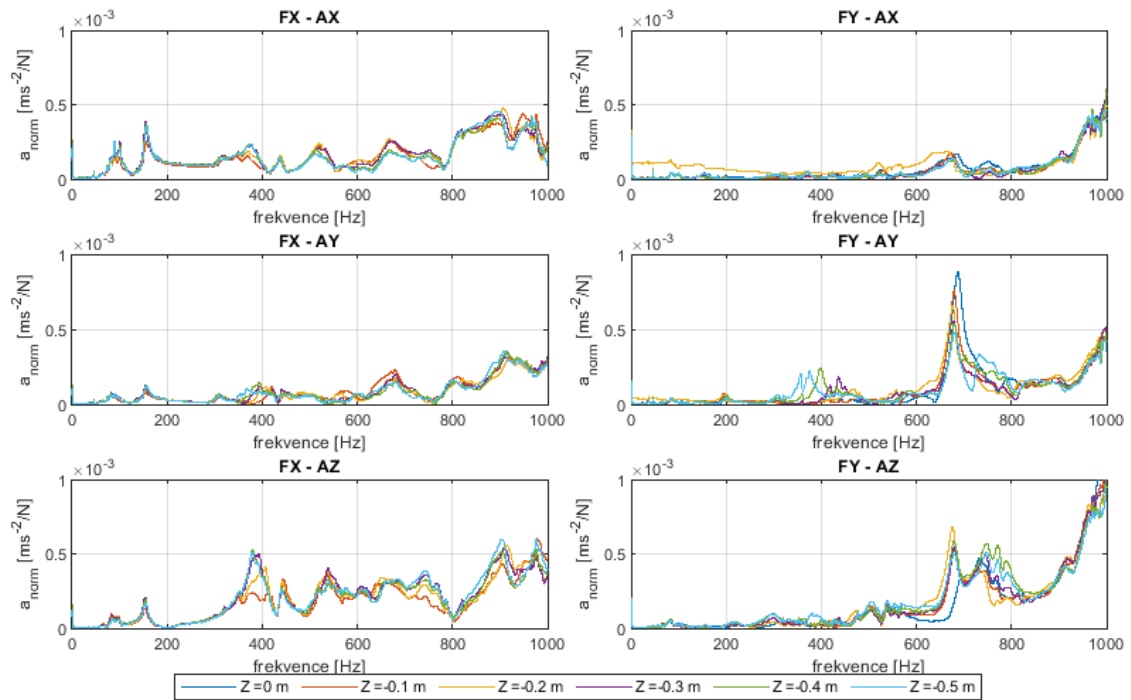
Obrázek 29: Princip identifikace dynamických systémů

Obecných matematických modelů je dnes celá řada, například GL, ARX, ARMAX, NARX, OE, BJ a další [65]. Software Matlab obsahuje pro identifikaci dynamických

soustav nástroj *System Identification Toolbox* [66], který umožňuje na základě výše zmíněných algoritmů určovat parametry lineárních i nelineárních dynamických modelů v offline i online režimu. Základní metodou pro hledání těchto parametrů je metoda nejmenších čtverců nebo některá z jejich modifikací. Některým z možných matematických modelů jsou stavový model či přenosová funkce, které jsou velmi výhodné pro řadu technických aplikací. Metody identifikace jsou úspěšně využívány i v průmyslových aplikacích, například pro určování dynamické poddajnosti obráběcího stroje na základě měření samobuzených vibrací [67], pro určování parametrů tlumení během obráběcího procesu [68] nebo určování dynamických vlastností ložiskových prvků u vysokootáčkových obráběcích strojů [69].

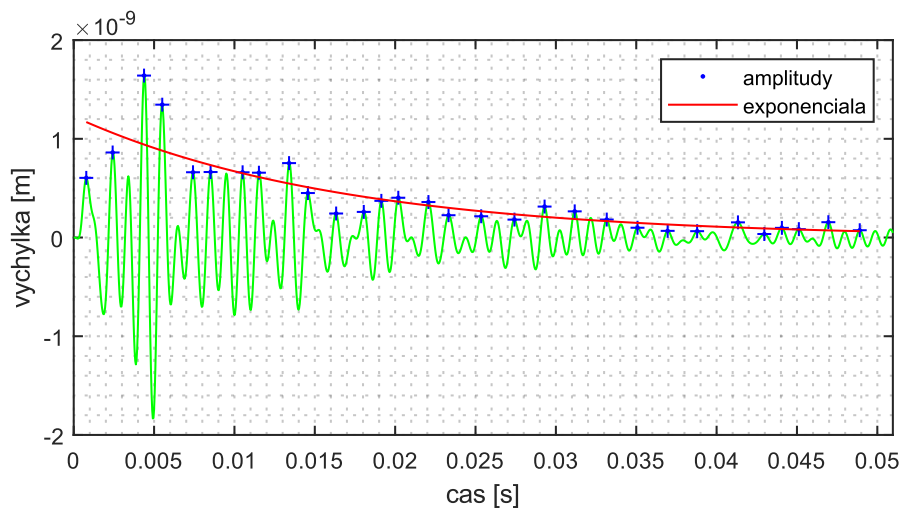
Jedním z potřebných parametrů pro stavový model popsany rovnicí (5.9) je tlumení zahrnuté v podobě modálního tlumení do matice Γ_2 (5.10). Tlumení je obecně velmi obtížným parametrem na kvantifikaci a pro komplexní soustavy se zpravidla určuje experimentálně. Výše uvedené metody identifikace nejsou z důvodu abstraktních matematických modelů pro určení tlumení příliš vhodné, je však vhodné podotknout, že v případě využití metodiky RCSA lze využít přímo experimentálně určené odezvy stroje, v našem případě však bylo cílem demonstrovat přístup založený především na výpočtovém modelu dílčích částí a měřená odezva stroje byla využita pouze pro určení neznámého tlumení. V tomto případě byl zvolen standardní přístup založený na určení tlumení z exponenciální obálky odezvy zaznamenané v časové oblasti. Byly provedeny zkoušky modálním kladívkem s akcelerometrem umístěným na konci vřetene pro šest různých poloh vřeteníku, přičemž pro každou polohu byla měřena odezva v ose X, Y a Z na buzení v ose X a Y. Odezvy byly zaznamenány pomocí měřicí karty NI 9234 (24 bit, ± 5 V, vstupní impedance 305 k Ω). Zaznamenané průběhy zrychlení (viz Obrázek 30) byly normalizovány vzhledem k maximální síle úderu, pomocí filtru typu horní propust s cutoff frekvencí 20 Hz byly odstraněny nízkofrekvenční složky komplikující proces numerické integrace, a poté byly dvojitou numerickou integrací průběhy zrychlení převedeny na výchylky.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS



Obrázek 30: Experimentálně určené odezvy frézky ve frekvenční oblasti pro buzení ve směru osy X (podélný směr stolu) a Y (příčný směr stolu)

Přestože modální tlumení představuje poměrný útlum pro jednotlivé vlastní frekvence, vzhledem k výkyvům vlastních frekvencí nebyly uvažovány jednotlivé frekvence, ale frekvenční pásma. S ohledem na koncentraci vlastních frekvencí byla definována pásma 10-50 Hz, 50-100 Hz, 100-200 Hz, 200-500 Hz a 500-1000 Hz. Zaznamenané odezvy v časové oblasti byly v daných pásmech vyfiltrovány pomocí spektrálního Butterworth filtru typu pásmová propust, a poté byly amplitudy proloženy exponenciální obálkou (viz Obrázek 31).



Obrázek 31: Určení tlumení pomocí exponenciální obálky

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

Z exponentu funkce popisující tuto křivku byly pro každou z naměřených odezev dle známých vztahů (5.13) a (5.14) dopočítány příslušné hodnoty součinitele doznívání δ a poměrného útlumu ξ . Hodnoty pro jednotlivá pásma byly ze všech měření zprůměrovány.

$$f(t) = A \cdot e^{-\delta t} \quad (5.13)$$

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi \frac{f_{cut2} - f_{cut1}}{2}} \quad (5.14)$$

Hodnoty f_{cut2} a f_{cut1} odpovídající horní a dolní frekvenci vymežující jednotlivá frekvenční pásma. Výsledné hodnoty modálního tlumení (viz Tabulka 5) vykazují mírnou frekvenční závislost, ale celkově se pohybují okolo hodnot $0,015 \div 0,020$ typické pro ocelové konstrukce.

Tabulka 5: Experimentálně určené hodnoty modálního tlumení

Spektrum frekvencí	10-50	50-100	100-200	200-500	500-1000
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
Modální tlumení	0,0203	0,0176	0,0160	0,0128	0,0156

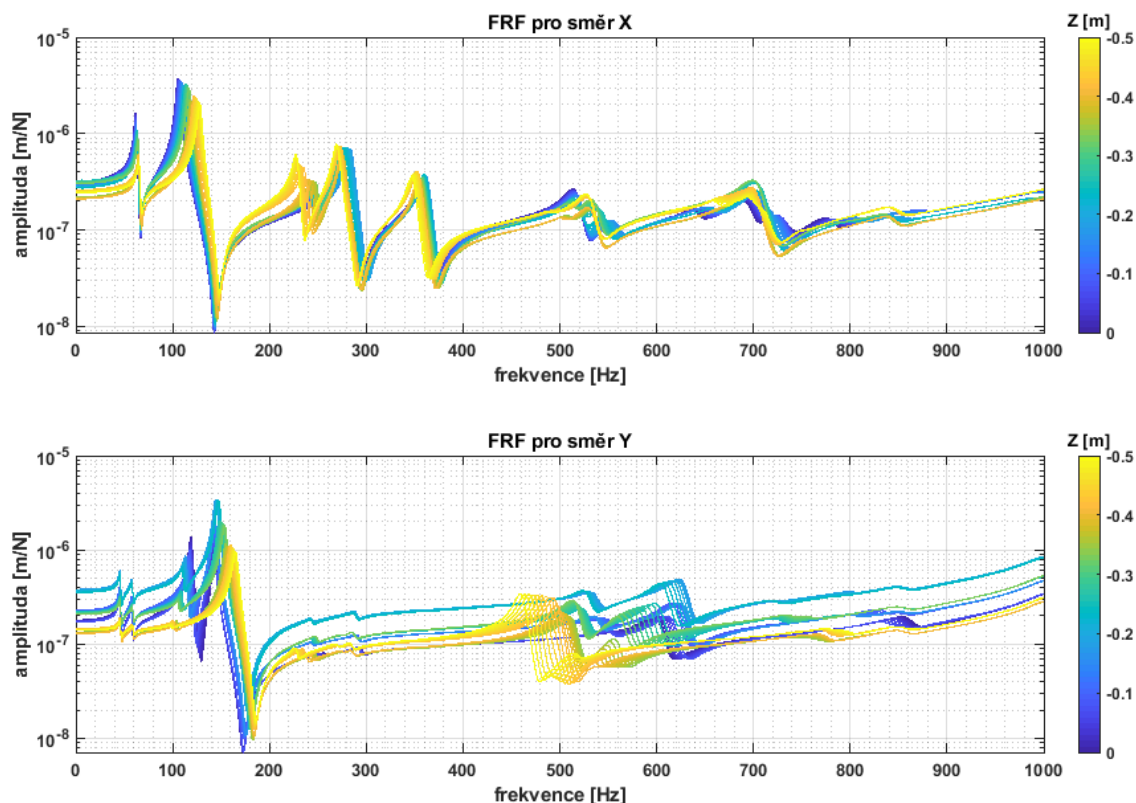
Hodnoty modálního tlumení byly vloženy do stavových matic a ty byly následně implementovány do prostředí Matlab / Simulink. Dále byly provedeny simulace odezvy stroje na impuls síly v místě nástroje s cílem určit přenosové funkce mezi zavedenou silou a posuvy v místě korespondujícím s polohou snímače umístěným na reálném zařízení. Tyto přenosy přímo reprezentují dynamickou poddajnost stroje (Obrázek 32).

5.2.11 Stabilita řezného procesu

Po dokončení všech předchozích kroků výpočtového modelování a integrace experimentálně určených dat byl finalizován výpočtový model v prostředí Matlab / Simulink, který lze charakterizovat jako soubor stavových modelů pro jednotlivé polohy vřeteníku na ose Z. Tyto modely tvoří jádro, které jsou výchozím bodem pro časově efektivní simulace časově proměnných dějů, především pak řezného procesu a následné určení jeho stability.

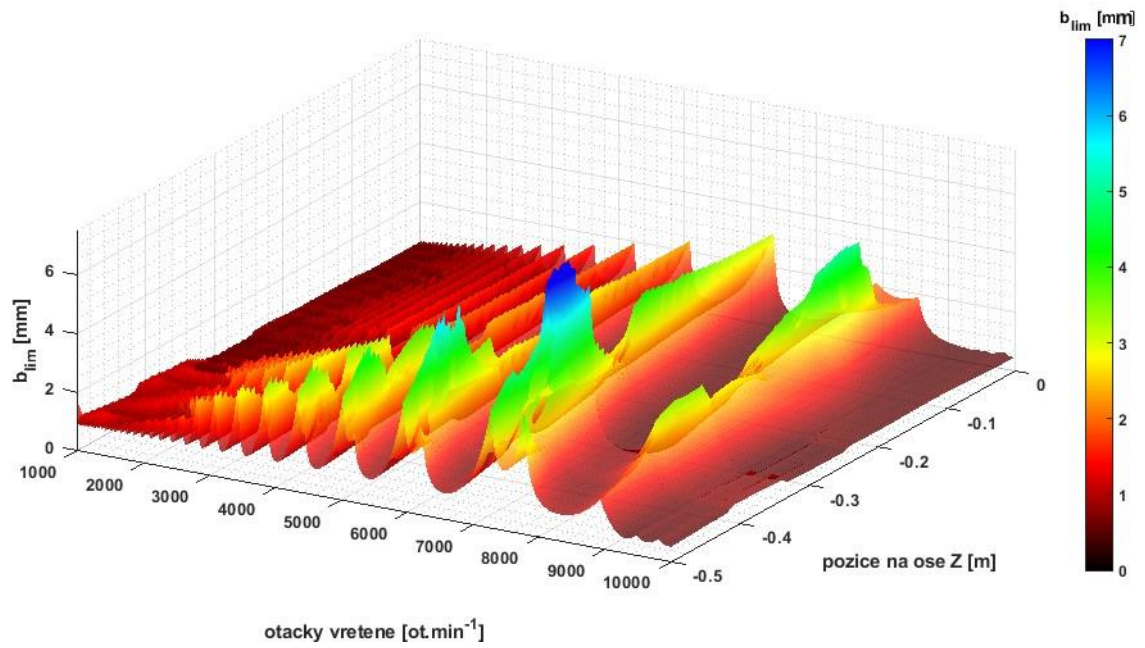
V posledním kroku byla tedy do modelu implementována metodika stability řezného procesu, které byla věnována kapitola 5.2.3. Byly provedeny simulace odezvy ve frekvenční oblasti pro směry X a Y (viz Obrázek 32), které byly pro zvolený řezný proces převedeny do formy orientované přenosové funkce FRF_o potřebné ve vztazích (5.1) - (5.5) a její reálné a imaginární složky potřebné pro určení fázového posuvu ε ve vztahu (5.3). Kombinací těchto vztahů pro každou z poloh vřeteníku dostáváme závislost limitní šířky třísky b_{lim} na otáčkách stroje a poloze vřeteníku na ose Z, uvedené pod názvem SLD.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

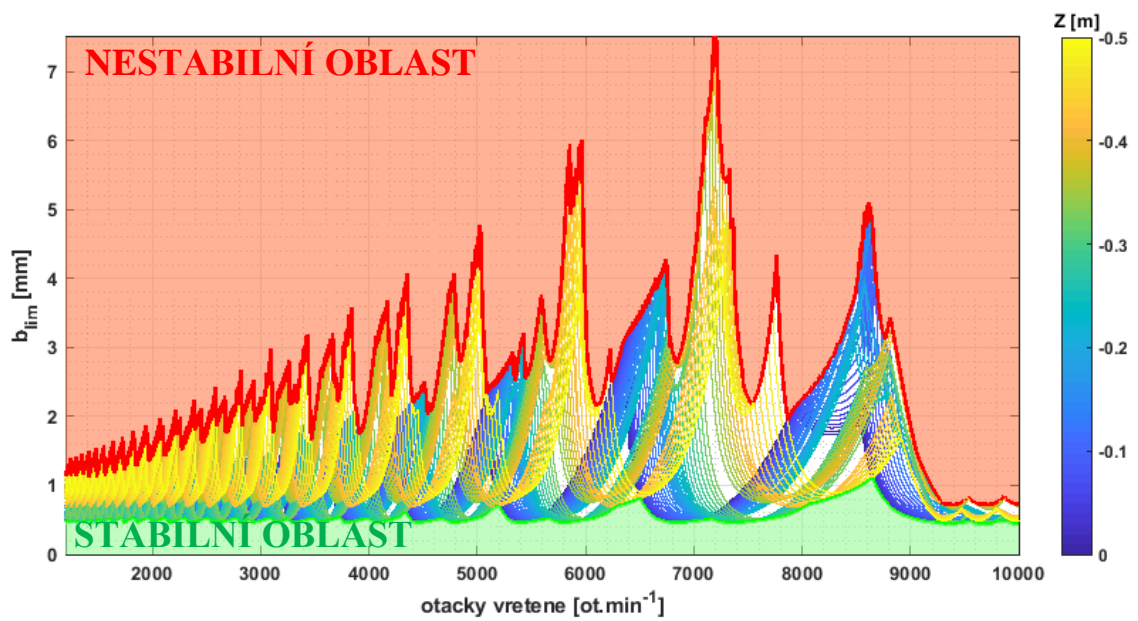


Obrázek 32: Polohově závislý přenos stroje ve směru X a Y

Tyto průběhy lze vyhodnotit několika způsoby. Zaprvé můžeme nahlížet na změnu minimální limitní třísky (horizontální tečna ke křivkám) v závislosti na poloze vřeteníku, což je konzervativní přístup k zajištění. Zadruhé můžeme pozorovat změnu polohy pilovitých oblastí stability vzhledem k poloze vřeteníku. Obrázek 33 znázorňuje závislost limitní šířky třísky na otáčkách vřetene a poloze vřeteníku na ose Z, přičemž je na něj nahlíženo zepředu. Je možné si všimnout nejen změny minimální limitní třísky, která s poklesem vřeteníku mírně narůstá, ale i změnu polohy pilovitých oblastí stabilit v závislosti na poloze vřeteníku, které jsou v horní poloze nejnižší a s poklesem vřeteníku povolna narůstají. Výsledné zobrazení stabilních, nestabilních a polohou na ose Z podmíněně stabilních oblastí znázorňuje Obrázek 34, ve kterém jsou ve spektru žluté až modré barvy znázorněny SLD křivky pro jednotlivé polohy, červeně je vyplněna oblast vředy nestabilní a zeleně oblast vždy stabilní.



Obrázek 33: Stability lobe diagram pro proměnnou polohu vřeteníku na ose Z, izometrický pohled



Obrázek 34: Stability lobe diagram pro proměnnou polohu vřeteníku na ose Z, pohled zepředu

5.3 Real-time monitorování vibrací frézky

U moderních výrobních strojů je většina provozních parametrů monitorována a vyhodnocována na pozadí, ve zjednodušené formě je však stále žádoucí vizualizovat klíčové parametry obsluhy, které v případě potřeby může provádět nezbytné zásahy do provozu stroje. V dnešní době je žádoucí vyhodnocovat provozní parametry v reálném čase během provozu stroje, a to nejen pro detekci náhlých změn v systému, které mohou ohrozit bezpečnost provozu, ale i pro dlouhodobé monitorování stavu zařízení a prediktivní údržbu.

5.3.1 Senzorika pro vertikální frézku

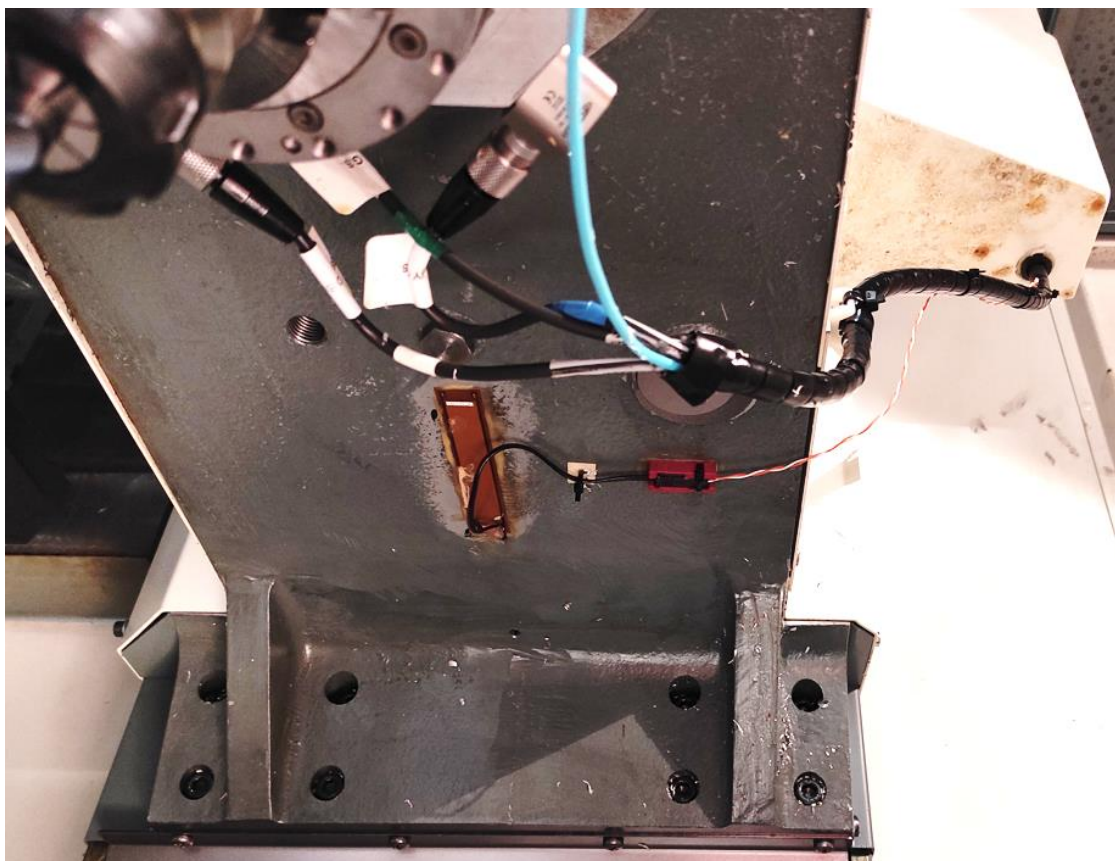
Standartně využívanými senzory bývají v případě obráběcích strojů převážně akcelerometry, které se slouží jako pevně umístěné senzory pro měření vibrací vřetene, pohyblivých či nosných částí konstrukce, dále pak laserové vibrometry pro bezkontaktní měření vibrací v kritických místech, a v neposlední řadě tenzometry pro měření deformací nosných částí konstrukce a v okolí koncentrátorů napětí. Všechny tyto senzory jsou pasivní, tj. vyžadují ke své funkci napájení a zpravidla i nákladný hardware pro záznam, digitalizaci a převod měřených signálů v užitečná a interpretovatelná data. Proto byla pro potřeby realizace CPS zvolena alternativa v podobě MFC⁴³ senzorů, které jsou analogové aktivní senzory generující s velkou citlivostí napětí v závislosti na přetvoření (změně přetvoření) podkladné struktury. Senzory ve svém pracovním rozsahu generují v závislosti na velikosti připojené odporové zátěže napětí v řádu až stovek voltů. V kontextu vibrodiagnostiky není třeba popisovat fyzikální princip elektromechanické přeměny (tj. co se děje „uvnitř senzoru“) a lze uvažovat tento senzor pouze jako *black box*, který má na svém vstupu mechanické vibrace a na svém výstupu elektrické napětí. Analogový napěťový signál lze digitalizovat pomocí DAQ zařízení, jehož vstupní impedance přímo ovlivňuje úroveň generovaného napětí. Na rozdíl od akcelerometrů je senzory nutné umístit do míst podléhajících deformacím, tj. nosným prvkům konstrukce, v případě vertikální frézky byl na základě předchozích analýz zvolen její vřeteník.

5.3.2 Realizace CPS

V případě zvolené tříosé frézky byl formulován požadavek na vytvoření CPS, který by umožňoval automatizovaný sběr dat a jejich real-time vyhodnocení a vizualizaci provozních vibrací pro potřeby obsluhy stroje. Cílem nebylo kvantifikovat aktuální výchylky nástroje či částí stroje, ale kvalitativním způsobem podávat informaci o aktuálních vibracích, které přímo souvisí s přítomností *chatteru*, kterému byla věnována předchozí kapitola. Tento systém byl založen na integraci aktivního MFC senzoru (kterým je věnována kapitola 6.2.4) přímo na vřeteník frézky do místa citlivého na vibrace stroje (viz Obrázek 35)⁴⁴. Tento senzor obsahuje piezokeramická vlákna v epoxidové matici a je velmi citlivý na změnu přetvoření podkladné struktury. Měřená odezva senzoru byla vyhodnocena v časové a časově-frekvenční oblasti a aktuální úroveň vibrací byla vizualizována ve formě virtuální stavové LED.

⁴³ Macro-fibre composite senzory.

⁴⁴ Na tomto obrázku si lze všimnout i několika trvale připojených akcelerometrů.



Obrázek 35: Umístění MFC senzoru na vřeteníku frézky (hnědá barva)

Senzor byl v rámci testovacího měření připojen na měřicí kartu NI 9234 (24 bit, $\pm 5V$, vstupní impedance 305 k Ω), po ověření funkce byl připojen na napět'ovou kartu měřicí ústředny integrované přímo na frézce, ke které jsou během provozu připojeny akcelerometry či další senzory.

Testovací měření probíhalo během obrábění hliníkového hranolu frézou o průměru 40 mm se čtyřmi karbidovými destičkami, kdy byly provedeny průjezdy ve směru X a Y, s axiální hloubkou řezu 0,5, 1 a 2 mm při otáčkách vřetene 1000 otáček za minutu.

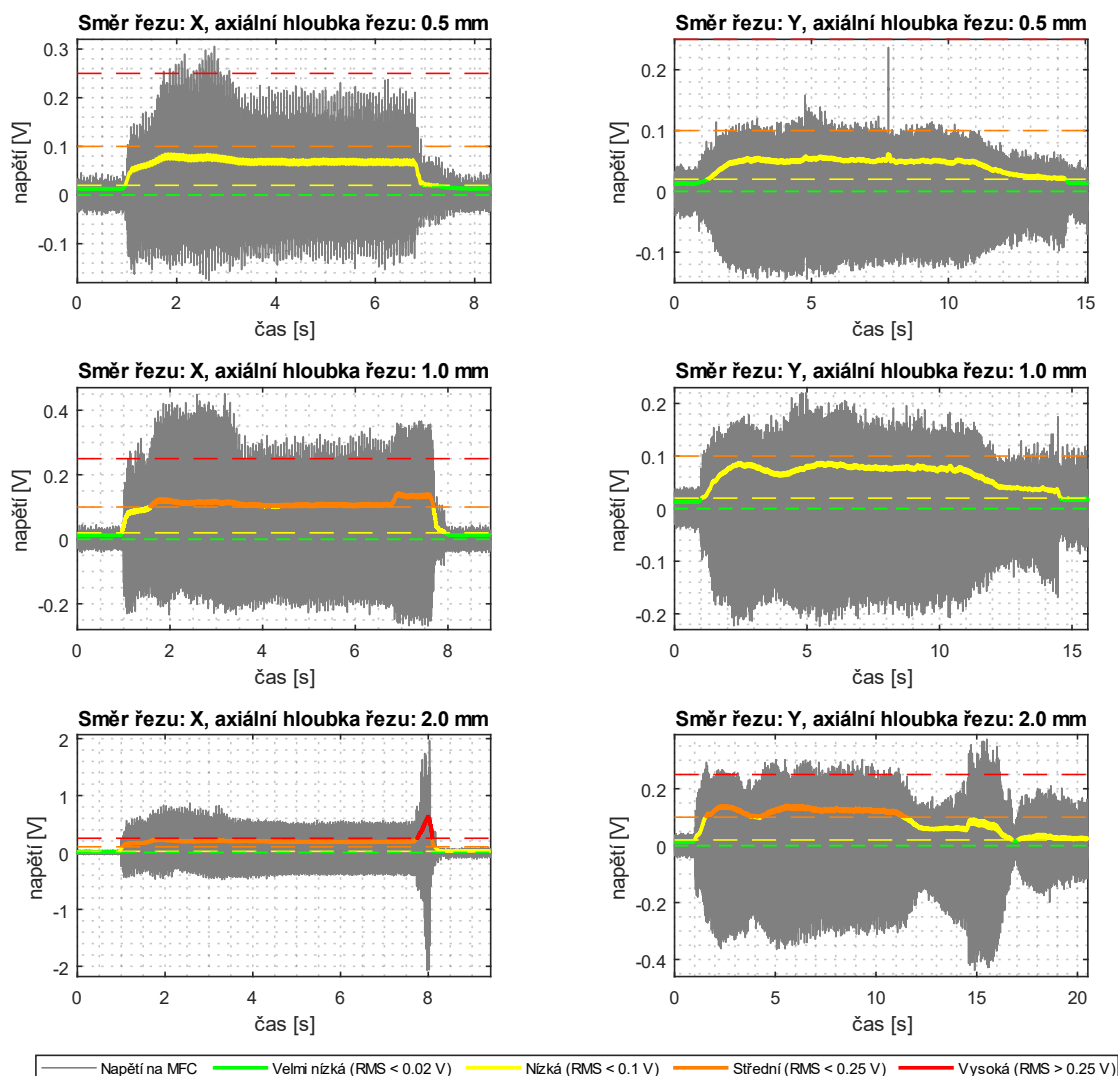
Dle naměřené úrovně napětí byly klasifikovány 4 úrovně vibrací: velmi nízké odpovídající běhu stroje naprázdno, nízké odpovídající dokončovacím operacím, střední odpovídající hrubovacím operacím, a vysoké pro nadměrné provozní vibrace stroje. Obrázek 36 znázorňuje surová naměřená data (šedá barva), klasifikační úrovně (přerušovaná zelená, žlutá, oranžová a červená barva) a RMS⁴⁵ signálu, které je s těmito úrovněmi porovnáváno.

Během odebrání 0,5 mm materiálu nedochází k překročení nízké úrovně vibrací, při odebrání 1 mm se nacházíme na hranici nízkých a středních vibrací, a při odběru 2 mm se přibližujeme hranici vysokých vibrací. Je možné si všimnout skokovému nárůstu u 3. obrázku (směr X, 1 mm), kdy v čase okolo 7 sekund dochází k nárůstu vibrací z důvodu najetí do materiálu po předcházejícím průjezdu, tj. odběru 1,5 mm materiálu namísto 1

⁴⁵ Root-Mean Square, kvadratický průměr.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

mm. Obdobně u pátého obrázku je možné si všimnout velmi výrazného nárůstu vibrací v čase okolo 8 sekund, kdy dochází k překročení hranice vysokých vibrací z důvodu najetí do konce materiálu po předcházejících průjezdech nástroje, tj. axiální hloubce řezu 3,5 mm přesahující obvykle přípustné meze pro daný nástroj a rychlost obrábění.



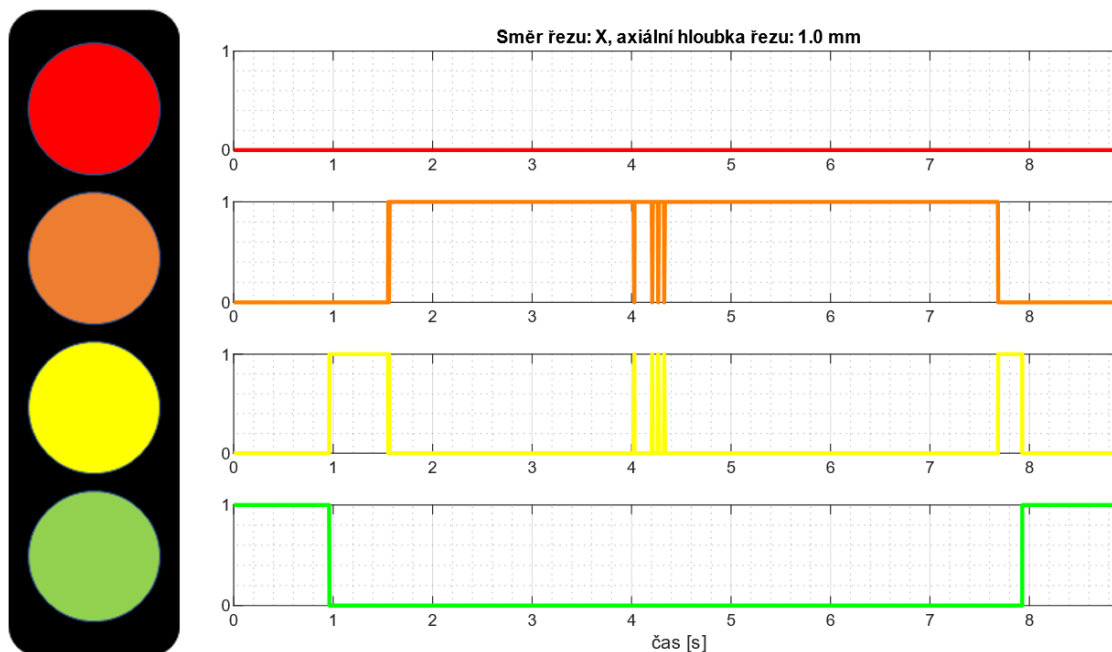
Obrázek 36: Real-time klasifikace úrovně vibrací frézky v časové oblasti pro různé axiální hloubky řezu

Toto robustní a rychlé vyhodnocení ze surových dat v časové oblasti je vhodné pro potřeby signalizace aktuální úrovně vibrací obsluze, a to například v podobě stavové LED. Výpočet RMS a porovnání s úrovní definovanou pro daný nástroj a operaci může být realizováno na FPGA⁴⁶ či integrovaném mikroprocesoru. V tomto případě byly zavedeny booleovské proměnné pro jednotlivé ze stavů, a pomocí deterministické logiky založené na porovnání aktuální hodnoty RMS a zvolených mezí nabývá hodnot 0-1. Tyto proměnné reprezentují konkrétní stavovou LED (viz Obrázek 37). V tomto kroku lze

⁴⁶ Field Programmable Gate Array, programovatelné hradlové pole.

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

implementovat sofistikovanější logiku a vyhodnocení, například fuzzy-logiku se vstupními metadaty přímo ze stroje, ta však nebyla k dispozici.

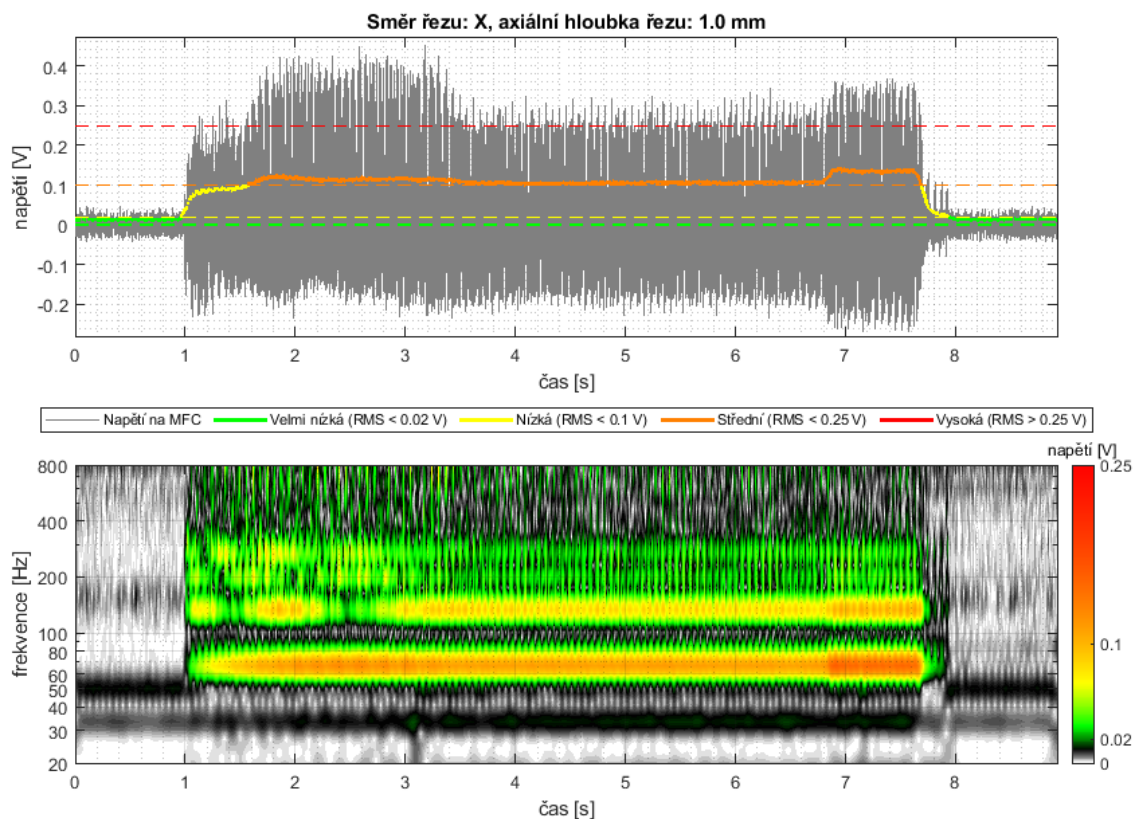


Obrázek 37: Real-time signalizace úrovně vibrací frézky pomocí stavové LED

Zatímco vyhodnocení v časové oblasti je dostatečné pro kvalitativní signalizaci úrovně vibrací, pro potřeby monitorování stavu a prediktivní údržby je vhodné nahlížet na charakter vibrací v časově-frekvenčním spektru, kde lze odhalit fenomény, které nutně nemusí ovlivňovat celkovou úroveň vibrací, ale pouze zvýšením na určitých charakteristických frekvencích. V rámci spektrogramu⁴⁷ (viz Obrázek 38) lze pozorovat charakteristické frekvence odpovídající otáčkové frekvenci stroje (66,7 Hz) a její dvou až čtyřnásobky odpovídající zubovým frekvencím.

⁴⁷ Nebo scalogramu při použití kontinuální wavelet transformace (continuous wavelet transformation, CWT).

5. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS



Obrázek 38: Real-time klasifikace úrovně vibrací frézky v časové a časově-frekvenční oblasti pro axiální hloubku řezu 1 mm

Diagnostika na základě analýzy dat v časově-frekvenční oblasti je v dnešní době jedním z rozšířených přístupů, především pak díky možnosti využití metod vyvinutých pro zpracování obrazu. Lze předpokládat, že při poškození nástroje či změně dynamických parametrů stroje bude zastoupení těchto charakteristických frekvencí detekovatelně pozměněno a zohledněno při diagnostice stavu stroje.

5.4 Konfrontace poznatků

Díky vytvoření redukováného modelu vertikální frézky ve stavovém prostoru bylo možno popsat jevy, které by bylo jinak velmi obtížné časově efektivním způsobem simulovat. Je nutné podotknout, že jsme demonstrovali tento jev pro proměnnou polohu pouze na jedné ze tří os, zvolili jsme jednu obráběcí operaci, jeden typ nástroje a materiál obrobku, a SLD diagramy jsme tedy simulovali v prostoru o dvou dimenzích. Pokud bychom chtěli zohlednit všechny tři osy, různý typ operace, nástroje a materiálu obrobku, nacházeli bychom se v prostoru o šesti a více dimenzích, kde by výpočetní efektivita začala být naprosto nepostradatelná. Snížení výpočetní náročnosti potřebných simulací z desítek hodin na jednotky sekund lze považovat za významný přínos.

Navrženou metodiku pro sestavení výpočtových a redukováných modelů, která byla demonstrována na příkladu stability řezného procesu vertikální frézky, lze univerzálně využít pro široké spektrum dynamických analýz v inženýrských aplikacích, které se zakládají na výpočtových MKP modelech. Centralizace prostředí hraje významnou roli při řešení víceoborových problémů, a prostředí Matlab/Simulink je velmi silným nástrojem v tomto ohledu. Jednou z hlavních výhod klasického prostředí ANSYS je možnost provozu v serverovém režimu, kdy je možné ovládat jej centrálně přímo z prostředí Matlab, a to nejen voláním již sestavených maker, ale především pak spouštěním příkazů integrovaných v modulu aaS. Dále jsou v něm implementovány velmi účinné nástroje na redukci dynamických systémů založených na modální syntéze (CMS) a nástroje na tvorbu stavových modelů pomocí modální analýzy. Substrukturování je v souladu s metodikou RCSA, která navíc umožňuje implementaci experimentálně určených parametrů či přenosů dílčích částí soustavy.

Prezentovaný přístup tvoří jádro metodiky tvorby DT dynamické soustavy, především pak digitální části dvojčete umožňující provádění klíčových výpočtů v reálném či kvazi-reálném čase. Přestože se jedná pouze o jednu z částí DT, systémově pojatý přístup je nedocenitelný při vlastní realizaci komplexního DT reálného dynamického systému. V rámci spolupráce s ÚVSSR byla frézka využita i pro konceptualizaci řešení pro real-time monitorování provozních vibrací, a to v podobě CPS zaznamenávajícího vibrace stroje během provozu a jejich vyhodnocení pro potřeby obsluhy s ohledem na rychlou detekci a signalizaci nadměrných vibrací, které mohou být výsledkem nevhodně zvolených řezných parametrů, přetížení stroje či poruchy.

Hlavní motivací byla v tomto případě možnost práce na reálném průmyslovém obráběcím stroji a možnost integrace informací o stabilitě přímo do digitálního dvojčete výrobní linky, které bylo v posledních letech vyvíjeno na ÚVSSR FSI VUT v Brně [70, 71]. Frézka nebyla v době této studie začleněna do virtuální výrobní buňky a nebylo tedy možné konfrontovat dosažených poznatků s metadaty a provozními parametry přímo ze zařízení, výstupy této studie jsou tedy prozatím využívány jako pouze jako ověření konceptu a proveditelnosti.

6. CPS PRO LETECTVÍ

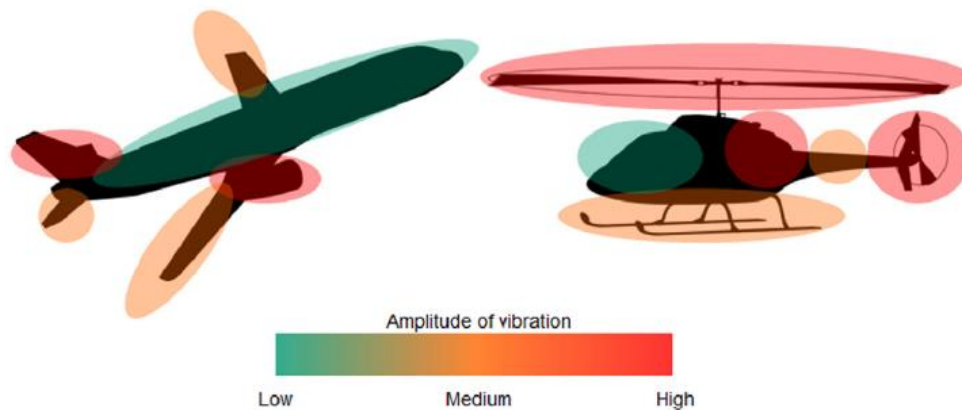
V předchozích kapitolách byl zmíněn význam senzorických systémů v kontextu CPS a DT, kdy senzory slouží jako jeden z prostředků pro sběr provozních dat z fyzických entit. Aby bylo možné naměřená data konfrontovat s výsledky simulací, je nutné porozumět fyzikálním principům, na kterých jsou dané senzory založeny, a najít způsob, jak tyto senzory realizovat ve výpočtových modelech daných struktur. Problematika týkající se výběru a využití senzorů bude v rámci této kapitoly demonstrována v kontextu leteckého průmyslu, konkrétně SHM leteckých konstrukcí, které je jednou ze zájmových oblastí řešených projektů na pracovišti.

Problematiku týkající se senzorů lze rozdělit do tří dílčích oblastí:

- Typ senzorů – analýza aktuálně dostupných senzorů pro měření mechanických vlastností (vibrací, deformace aj.) struktur, zohlednění jejich využitelnosti pro autonomní CPS systémy, nákladů atd.
- Rozmístění senzorů – zhodnocení přístupů pro nalezení vhodného počtu a rozmístění senzorů v rámci monitorovaných struktur, možnost integrování do kompozitních struktur
- Modelování senzorů – tvorba fyzikálních a výpočtových modelů senzorů pro potřeby implementace do výpočtových modelů tvořících digitální obraz fyzické struktury a pro transformaci měřených (elektrických) veličin v požadované mechanické veličiny

6.1 Problematika SHM leteckých konstrukcí

Monitorování stavu leteckých konstrukcí je velmi aktuálním tématem v leteckém průmyslu a je bezpodmínečně nutné k zajištění bezpečného provozu. Náklady na kontroly a údržbu tvoří velkou část celkových nákladů aerolinie, například pro letoun B757 dle ICAO [72], náklady na údržbu mohou dosahovat až 23 % provozních nákladů a 12 % celkových nákladů na provoz aerolinie. Doposud se převážná část údržby prováděla vizuální inspekcí jednotlivých komponent [73], avšak pro struktury vyrobené z kompozitních materiálů je tato kontrola velmi náročná a zpravidla nedostačující, protože nedokáže spolehlivě odhalit některá z možných selhání materiálu, například delaminaci [74]. Přestože v dohledné době nedojde k nahrazení standartních metod pro inspekci založených na vizuálních nebo nedestruktivních testovacích metodách, je snahou vyvíjet inovativní metody a technologie známé pod souhrnným názvem Structure Health Monitoring (SHM). Tyto metody by měly doplnit či v budoucnu nahradit tradiční metody a umožnit inspekci v místech, která nejsou snadno přístupná [75, 76], a jsou založeny na využití virtuálních modelů dílčích částí nebo celků letounů, Prvky konstrukce, které jsou vystaveny nejvyššímu časově proměnnému zatížení, jsou často lokalizovány blízko pohonů a pohyblivých částí, jak je naznačeno na obrázku níže.



Obrázek 39: Lokalizace mechanických vibrací v leteckých konstrukcích (převzato z [77])

V [75] je SHM definováno jako: „*SHM is the integration of sensing and possibly also actuation devices to allow the loading and damaging conditions of a structure to be recorded, analysed, localised and predicted in a way that non-destructive testing becomes an integral part of the structure.*“

Definice SHM uvedená výše naznačuje, že inovativní systémy pro testování konstrukce přispívají nejen k detekci, ale i predikci vzniku nežádoucích stavů. Idea autonomních monitorovacích systémů integrovaných přímo do letecké konstrukce je předmět zájmu vůdčích výrobců leteckých komponent, kteří do jejich vývoje investují značné množství prostředků. Dále je nutné vzít v potaz, že SHM vyžaduje, aby provozní zatížení a poruchy byly měřitelné, což klade značné nároky na volbu vhodných senzorů, a to především kvůli rozsáhlému využití kompozitních materiálů, u kterých na rozdíl od konvenčních kovových konstrukcí mohou poruchy probíhat uvnitř materiálu bez projevů na jejich povrchu.

Metodiku SHM lze rozdělit do dvou oblastí. První obsahuje metody založené na modelování dané struktury či procesů na ní probíhajících, ve kterých buď měníme parametry tak, aby se jejich odezva blížila odezvě reálné soustavy, nebo ve kterých predikujeme vliv odchylek mezi odezvami pro vyhodnocení pravděpodobnosti přítomnosti defektu. Mezi tyto metody patří například autoregresivní a průměrovací modely (ARMA), hidden Markov modely (HMM) a neuronové sítě (NN). Druhou skupinou jsou modely založené na extrakci a vyhodnocení příznaků⁴⁸ přítomných v signálu [78]. U komplexních struktur, u kterých je obtížná realizace dostatečně výstižných výpočtových modelů, převládá využití druhé skupiny SHM metod.

Protože výběr a aplikace senzorů a sestavení věrných výpočtových modelů hraje v SHM velmi důležitou roli, následující kapitola se zaměřuje na stručné shrnutí aktuálních poznatků v této problematice.

⁴⁸ Anglicky feature-based methods, jedná o metody využívající metriky získané ze signálů v časové oblasti (průměr, rozptyl, efektivní hodnota, šikmost, špičatost atd.), frekvenční oblasti (dominantní frekvence, modální tlumení, výkonová spektrální hustota atd.), časově-frekvenční oblasti (změny spektra v čase atd.) či dalších oblastech.

6.2 Senzory používané pro SHM

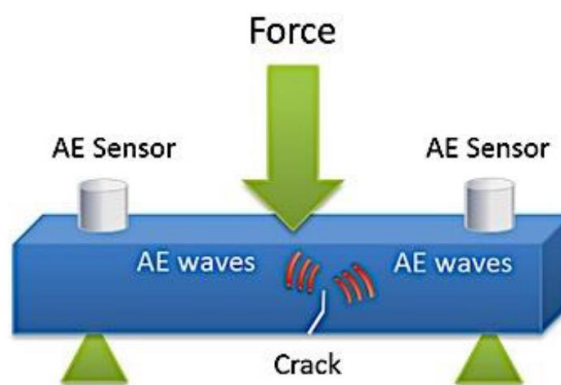
Vývoj inovativních metod pro SHM otevírá nové výzvy v oblastech měření projevů leteckých konstrukcí a zpracování signálů dynamických dějů probíhajících za provozu letadla, a rovněž podněcuje výzkum v oblasti návrhu sensorických sítí. V této kapitole budou stručně popsány fyzikální principy, na kterých jsou založeny méně známé přístupy pro měření vibrací, deformací a detekci a lokalizaci defektů u mechanických struktur. Nejvyužívanějšími přístupy jsou:

- Akcelerometry [23] – piezo a MEMS
- Tenzometry [79]
- Akustická emise
- Ultrasonic guided waves
- Optická vlánka
- Piezokompozitní senzory

Akcelerometrům a tenzometrům nebude v této kapitole věnována přílišná pozornost, protože jde o velmi rozšířené typy senzorů založených na známých fyzikálních principech.

6.2.1 Akustická emise

Přístup pomocí akustické emise je založený na monitorování akustických vln pomocí sítě akustických senzorů, které jsou připevněny na konstrukci letadla v místě zájmu. Je-li zaznamenána událost akustické emise, je uložena a dále zpracována pro určení místa a příčiny jejího vzniku. Tato technologie byla použita například pro testování konstrukce podvozků [80], nebo pro monitorování konstrukce ocasního křídla letounu Cessna T-303 [81]. Z podstaty této metody, která je založena na pasivním monitorování konstrukce, je vyhodnocení zaznamenaných signálů velmi komplikované a často téměř nemožné vzhledem k parazitním signálům a šumu generovaných konstrukcí během provozu. Touto metodou je možné monitorovat pouze relativně malé oblasti a vzhledem k nutnosti napájení akustických senzorů je rozsah možných aplikací značně omezen.

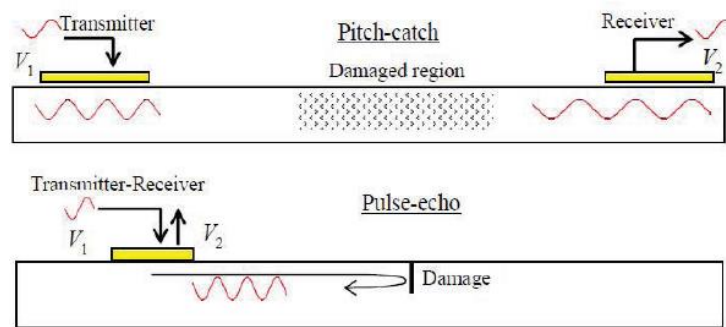


Obrázek 40: Princip akustické emise (převzato z [82])

6.2.2 Ultrasonic Guided Waves

Další z používaných neinvazivních přístupů detekce poškození je založen na propagaci speciálního typu ultrazvukových vln nazývaných Lambovy vlny povrchem konstrukce [83]. Tato metoda vyžaduje vždy alespoň dva piezoelektrické elementy známé pod

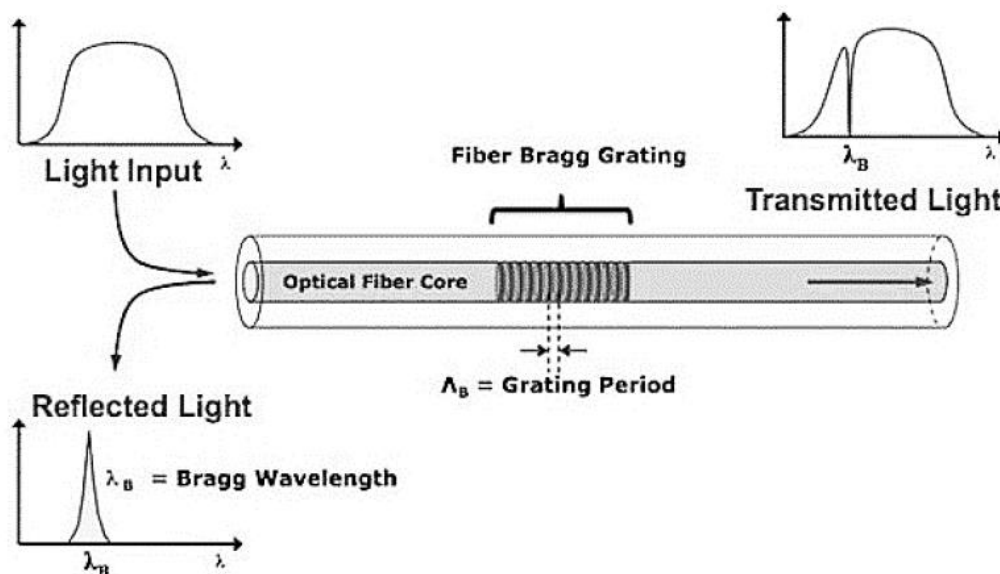
zkratkou PWAS (Piezoelectric Wafer Active Sensors) [84], z nichž jeden představuje generátor ultrazvukových vln a druhý jako senzor, síť je však zpravidla obsahuje větší množství elementů, což umožňuje přesnější lokalizaci místa vzniku poškození. Tato technologie byla tématem výzkumného projektu AISHA FP6 EU, který se zabýval monitorováním konstrukcí helikoptér typu MI-8 a letounů A320 [85]. Metoda byla dále využita pro detekci a lokalizaci rázů s kompenzací vlivů okolí, teploty a provozního zatížení [86]. Zásadním omezením této metody je možnost pokrytí pouze relativně malých oblastí a aplikace pro globální monitorování konstrukce je v podstatě nemožná. Rovněž je aplikace ze své podstaty vhodná spíše pro tenkostěnné prvky, jako například pláště, protože je schopná odhalit defekty jen v konečné hloubce.



Obrázek 41: Podstata SHM pomocí PWAS (převzato z [87])

6.2.3 Optická vlákna

Tato metoda pro SHM je založena na integraci speciálního typu optických vláken nazývaných Fiber Bragg Grating (FBG) do kompozitního materiálu konstrukce [88]. Tato vlákna slouží jako optické filtry a umožňují detekovat poškození konstrukce na základě spektrální analýzy optických signálů. Dle reference [89], AIRBUS oznámil svou dlouhodobou vizi týkající se implementace FBG do všech kompozitních konstrukcí u nově vyrobených letadel.



Obrázek 42: Podstata aplikace FBG (převzato z [89])

6.2.4 Piezokompozitní senzory přetvoření

Tyto senzory se skládají z tenkých piezokeramických vláken zalitých v epoxidové matrici⁴⁹, ke kterým jsou připojeny elektrody. Při deformaci se piezokeramická vlákna deformují a díky piezoelektrickému efektu na sobě generují náboj dle směru polarizace⁵⁰. Tyto senzory jsou komerčně dostupné skrze společnost Smart Material [90] (viz Obrázek 43). Detailnímu elektromechanickému popisu a potřebné elektroniky k jejich provozu byla věnována publikace [V12]. K jejich provozu není nutný žádný externí zdroj elektrické energie, a připojením vhodné elektroniky (nábojového zesilovače) lze zajistit, že generované napětí je přímo úměrné přetvoření, tedy zajistit funkci podobnou tenzometrům. V kontextu této kapitoly zabývající se vibrodiagnostikou lze tyto senzory obdobně v kapitole předchozí uvažovat jako *black box*.



Obrázek 43: MFC senzor přetvoření

6.3 Rozmístění senzorů

Jedním z prvních kroků při návrhu senzorických sítí je určení vhodného rozmístění senzorů, které by zajišťovalo dostatečnou citlivost k měření požadovaných veličin. Výběr vhodných míst se u jednoduchých struktur často opírá o základní fyzikální principy či zkušenosti z inženýrské praxe, u osazování existujících struktur i přístupnost daných míst, u struktur komplexních je však nutné implementovat přístup sofistikovanější. V případě měření vibrací se uvažují pouze nosné části konstrukce, které přenáší zatížení a ve kterých není přítomno vysoké tlumení, přičemž identifikaci těchto prvků zpravidla předchází výpočtové modelování této struktury. Řada aktuálně vyvíjených metod je určena pro aplikace v civilním inženýrství, kde je pomocí relativně malého množství senzorů nutné pokrýt rozsáhlé, často periodické struktury, kterými mohou být mostní konstrukce či budovy. Tyto metody lze úspěšně přenést do oblastí leteckého, obráběcího či transportního průmyslu, kde je rozsah měřených struktur menší, avšak základní principy zůstávají zachovány.

Pro dynamicky zatěžované soustavy se algoritmy pro určení optimálních míst mohou zakládat na nalezení modálních vlastností struktury a využití různých váhových funkcí, které jednotlivé odezvy kombinují. K tomu mohou sloužit metody hledající objektivní funkci pomocí MAC⁵¹, které kvantifikuje podobnost mezi jednotlivými módy struktury a lze je obecně definovat jako

$$MAC_{ij} = \frac{[\Phi_i^T \Phi_j]^2}{[\Phi_i^T \Phi_i][\Phi_j^T \Phi_j]} \quad (6.1)$$

⁴⁹ V angličtině zvaných macro-fibre composite sensors (MFC).

⁵⁰ Obvykle uvažujeme módy polarizace 33 (napětí ve směru zatížení) nebo 31 (napětí ve směru kolmém na směr zatížení).

⁵¹ Modal acquisition criterion.

kde Φ je modální matice. Příklad aplikace pro redukovaný model mostní konstrukce lze vidět například v publikaci [91]. Další z možných přístupů je založen na nalezení tzv. *Fisher information matrix* (FIM), ke které je vyžadován model systému a znalost nejistot měření [92]. Poslední z konvenčně využívaných přístupů se zakládá o nalezení informační entropie⁵², která poskytuje nejlepší informační bázi ve všech požadovaných aspektech (tj. při detekci různých poruch ve struktuře) [93]. Pro monitorování kompozitních konstrukcí existují další z možných přístupů zohledňující například komplexitu mechanismů poruch, náročnost výpočtových modelů a kombinaci různých typů senzorů, což detailně popisují autoři [94].

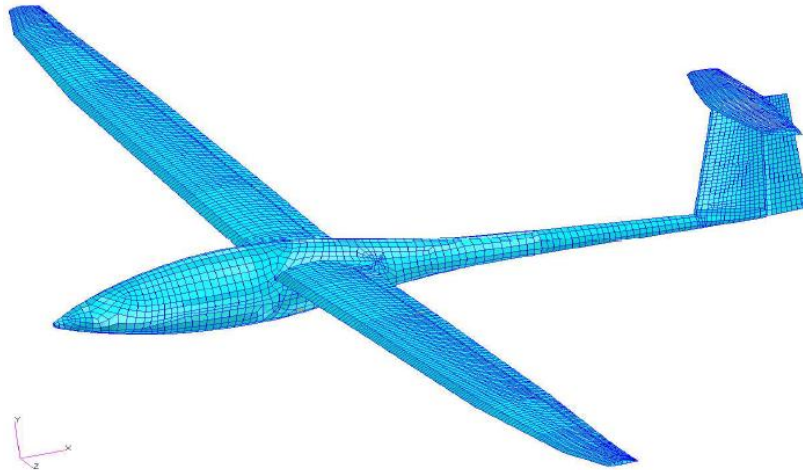
6.4 Výpočtové modelování leteckých konstrukcí

Je zřejmé, že jedním ze vstupů do algoritmů pro model-based SHM metody a určení vhodného počtu a rozmístění senzorů pro feature-based SHM metody je výpočtový model monitorované konstrukce. Popis a predikce dynamických vlastností leteckých konstrukcí je vzhledem k jejich komplexitě poměrně složitý problém, v porovnání s předchozí zájmovou oblastí týkající se obráběcích strojů výrazně náročnější na výpočetní výkon. Zatímco dynamické chování jednotlivých dílů konstrukce může být s relativně vysokou přesností modelováno pomocí metody konečných prvků, určení dynamického chování konstrukce jako celku je z hlediska přesnosti mnohem složitější problém. Jednotlivé díly leteckých konstrukcí jsou totiž často spojovány nerozebíratelnými spojovacími prvky (např. nýty), které se zpravidla studují samostatně v izolaci od svého okolí pomocí MKP a jejichž analýza vyžaduje značný výpočetní výkon. Uvážíme-li, že typická konstrukce malého letounu, např. Cessna 172, může obsahovat přes 50000 takovýchto spojů, tvorba výpočtového modelu celého letounu, který by byl schopen postihnout dynamické chování s dostatečnou přesností, je z hlediska výpočetní náročnosti téměř nemožná. Proto se často pracuje pouze se segmenty nebo se zjednodušenými modely klíčových (nosných) částí konstrukce, obdobně jako v případě obráběcích strojů (viz kapitola 5.2.6).

6.4.1 Modely vazeb

Modelování vazeb mezi konstrukčními prvky leteckých konstrukcí je velmi náročnou a obtížnou problematikou, která zpravidla vede na výrazné zjednodušení fyzikálních principů probíhajících ve vazbách. Zjednodušených modelů bylo například využito při aeroelastické analýze větroně, kde autoři využili skořepinového modelu a podrobili jej modální analýze [95]. Tento přístup umožňuje nahlížet na dynamické chování letecké konstrukce jako celku, avšak vzhledem k tomu, že neobsahuje žádné informace o jednotlivých dílech, spojích atd., je z tohoto důvodu nevhodný pro SHM.

⁵² Kvantifikovány pomocí tzv. information entropy index (IEI).

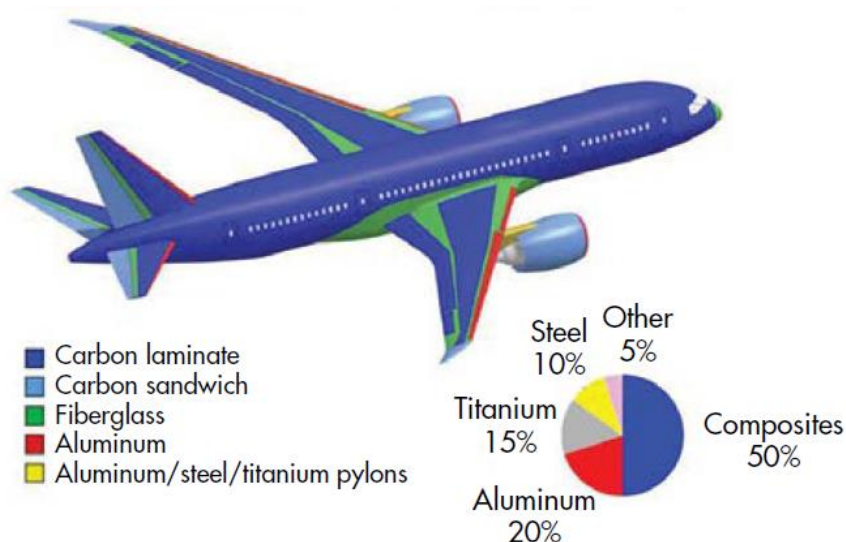


Obrázek 44: Strukturální model větroně s použitím skořepinových prvků (převzato z [95])

Vliv nelinearit způsobených spojováním jednotlivých dílů byl analyzován například v [96], kde autoři předpokládali koncentraci nelinearit v okolí spojů a vyvinuli matematickou teorii, která by byla schopna tyto nelinearity zohledňovat v rámci celé konstrukce. Nelineární spojovací prvky modelovali v prostředí MSC NASTRAN pomocí prvků s multilineární tuhostní charakteristikou namísto běžně používaných prvků s charakteristikou lineární.

6.4.2 Konstitutivní modely materiálů

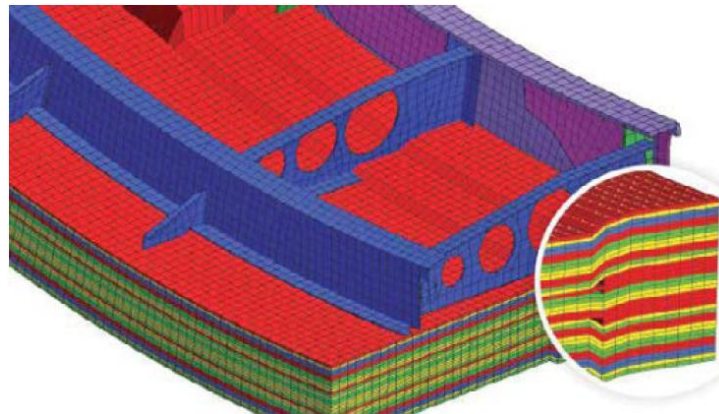
Dalším problémem při modelování leteckých konstrukcí jsou materiálové vlastnosti jednotlivých komponent, jelikož u moderních letadel je téměř 50 % celé konstrukce vyrobeno z kompozitních materiálů [97].



Obrázek 45: Zastoupení materiálů použitých v konstrukci letadla (převzato z [97])

U hliníkových či ocelových konstrukcí je často dostačující lineárně izotropní konstitutivní model materiálu definovaný pomocí dvou nezávislých materiálových parametrů (Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla). U kompozitních materiálů jsou tyto

konstitutivní modely nedostačující a je nutné použít obecně anizotropních modelů, kde však počet nezávislých materiálových parametrů dosahuje až 36 [98]. Určení těchto materiálových konstant a jejich implementace do výpočetních softwarů je samo o sobě velmi náročné ^[91]. U vícevrstvých kompozitů (viz Obrázek 46) je rovněž nutné zohledňovat délku, orientaci a rozložení vláken, čehož lze dosáhnout buď použitím vrstvených modelů skořepinových prvků, nebo pomocí objemových prvků (viz Obrázek 46). V porovnání s klasickými kovovými materiály jsou u kompozitních materiálu hůře predikovatelné možné mezní stavy a poruchy, které mohou nastat vlivem cyklického či rázového zatížení.

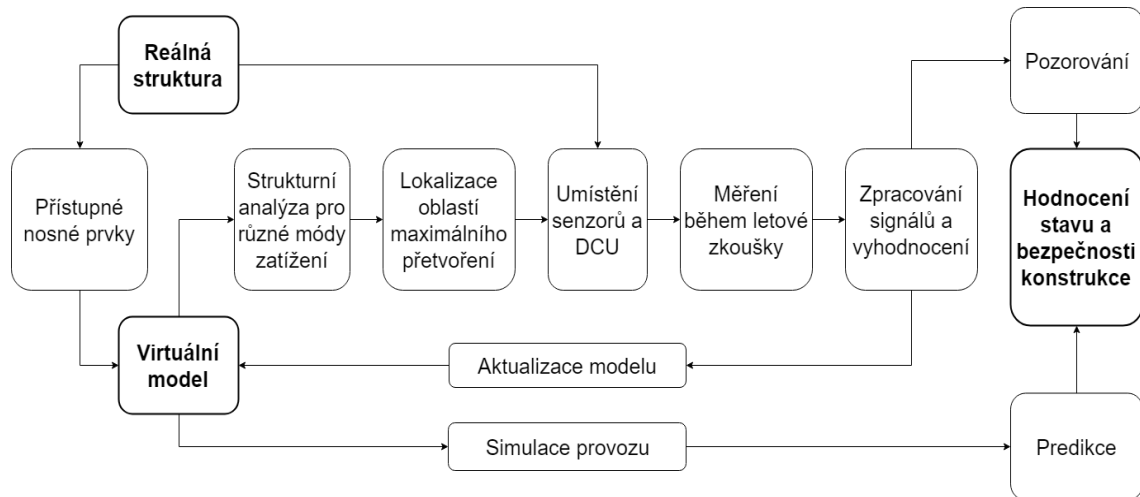


Obrázek 46: Výpočtové modelování kompozitního materiálu (převzato z [97])

Kompozitní materiály rovněž představují komplikaci v oblasti detekce poruch a vad, jelikož mechanismů porušení je v porovnání s kovovými materiály celá řada [100]. Mnoho z nich nastává uvnitř kompozitu bez jakýchkoli projevů na jejich povrchu, a jejich detekce je tedy ovlivněna umístěním a typem použitých senzorů. Integrace senzorů dovnitř kompozitu se může jevit jako možné řešení, jejich přítomnost mezi vrstvami však představuje potenciální místo vzniku poruchy a pro mnohé z výše uvedených fyzikálních principů není možné senzory kvůli jejich rozměrům dovnitř kompozitu integrovat.

6.5 Realizace CPS

Tato zájmová oblast byla zaměřena na návrh a aplikaci nových metod na monitorování vibrací v leteckých konstrukcích s cílem detekovat a případně i předvídat vznik nežádoucích provozních stavů. Metody založené na akustické emisi, optických vláknech nebo UGW popsány v kapitole 6 jsou určeny především pro detekci trhlin v malé, předem specifikované oblasti, a jsou značně limitující pro monitorování globálních projevů konstrukce. Navíc kvůli nízké odolnosti vůči šumu u nich zajištěna dostatečná přesnost za reálného provozu, proto se jejich aplikace často omezují na laboratorní podmínky. S ohledem na jejich využití v rámci konceptu autonomních sensorických uzlů je nutné zohlednit i nutnost externího napájení a jejich energetickou náročnost, z tohoto důvodu byla pozornost věnována především MFC senzorům, u kterých tyto limitace nejsou. Schematický popis jeho realizace znázorňuje Obrázek 47, přičemž tato kapitola se zaměřuje především na část týkající se realizace CPS, tj. strukturní analýzy a lokalizace míst pro senzory, jejich instalace a záznam dat během letové zkoušky.



Obrázek 47: Schéma dílčích kroků při realizaci CPS pro vibrodiagnostiku letounu

V publikaci [V10] byla studována problematika aplikace piezoelektrických senzorů jako přímých aktivních senzorů pro snímání vibrací v letecké konstrukci. Použití sítě MFC senzorů umožňuje pozorovat konstrukci jako celek, a na základě vyhodnocení naměřených dat rozlišit mezi běžnými provozními a nežádoucími projevy. Pro účely tohoto výzkumu byl leteckým ústavem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně poskytnut letoun Cessna 172 (viz Obrázek 48). Možnost instalace senzorů přímo do letounu představovala velmi vzácnou příležitost, protože v leteckém průmyslu je obvyklé, že jakémukoli zásahu do konstrukce (i neinvazivnímu) předchází rozsáhlý a časově náročný proces certifikace.



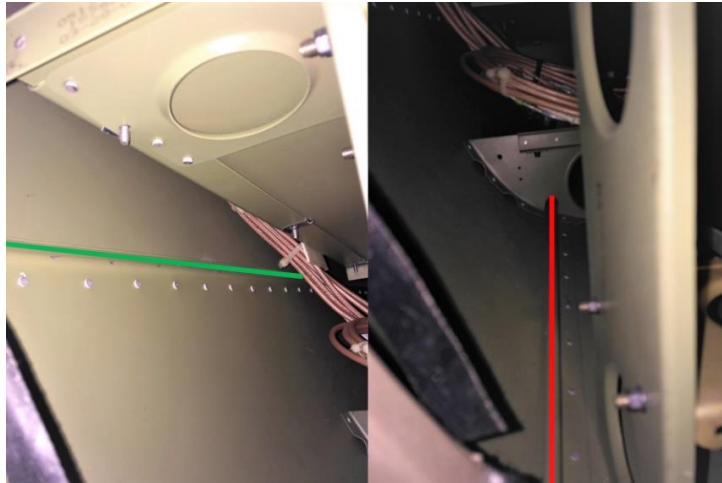
Obrázek 48: Fotografie letounu Cessna 172

V rámci probíhající výzkumné činnosti bylo cílem navrhnout a realizovat CPS systém založený na využití aktivních MFC senzorů, který by byl schopen měřit a zaznamenávat vibrace letounu za provozu. Výsledky této činnosti byly publikovány v impaktovaném časopise Measurement v rámci příspěvku [V10] a v kontextu této kapitoly budou demonstrovat především možný přístup při výběru vhodných rozmístění senzorů a zhodnocení využitelnosti MFC jako základního stavebního prvku CPS určeného pro SHM aplikace v letectví.

6.5.1 Lokalizace míst pro senzory

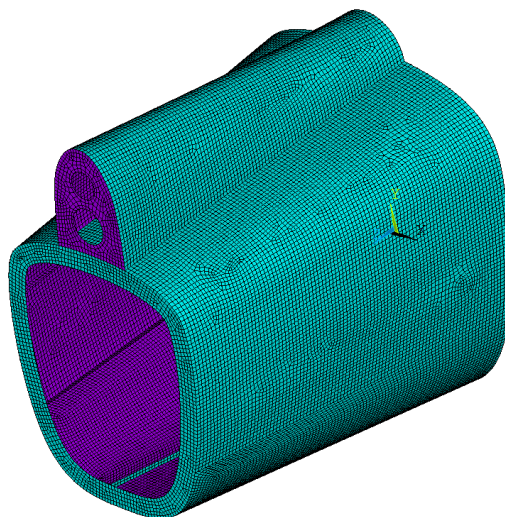
V prvním kroku je sestaven výpočtový model vybrané části trupu letounu, která je přístupná ze zavazadlového prostoru pilotní kabiny a popřípadě z obslužných dvířek umístěných v zadní části trupu letadla. Piezokompozitní senzory jsou citlivé na deformaci

typu tah / tlak, proto je vhodné je umístit na nosné části konstrukce, v případě letounu Cessna 172 jde především o stringery v trupu letadla, které jsou realizovány zahnutím přeplátovaných plechů v místě nýtových spojů (viz Obrázek 49).



Obrázek 49: Fotografie vnitřní části trupu letounu Cessna 172 (levá: zeleně stringer s L profilem, pravá: červeně stringer s C profilem)

Vybraná sekce trupu měla délku 0,9 m a bylo nutné blíže specifikovat vhodné pozice senzorů, ve kterých by byla zajištěna citlivost na všechny módy zatížení (tah, ohyb, krut). Na základě velmi strohé výkresové dokumentace a vlastně provedených měření byl vytvořen přibližný geometrický model sekce trupu a následně byl vytvořen výpočtový model pomocí MKP (viz Obrázek 50).



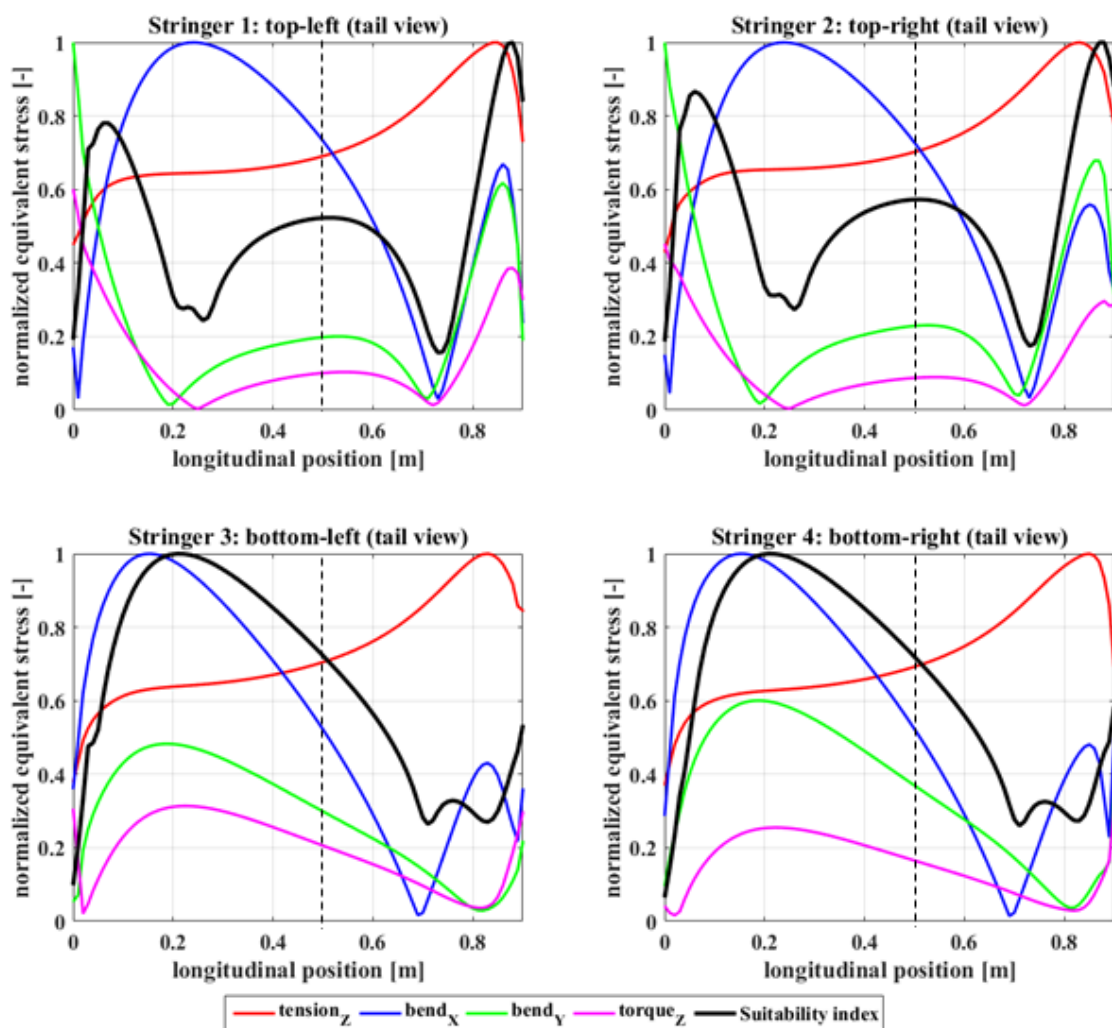
Obrázek 50: MKP model části trupu letadla Cessna 172

V simulaci byly uvažovány čtyři možné módy zatížení: tah ve směru osy Z, ohyb okolo osy X, ohyb okolo osy Y a krut okolo osy Z. Vzhledem k absenci přesných podkladů pro sestavení výpočtového modelu nebyly k lokalizaci využity sofistikované metody uvedené v kapitole 6.3, ale byl využit přístup založený na maximalizaci citlivosti senzorů pro všechny základní módy zatížení zavedené na vybraný segment trupu. Vypočítané

hodnoty von Misesova napětí byly využity pro výpočet bezrozměrného indexu dle rovnice (6.2)

$$\text{suitability index} = \frac{\prod_{i=1}^4 \sigma_{norm,i}}{\max \prod_{i=1}^4 \sigma_{norm,i}} \quad (6.2)$$

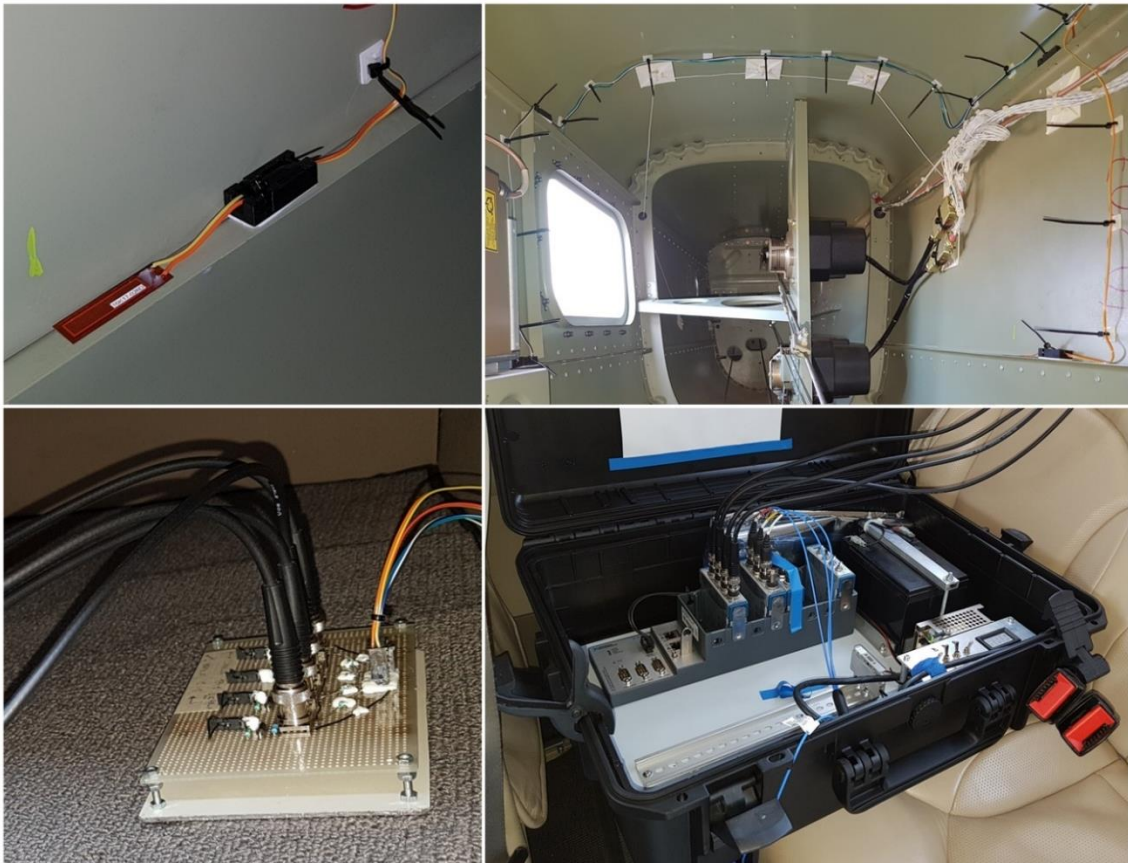
kde $\prod_{i=1}^4 \sigma_{norm,i}$ představuje geometrický průměr hodnot redukovaného napětí po délce i -tého stringeru. Hodnoty indexu se pohybovaly v rozmezí $0 \div 1$, kdy vyšší hodnota znamená lepší vhodnost pro umístění senzoru. Hodnoty redukovaného napětí a indexu znázorňuje Obrázek 51, přičemž byla při zohlednění dostupnosti pro potřeby instalace skrze servisní dvířka zvolena pozice 0,5 m od ocasního žebra (Obrázek 51, černá přerušovaná čára).



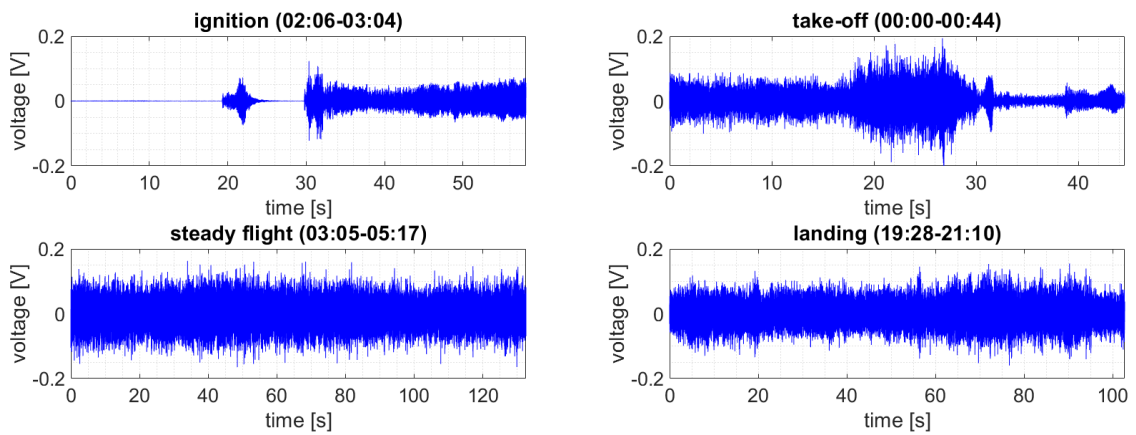
Obrázek 51: Lokalizace vhodných míst pro MFC senzory na jednotlivých nosných prvcích (publikováno ve [V10])

6.5.2 Instalace MFC a letová zkouška

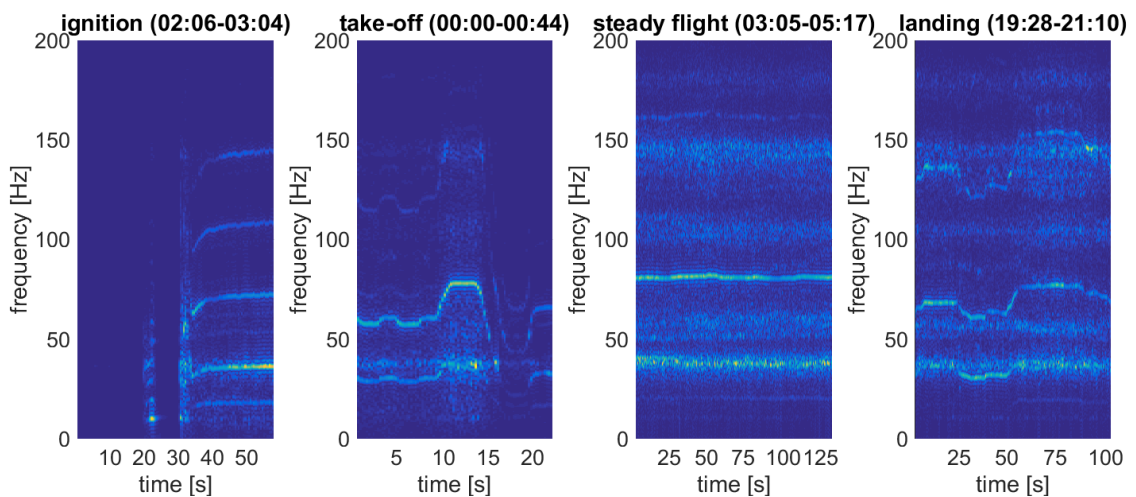
Do výše předurčených pozic byly nalepeny MFC senzory připojené skrze variabilní odporový dělič a přepětovou ochranu připojeny k mobilní DAQ ústředně (viz Obrázek 52), konkrétně k napěťové kartě NI 9234 použité v předcházejících experimentech na vertikální frézce. Funkčnost senzorů a měřicího řetězce byla ověřena v rámci letové zkoušky, během které probíhal manuální záznam dat ve zhruba jeden až dvouminutových segmentech. Napěťová odezva senzorů ze čtyř vybraných charakteristických fází letu znázorňuje Obrázek 53. Je nutné podotknout, že uvedená napěťová odezva byla za napěťovým děličem s poměrem 1:17, napětí přímo na senzorech tedy během těchto fází letu dosahovalo špičkových hodnot okolo 3 V.



Obrázek 52: Instalace MFC do trupu letadla, vlevo nahoře: detail na senzor, vpravo nahoře: pohled na stringery osazené senzory, vlevo dole: odporový dělič a přepětová ochrana, vpravo dole: DAQ ústředna



Obrázek 53: Napěťová odezva MFC umístěných na stringerech letadla, časová oblast (publikováno ve [V10])



Obrázek 54: Napěťová odezva MFC umístěných na stringerech letadla, časově-frekvenční oblast (publikováno ve [V10])

Dalo se předpokládat, že dominantní zdroj vibrací představoval především čtyřválcový spalovací motor⁵³, potvrdilo vykreslením odezvy v časově-frekvenční oblasti (Obrázek 54), kde si lze povšimnout viditelných vodorovných křivek odpovídajících základní otáčkové frekvenci motoru, tj. pro klidný let cca 40 Hz (2400 otáček za minutu), a její násobky způsobené pohybem jednotlivých válců a dalších pohyblivých částí motoru. Lze si rovněž všimnout, že v některých fázích letu převládá dvojnásobek otáčkové frekvence, což můžeme přisuzovat především vibracím způsobeným pohybem dvoulisté vrtule.

6.6 Konfrontace poznatků

V této kapitole byl představen koncept CPS pro vibrodiagnostiku v leteckých aplikacích, které jsou schopny poskytovat digitální informace o provozních vibracích konstrukce. Hlavní úlohou při realizaci CPS je lokalizace nosných částí konstrukce pro umístění senzorů, dále pak výběr vhodné technologie senzorů a jejich implementace do senzorické

⁵³ Poskytnutý letoun Cessna byl osazen motorem LYCOMING IO-360-L2A s pevnou dvoulistou vrtulí.

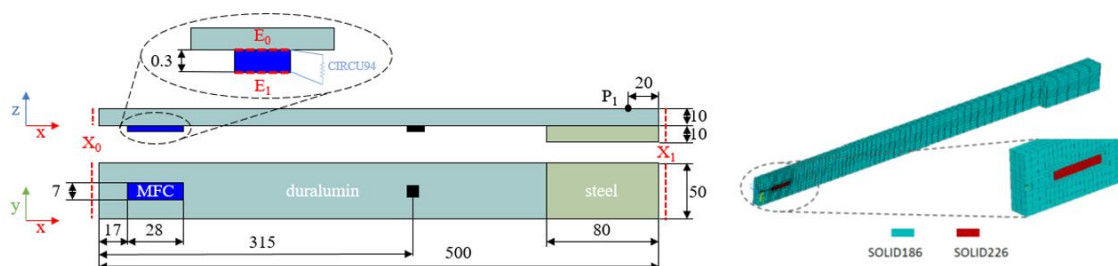
sítě tvořící jádro CPS. S ohledem na nově se vyvíjející SHM technologie v letectví, především pak tzv. *smart skin* a senzory integrované do kompozitních konstrukcí, byly zvoleny aktivní MFC senzory, které dokáží fungovat bez nutnosti vnějšího napájení a jejichž rozměr a citlivost na mechanické namáhání představují hlavní výhody pro aplikace v těchto oblastech. Pro potřeby vibrodiagnostiky, obdobně jako v kapitole 5.3.1 týkající se měření vibrací na vertikální frézce, nebylo zcela nutné chápat, jaká je závislost mezi generovaným napětím a přetvořením podkladné struktury. Na měřené signály tedy bylo doposud nahlíženo především z kvalitativního hlediska, protože je však motivací v budoucnu integrovat MFC senzory do výpočtových modelů a využívat CPS pro aplikace, ve kterých je cílem získat informace o deformaci struktury, další činnost byla věnována výpočtovému modelování komplexní struktury MFC a jejich fyzikálnímu popisu.

7. MODELOVÁNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH VRSTEV

Jak bylo demonstrováno na předchozích příkladech aplikací, piezoelektrické vrstvy představují jádro navržených CPS systémů pro monitorování mechanických vibrací. Přestože v těchto aplikacích postačovalo chápat senzor jako *black box*, u kterého máme na vstupu mechanické vibrace a na výstupu elektrické napětí, v navazujících aplikacích, které zachází do oblastí CM, SHM a PM, to již není dostačující a je nutné porozumět fyzikálním principům popisujícím chování MFC.

7.1 Začlenění MFC do výpočtových modelů

Komplexní struktura MFC, sestávající se z tenkých piezokeramických vláken, epoxidové matrice, měděných elektrod a ochranných vrstev z kaptonu, představuje z hlediska výpočtového modelování hlavní překážku. U PZT plátů, jejichž homogenní struktura lze poměrně jednoduše realizovat v MKP modelu například pomocí SOLID 226⁵⁴ prvků, jak bylo publikováno ve [V11], v případě MFC to není jednoduše možné kvůli kombinaci mnoha materiálů v rámci komplexní a nehomogenní elektromechanické struktury. To lze vyřešit například přístupem založeným na homogenizaci, kterému byla věnována diplomová práce [101] a publikace [V9]. Homogenizovaný model MFC pak lze integrovat do výpočtového modelu obdobným způsobem, jako v případě PZT (viz Obrázek 55).

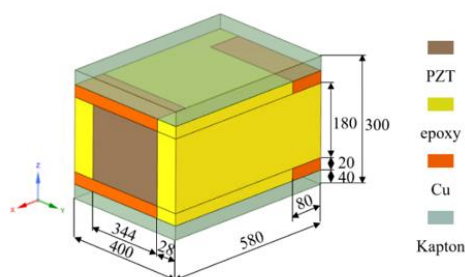


Obrázek 55: Implementace MFC ve formě homogenizovaného modelu do MKP modelu (publikováno ve [V9])

Homogenizovaný model reprezentuje komplexní strukturu MFC jako jedinou vrstvu homogenního materiálu s ekvivalentními elektromechanickými vlastnostmi. Tyto nové materiálové vlastnosti jsou určeny na základě simulací odezvy na různé módy zatížení aplikované na reprezentativní periodickou elementární buňku struktury (viz Obrázek 56). Těmito vlastnostmi jsou Youngův modul pružnosti, Poissonův poměr, relativní permitivita a piezoelektrické nábojové koeficienty⁵⁵ d_{31} a d_{33} .

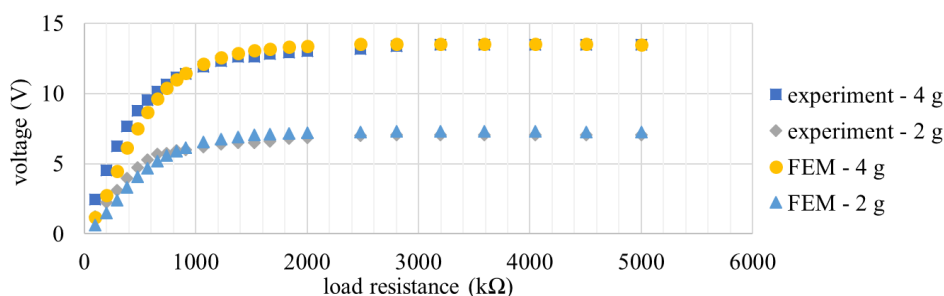
⁵⁴ SOLID 226 jsou 20-uzlové prvky spadající do kategorie tzv. *coupled-field solid* prvků, kombinující nejen mechanické, ale i elektromagnetické, piezoelektrické, termoelektrické a další fyzikální principy.

⁵⁵ Anglicky piezoelectric charge coefficient [pC/N] je charakteristická elektromechanická konstanta udávající míru změny generovaného náboje v závislosti na zavedené síle, přičemž indexy 31 a 33 odpovídají módu polarizace piezokeramiky.



Obrázek 56: Reprezentativní buňka MFC senzoru (rozměr v μm , publikováno ve [V9])

Výsledky homogenizace byly verifikovány s použitím experimentální soustavy sestávající se z vetknutého nosníku s MFC senzorem umístěným u jeho vetknutí. Byl sestaven MKP model této soustavy s implementovaným homogenizovaným modelem MFC, u nějž byla měřena elektromechanická odezva na harmonické buzení, přičemž bylo dosaženo velmi uspokojující shody mezi odezvou na reálné soustavě a výsledky simulací (viz Obrázek 57). Maximální odchylka pro různé velikosti odporové zátěže, frekvence a amplitudy buzení dosahovala maximálně 5%, a to především v přechodových oblastech.



Obrázek 57: Srovnání odezvy MFC ze simulace a experimentu, frekvence buzení 19,8 Hz (publikováno ve [V9])

7.2 Fyzikální interpretace odezvy MFC

Aby bylo možné využít MFC senzory pro snímání mechanických veličin je nutné najít matematický popis, který by vhodně a s dostatečnou přesností dokázal popsat mechanismus generování elektrického napětí na MFC senzoru podrobenému mechanickému namáhání. Protože se jedná o kompozitní materiál, problematika sestavení konstitutivního modelu materiálu (z mechanického a elektromechanického hlediska), jak již bylo naznačeno v kapitole 6.4.2, je velmi obtížný problém díky obecně anizotropním vlastnostem.

V případě MFC si lze problém zjednodušit zavedením předpokladu, že jeho chování v pracovní oblasti je lineární a že jeho elektrická odezva je citlivá především na zatížení v podélném směru (ve směru vláken). Za těchto předpokladů byly pro lineární piezoelektrický materiál namáhaný prostým tahem v publikaci [V7] odvozen tvar základních elektromechanických rovnic (7.1) a (7.2)

$$\varepsilon_x = S_{11}^E \sigma_x + d_{31} E_z \quad (7.1)$$

$$D_z = d_{31} \sigma_x + \epsilon_{33}^T E_z \quad (7.2)$$

ve kterých ε_x představuje podélnou složku přetvoření, S_{11}^E prvek tenzoru poddajnosti, σ_x podélnou složku napětí, d_{31} piezoelektrický nábojový koeficient, E_z složku vektoru intenzity elektrického pole, D_z složku vektoru elektrické indukce a ε_{33}^T složka tenzoru permitivity. Z těchto rovnic byla odvozena obecná závislost napětí na přetvoření pro MFC senzor polarizovaný ve směru 31, jejíž výsledný tvar je

$$\varepsilon_x(t) = \frac{1}{e_{31}LB} \left(\frac{1}{R_L} \int_0^t U(t) dt + C_{MFC} U(t) \right) \quad (7.3)$$

a ve kterém $\varepsilon_x(t)$ představuje časový průběh přetvoření v podélném směru, e_{31} je piezoelektrický modul definovaný jako součin modulu pružnosti a piezoelektrického nábojového koeficientu, L a B jsou rozměry aktivní plochy MFC senzoru, R_L je hodnota připojené odporové zátěže, C_{MFC} je kapacita MFC senzoru a $U(t)$ je časový průběh napětí generovaném na MFC senzoru.

Jak je možné si všimnout, generované napětí je závislé nejen na velikosti změny přetvoření, ale i přímo na přetvoření skrze hodnotu kapacity C_{MFC} . Příspěvek této složky je však relativně malý, protože kapacita MFC senzoru se v závislosti na velikosti senzoru pohybuje v řádu desítek až stovek nF a začne se projevovat až při výrazném zvyšování odporové zátěže. Odporová zátěž je zpravidla tvořena vstupní impedancí měřicí karty⁵⁶, avšak nemusí být vždy konstantní a může být rovněž nahrazena obvody s proměnnou impedancí. Příkladem může být nábojový zesilovač, který využívá operačního zesilovače s nízkosvodovým kondenzátorem, který dokáže uchovat generovaný náboj po dobu jednotek až desítek minut a umožňuje využití MFC senzorů na měření statického přetvoření, podobně jako tenzometry.

V kontextu této práce byly doposud využívány komerčně dostupné MFC senzory, ale vzhledem k dostupnosti piezokeramických vláken, které tvoří aktivní část MFC senzoru, je možné vyrobit senzory na míru zvolené aplikaci, například je integrovat přímo mezi vrstvy kompozitní struktury nebo jimi pokrýt povrch vybrané strojní součásti. Strojní součást osazenou sensorickými systémy, které jsou schopny automatizovaně poskytovat digitální informace z provozu lze chápat jako formu CPS systému. Tato myšlenka byla formulována v rámci patentu (užitého vzoru) s názvem „Snímací vrstva pro strojní součásti“, ve kterém jsou kombinovány výše uvedené poznatky týkající se piezokompozitních snímacích vrstev a metodiky CPS pro využití při tvorbě tzv. chytrých strojních součástí [UV1].

⁵⁶ Například v případě dříve uvedené napěťové karty NI 9234 je tato hodnota 305 kΩ.

8. CPS PRO MONITOROVÁNÍ ŽELEZNIC

Poslední aktuální zájmovou oblastí, ve které je aplikována (a rozšířena) metodika popsaná v předchozích kapitolách, je tvorba CPS pro monitorování železnic. Zajištění bezpečnosti provozu, detekce a predikce vzniku defektů, které by mohly mít za následek zrychlenou degradaci jednotlivých kolejových a vlakových systémů, je velmi aktuální téma v kontextu moderního železničního průmyslu. Existují desítky možných defektů a poruch, které mohou v kolejišti či na vlcích nastat, jak popisují autoři [102], avšak i v dnešní moderní době je řada z nich odhalena pouze občasnými vizuálními inspekcemi. K využití metod CM, SHM a PM je však nutné mít k dispozici nemalé množství dat o dostatečné přesnosti, pomocí kterých by mohly být monitorovány provozní vlastnosti a odhalena přítomnost či iniciace defektů, poruch či vnějších událostí ovlivňujících bezpečnost provozu (pád stromu, sesuv půdy, havárie na infrastruktuře atd.). Aktuálně využívané přístupy pro detekci defektů popisuje autor [103], přičemž z hlediska umístění měřicích systému se v současnosti využívají dva přístupy, v kolejišti (wayside) [104] nebo na vlcích (onboard) [105]. Retrofitting všech vlaků moderními snímacími systémy je velmi nákladný a logisticky náročný proces, přičemž není zcela jasně zajištěno, že tyto systémy budou dostatečně citlivé na změny probíhající v kolejišti. Naopak wayside systémy jsou komerčně dostupnější, levnější a jednodušeji realizovatelné, avšak aktuálně využívaná řešení zpravidla z hlediska provozu neposkytují příliš informací o stavu kolejiště či projíždějících vlcích, ale slouží pouze jako reaktivní systémy, jejichž úkolem je zabránit nadměrnému poškození trati vlivem defektů přítomných na vlcích.

S využitím metodiky tvorby DT a CPS systémů popsané v této práci, a poznatků z předchozích aplikací v leteckém a obráběcím průmyslu, byl navržen, aplikován a otestován systém pro monitorování železnic, který na základě měření vibrací poskytuje informace o provozních parametrech a je dostatečně citlivý na přítomnost defektů.

8.1 První realizace CPS

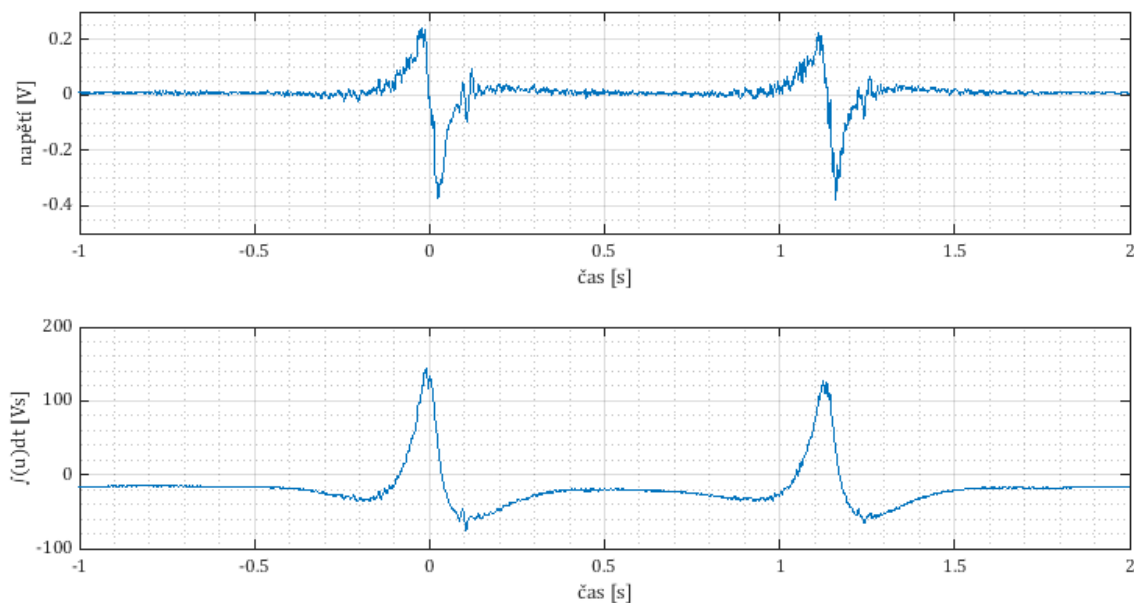
První otestování konceptu proběhlo v roce 2019 aplikací na lokální železnici v České republice, kdy bylo cílem ověřit citlivost MFC senzorů na průjezd vlaku, navrhnout jejich vhodné rozmístění a otestovat elektrické zapojení při připojení v měřicí kartě. Stejně jako u předchozích dvou aplikací na obráběcím stroji a v letectví, ve výchozí formě se jednalo o snímací systém, který skrze měření vibrací dokáže poskytovat užitečné informace v digitální formě, což lze s ohledem na definici uvedenou v kapitole 3.5 považovat za základní podobu CPS, jehož jádrem je právě snímací piezoelektrický prvek.

Instalace proběhla ve dvou lokalitách (viz Obrázek 58), ve kterých byly využity MFC senzory přetvoření (mód 31 a 33, dále využíván pouze mód 31) připojené k měřicímu aparátu od NI (viz Obrázek 52 vpravo dole) s předřazenou odporovou zátěží. V době instalace zatím nebyly dostupné metody pro přepočítání elektrického napětí na přetvoření popsané v kapitole 7.2, proto bylo nahlíženo pouze na surové napětí (případě jeho numerickou integraci v čase).



Obrázek 58: První instalace MFC na železniční trať, vlevo první lokalita v roce 2019, vpravo druhá lokalita v roce 2020

Naměřený průběh napětí (Obrázek 59) kvalitativně odpovídal průběhu očekávanému, kdy při přiblížení kola k senzoru dochází k jeho nárůstu a po přejezdu k poklesu. Odtížením kolejnice vzniká deformace v opačném směru, čehož si lze všimnout na mírném nárůstu napětí při projetí kola. Protože hlavním příspěvkem do napěťové odezvy je změna deformace, integrací jsme byli schopni získat charakteristický průběh přetvoření⁵⁷ (pouze z hlediska tvaru), který je uveden například v [103] na straně 39, přičemž je viditelné zmíněné charakteristické zvlnění před a po průjezdu jednotlivých náprav.



Obrázek 59: Napěťová odezva MFC při průjezdu dvounápravového vozu

Je zřejmé, že pouhou integrací jsme schopni získat velmi věrný průběh přetvoření kolejnice při přejezdu nápravy, avšak v tuto chvíli nelze přetvoření kvantifikovat a MFC je stále chápáno jako black box. Dále je nutné podotknout, že měření probíhalo manuálně

⁵⁷ Zda-li je hlavní vrchol v kladných či záporných hodnotách záleží na umístění senzoru vzhledem k neutrální ose kolejnice, a také, zda-li považujeme za kladný tah či tlak.

bez jakékoli automatizace z hlediska záznamu či ukládání dat. Fyzikální interpretace byla zavedena až v následující aplikaci realizované v roce 2021, kdy byl vytvořen a nainstalován CPS v podobě IoT zařízení na obslužnou trať jedné z průmyslových oblastí v České republice.

8.2 IoT řešení monitorovacího systému

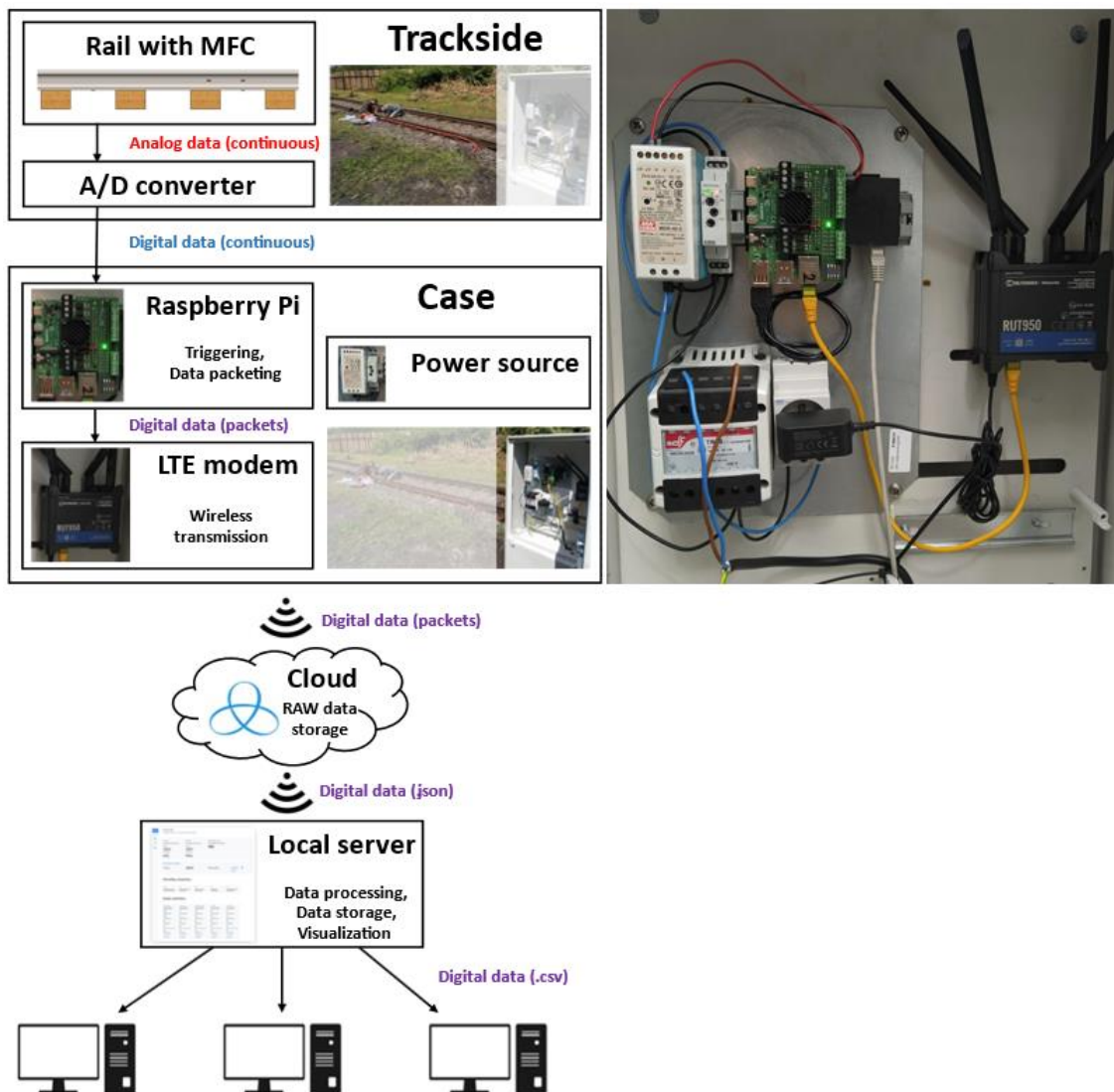
Po ověření funkce základní formy CPS systému byly formulovány další požadavky, které by umožnily jeho transformaci do IoT řešení, konkrétně:

- Automatizovaný provoz – záznam, předzpracování a odeslání dat.
- Sběr dat v reálném čase.
- Bezdrátové odesílání dat.
- Cloudové řešení ukládání dat, připojení k lokálnímu serveru pro jejich distribuci, zpracování a vizualizaci skrze aplikaci.
- Možnost osazení v libovolném místě železnice, škálovatelnost a robustnost.

Schéma hierarchie navrženého a realizovaného IoT systému znázorňuje Obrázek 60, přičemž detailnímu popisu jednotlivých částí a výsledků provozu byla věnována publikace [V1].

Ve srovnání s předchozím řešením je CPS systém se 4 MFC senzory rozšířen o A/D převodník přímo v místě kolejiště. a to především z důvodu snížení vlivu šumu generovaného silným elektromagnetickým polem při průjezdu vlaku⁵⁸. Z převodníku jsou digitální data v kontinuálním režimu předávána Raspberry Pi modulu, který je průběžně ukládá a přepisuje v bufferu. Pokud je překročena předem nastavená hranice napětí, započne záznam, který je ukončen až v případě, klesne-li úroveň signálu pod tuto úroveň po dobu několika sekund. Finální paket dat pro daný průjezd vlaku se pak skládá z 2 s záznamu před překročením prahové hodnoty, vlastního průjezdu vlaku a 10 s záznamu po průjezdu vlaku. Tato data jsou zapouzdřena a automaticky odeslána pomocí LTE modemu na vzdálené Cloud úložiště, kde jsou uložena a zálohována. Lokální server si pomocí unikátního hardwarového identifikátoru senzorického systému vyžádá skrze trvale běžící aplikace data z Cloudu a ve formátu .json je převezme pro další zpracování a vizualizaci.

⁵⁸ To má při nedostatečném ošetření za následek vznik složek v signálu s nenulovou střední hodnotou, která způsobuje problémy s při numerické integraci. Částečně lze tento problém eliminovat v postprocessingu vhodnou filtrací či použitím pokročilejších algoritmů numerické integrace, např. Simpsonova 1/3 a 3/8 pravidla namísto standartního trapézového, ale nikdy ne zcela odstranit. Proto je lepší adresovat tento problém hardwarově.



Obrázek 60: Schéma IoT senzorského systému pro monitorování železnic, vpravo detail hardwarové části (publikováno ve [V1])

Skrze grafické webové rozhraní⁵⁹ (viz Obrázek 61) mají pak uživatelé s uděleným přístupem možnost na data nahlížet, stáhnout je buď přímo, nebo pomocí příkazové sady pro Python a Matlab, a v neposlední řadě vizualizovat provozní parametry (přetvoření, špičky zatížení náprav, odhad maximálního mechanického napětí v kolejnici atd.). Rovněž je možné sledovat statistiky průjezdů, Server slouží jako platforma pro integraci dalších aplikací, pokročilých algoritmů pro zpracování signálu a jejich vyhodnocení pro potřeby CM, SHM, případně PM.

⁵⁹ Je nutné podotknout, že webové rozhraní nebylo vytvořeno autorem této práce.

Thursday
09/01/2022

Reload

Train passes schedule

00:00	00:09	00:24	2 train passes
02:00	02:12		1 train passes
03:00	03:14		1 train passes
06:00	06:31		1 train passes
08:00	08:17		1 train passes
10:00	10:02		1 train passes
12:00	12:28	12:36	2 train passes
14:00	14:05	14:39	2 train passes
15:00	15:36	15:53	2 train passes
17:00	17:30		1 train passes
20:00	20:29		1 train passes

Data analysis

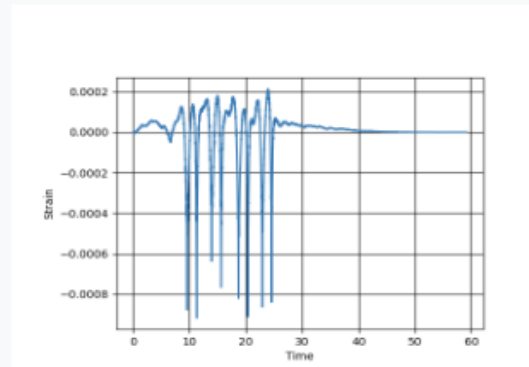
Id for data download is: 63101532189a6fba3c71fd72
Data processing is requested (at 09/26/2022 09:15:14)

Reload

Available channels data -

Channel number	3
Total time of train passing	59.15 s
Is strain computation successful?	True
Is train speed computation successful?	True
Maximal stress	44.88603339995457 MPa

Graphs

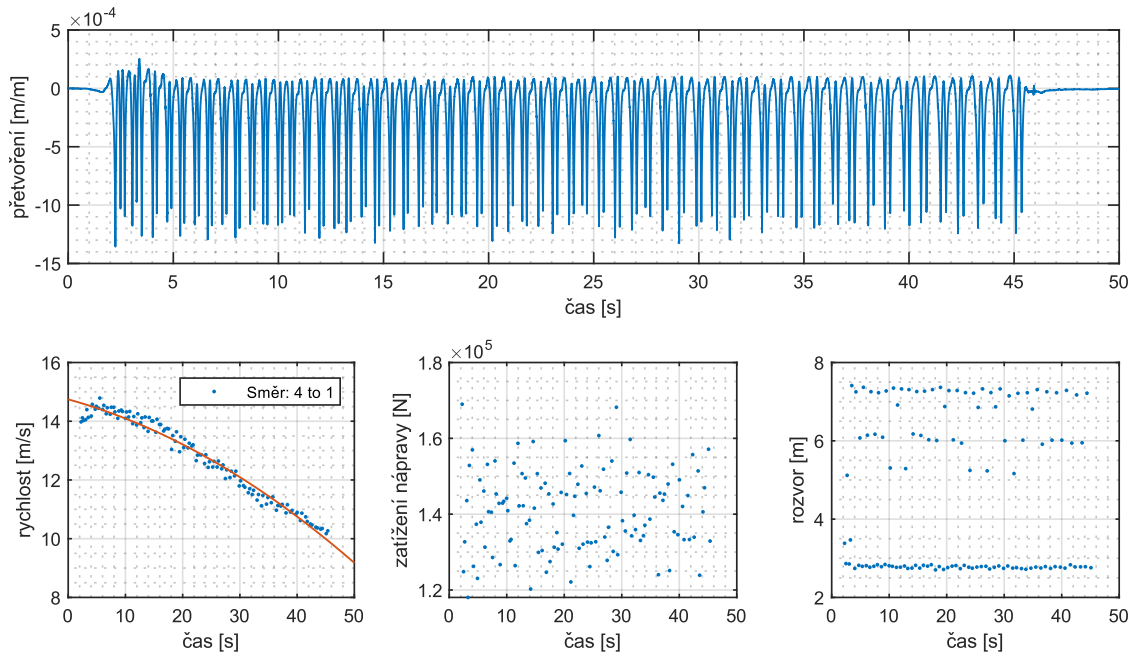


Data peaks



Obrázek 61: Grafické rozhraní serverové aplikace

Pro zajištění uživatelské přístupnosti k užitečným informacím byly vytvořeny funkce v prostředí Matlab pro automatické zpracování naměřených dat, především pak pro potřeby vyhodnocení základních provozních parametrů, mezi které patří například rychlost, směr jízdy, zatížení jednotlivých náprav a rozvor (viz Obrázek 62). Pomocí těchto indikátorů lze velmi rychle a spolehlivě určit problém s nepřiměřenou rychlostí, přetížením náprav či problémem s kontinuitou vlakové soupravy, které z hlediska bezpečnosti provozu mohou představovat výrazné riziko.



Obrázek 62: Vyhodnocení základních provozních parametrů jedoucího vlaku

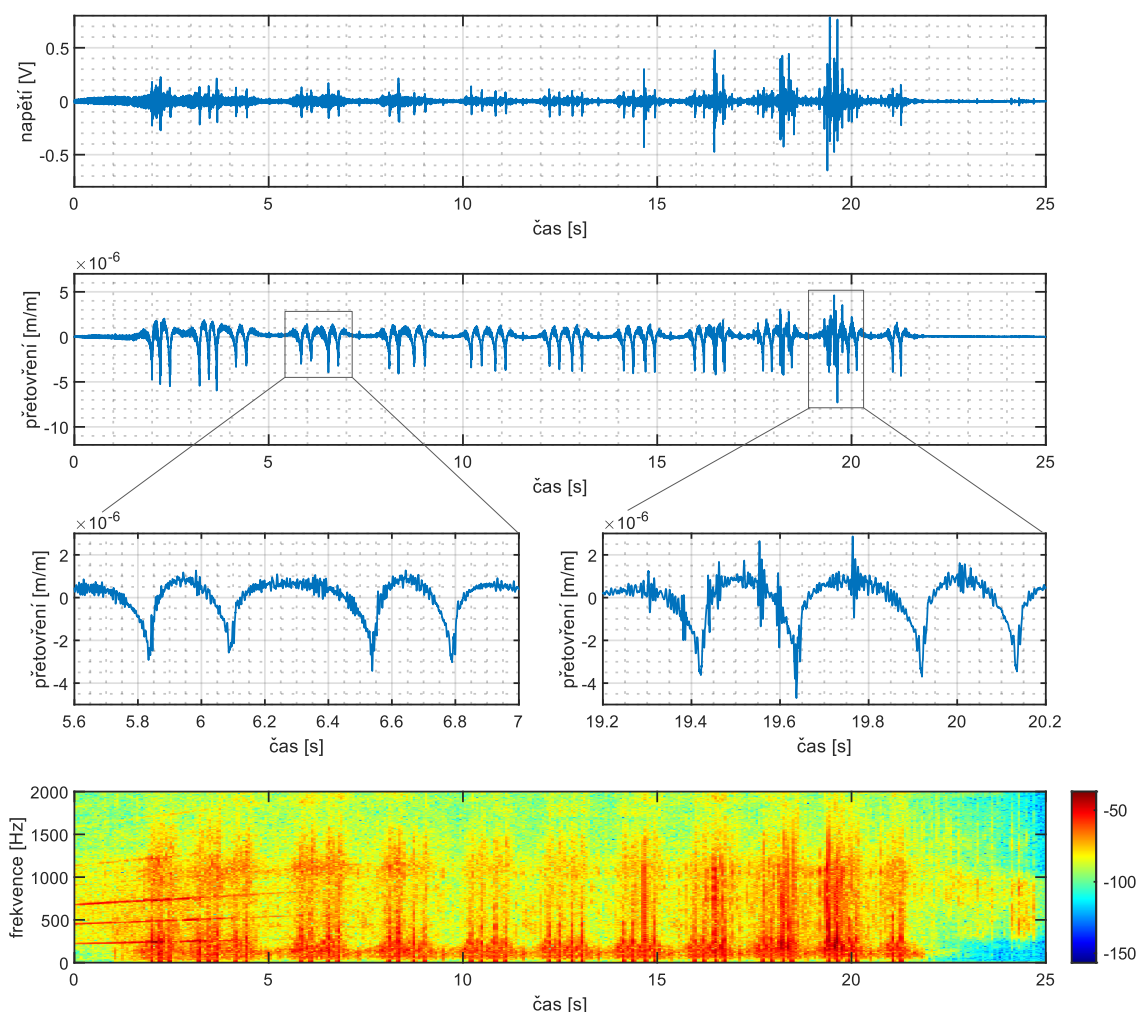
Přetvoření kolejnice je rovněž vstupem do výpočtových modelů kolejiště, které budou v budoucnu sloužit pro vyhodnocení přítomnosti defektů či poruch v kolejišti a budou tvořit digitální jádro DT kolejiště, obdobně jako v případě obráběcích strojů v kapitole 5.2. Modelování komplexního systému kolejiště, který obsahuje řadu špatně určitelných parametrů (např. tuhost podloží) a který je dynamicky zatížen složitou silovou soustavou ve styku kola a kolejnice, je velmi obtížný problém. Metodika modelování prochází vývojem zhruba od 60. let minulého století a výpočetní náročnost realizace aktuálně využívaných matematických a výpočetních modelů typu TTBDIM⁶⁰ [106] je velmi vysoká.

Z tohoto důvodu je výhodné modelovat přímo data, například pomocí AI metod, avšak tento přístup zpravidla vyžaduje dostatečné množství trénovacích dat, u kterých je vhodné znát výchozí stav a přítomnost a charakter existujících defektů či poruch. Problematice klasifikace defektů na železnici se věnuje například [107].

V případě dat naměřených realizovaným CPS lze detekovat nějaký nestandardní stav v odezvě systému vizuálně, a to jak v časové oblasti ze surového elektrického napětí, tak z průběhů přetvoření či v časově-frekvenční oblasti (viz Obrázek 63). Charakteru projevů

⁶⁰ Train-track-bridge dynamic interaction model.

a identifikaci různých defektů na kolejnici a kole vlaku se detailně věnuje práce [103], ze které lze čerpat poznatky pro základní vyhodnocení dat.



Obrázek 63: Průběhy napětí a přetvoření kolejnice při průjezdu vlaku v časové a časově-frekvenční oblasti, details na průběhy bez a s možnými defekty na povrchu kola

Na obrázku výše je znázorněn příklad naměřených dat při průjezdu osobního vlaku o devíti vagónech taženého šestnápravovou lokomotivou a rozjíždějícího se ze stanice nedaleko umístění sensorického systému. Lze si všimnout, že ve spektru vibrací lze například vidět nejen charakteristické frekvence dieselové lokomotivy ve formě vodorovných čar, ale i možnou přítomnost defektů na kolech 7. a 8. vagónu, které se projevují jako širokospektrální špička. V časové oblasti lze v průběhu napětí u těchto vagónů vidět výrazné zvýšení úrovně, a v průběhu přetvoření v porovnání s vagónem bez defektů (detail vlevo) viditelné periodické impulzy (detail vpravo), které mohou být způsobeny povrchovými defekty na kole náprav (například vlivem degradace nebo plochého kola). Můžeme tedy říci, že realizovaný IoT sensorický systém je plně funkční a naměřená data obsahují užitečné informace, na základě kterých lze provést navazující analýzy pro potřeby CP, SHM a PM.

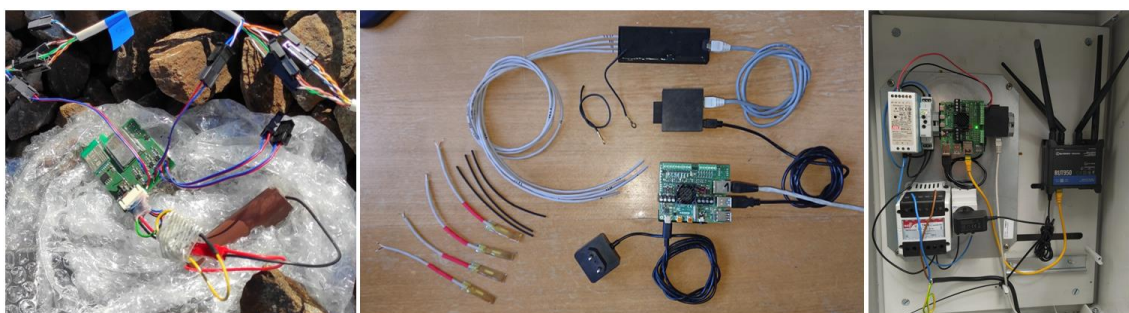
Je nutné podotknout, že zatímco vizuální zhodnocení průběhů nám může dát první informaci o možné přítomnosti defektů či poruch, mnohem náročnějším problémem je

algoritmizace a automatizace tohoto procesu, ke kterému je potřeba nejen znalostní báze o jejich projevech, ale i pokročilé a dostatečně robustní nástroje pro jejich klasifikaci, detekci a dlouhodobé vyhodnocení klíčových parametrů pro potřeby plánování údržby. Vývoj algoritmů a nástrojů pro tyto účely je předmětem aktuálně probíhajících navazujících výzkumných aktivit na pracovišti.

8.3 Zhodnocení přínosu pro železniční dopravu

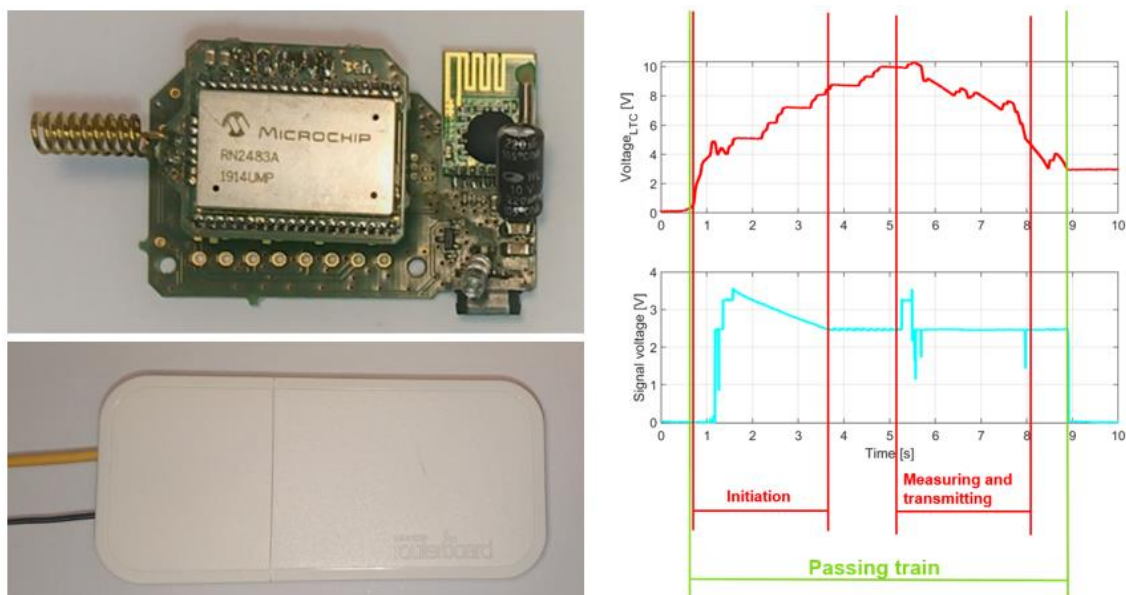
Wayside monitorovací systémy jsou velmi aktuální oblastí výzkumu a vývoje v železničním průmyslu. Digitální data poskytovaná CPS a jejich převedení do formy mechanické deformace je klíčové pro navazující činnosti související s tvorbou DT železnic a vlaků. Navržená metodika tvorby CPS systémů s přidánými funkcemi pro implementaci jako IoT systému tvoří základ jejich úspěšné realizace v rámci řady aktuálně probíhajících projektů.

Prvním z nich je projekt DELTA2 Technologické agentury České republiky s názvem Cenově dostupný chytrý snímací systém pro železnice 4.0 v rámci kterého byl instalován IoT senzorický systém (Obrázek 64), popsáný v kapitole 8.2 do průmyslové zóny v České republice kde je k 12.2022 úspěšně v nepřerušném provozu více jak 16 měsíců, s více jak 7000 zaznamenanými průjezdy vlaků, a v roce 2022 i na Taiwanu, kde je k 12.2022 v nepřerušném provozu 3 měsíce s více jak 600 zaznamenanými průjezdy.



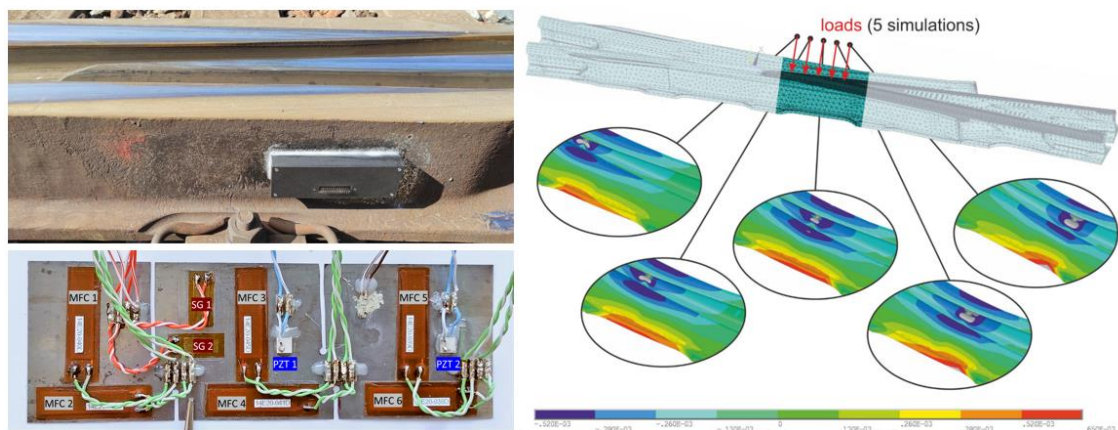
Obrázek 64: Vývojové fáze hardwaru CPS v rámci projektu TAČR DELTA 2

Druhým projektem je TREND Technologické agentury České republiky s názvem Modulární počítač náprav 4.0, který využívá instalované CPS pro měření odezvy a vyhodnocení ve formě počtu projetych náprav (Obrázek 65). Projekt je zaměřen na realizaci bezdrátového senzorického uzlu napájeného energy harvesting technologiemi, který by údaje o počtu náprav odesílal přímo obsluze tratě.



Obrázek 65: Vytvořený HW a vyhodnocení dat v rámci projektu TAČR TREND

Dalším projektem je Doprava2020+ Technologické agentury České republiky s názvem Výhybka 4.0, který se zabývá monitorováním výhybek s cílem detekovat možné porušení v místě srdcovky, která je jejím nejvíce namáhaným místem. Do tohoto projektu je zapojena řada akademických a průmyslových subjektů a výstupem má být komplexní hardwarové, softwarové a cloudové řešení pro vyhodnocení aktuálního stavu, degradačních procesů a odhadu životnosti výhybky. Tato problematika byla rovněž předmětem zájmu projektu In2Track3 Shift2Rail Horizon 2020.



Obrázek 66: Realizace CPS a DT na srdcovkové části výhybky v rámci projektu I2T3

Další aplikační oblastí je monitorování stavu lepených izolovaných styků (Obrázek 67), což jsou místa fyzického přerušování kolejnice pro zavedení kolejových obvodů, které signalizují průjezd vlaků. Izolované styky představují z mechanického hlediska jedno z hlavních míst vzniku poškození na kolejnici a následně i kolech vlaku, protože při přejíždění mezery dochází k uzavírání elektrického obvodu mezi částmi kolejnice. Při tom dochází nejen k odvalování materiálu, ale i jeho vytrhávání následkem vzniku elektrického oblouku, což má za následek postupné zvětšování mezery a degradaci povrchu v místě styku, které může následně způsobit poškození kol vlaku.



Obrázek 67: Monitorování lepeného izolovaného styku

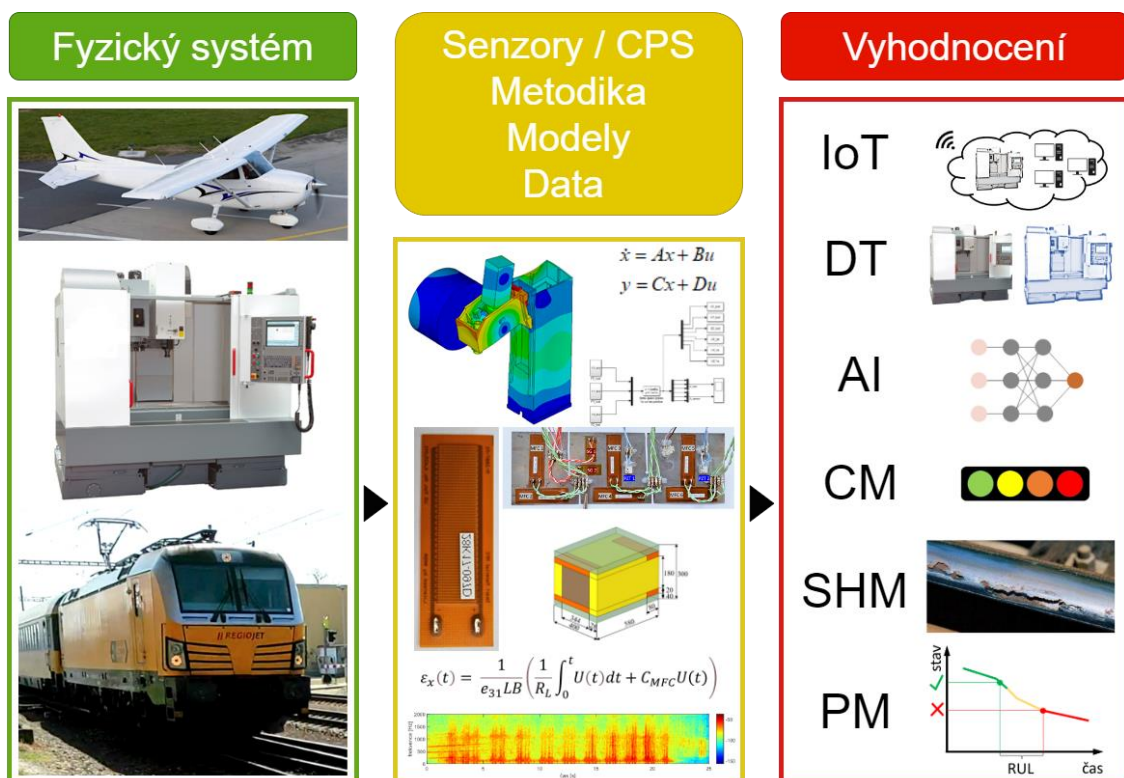
Dosažené výsledky, nejen v podobě vlastní metodiky a vytvořených CPS senzorických systémů, ale především velkého množství naměřených dat, mohou tvořit základ další spolupráce s průmyslem ve vývoji a aplikacích nové generace chytrých senzorických systémů, které pomohou zvyšovat bezpečnost a spolehlivost železniční dopravy.

9. PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE

9.1 VĚDECKÝ

Hlavním vědeckým přínosem této práce spočívá v sestavení metodiky tvorby digitálního dvojčete a chytrých CPS na základě rozsáhlé studie vývoje a aktuálních trendů při jejich aplikaci v průmyslu. Velký důraz byl kladen na vymezení role výpočtového modelování při tvorbě digitální části DT komplexních dynamických soustav, což je oblast, která nebyla doposud zcela prozkoumána a popsána. Vědecký přínos vlastní realizace CPS v obráběcím průmyslu, letectví a železničním průmyslu spočívá především v sestavení univerzální metodiky a její využití pro vytvoření vazby a zajištění toku dat mezi fyzickými systémy a pokročilými metodami zpracování signálů, monitorování konstrukcí a prediktivní údržby, které aktuálně představují jeden z chybějících článků při realizaci funkčních CPS systémů tvořících jádro digitálních dvojčat moderních zařízení (viz Obrázek 68, žlutá část).

Výsledky práce byly průběžně publikovány v řadě impaktovaných odborných časopisů (MSSP, EPJST, Measurement, Sensors) a prezentovány v rámci mnoha tuzemských i zahraničních konferencí. Autor této práce dosáhl během doktorského studia H-indexu 6 a je hlavním autorem nebo spoluautorem celkem 18 odborných publikací a příspěvků.



Obrázek 68: Přínosy dizertační práce v oblasti realizace a využití CPS

9.2 PRAKTICKÝ

Praktický přínos práce spočívá především v implementaci navržené metodiky a postupů v rámci řady probíhajících projektů a průmyslových aplikací.

Vývoj metod souvisejících s DT a CPS částečně probíhal v rámci projektu TAČR NCK MESTEC „Národní centrum kompetence Mechatroniky chytrých technologií pro strojírenství“, TN010000071, a to v rámci dílčích cílů 3.5 Cyber-Physical Systems a 3.6 Virtuální dvojče.

Problematika týkající se aplikací CPS pro SHM v letectví byla náplní projektu OP VVV „Centrum pokročilých leteckých technologií“, EF16_019/0000826 ukončeného na podzim roku 2022, ve kterém probíhal vývoj nových metod pro monitorování leteckých konstrukcí.

Aplikace v zájmové oblasti týkající se železniční dopravy probíhaly v rámci tří projektů. Metodika návrhu a realizace IoT řešení pro monitorování železnic byla využita v rámci projektu TAČR DELTA 2 „Cenově dostupný chytrý snímací systém pro železnice 4.0“, TM010000016, v rámci kterého mimo jiné proběhla úspěšná instalace systému v ČR a na Taiwanu. Vývoj bezdrátového systému pro autonomní měření vibrací a vyhodnocení počtu náprav projíždějícího vlaku probíhal v rámci projektu TAČR TREND Modulární počítač náprav 4.0, FW01010281. Posledními probíhajícími projekty jsou Horizon 2020 I2T3 a TAČR Doprava2020+ „Výhybka 4.0“, CK010000091, které se zabývají vývojem autonomního zařízení implementovatelného přímo do výhybky, jehož účelem je diagnostikovat stav výhybky na základě snímání odezvy od projíždějících vlaků.

9.3 PEDAGOGICKÝ

Metodika tvorby digitálních dvojčat, především výpočtových modelů potřebných pro realizaci dynamických analýz, je dlouhodobě začleněna do osnov výuky předmětů na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky na FSI v Brně. Uvedené postupy jsou v základním rozsahu vyučovány v předmětu Dynamika II – lineární kmitání (R2D) a Dynamika IV – vybrané kapitoly (RRS), ve kterých jsou studenti seznámeni se základy výpočtového modelování komplexních dynamických soustav a aplikací metod pro redukci stupňů volnosti umožňující simulace dynamických dějů v reálném či kvazi-reálném čase. Poznatky spojené s vývojem chytrých CPS, především s ohledem na možnost napájení energy harvesting technologiemi, jsou začleněny do výuky předmětu Chytré technologie a materiály v mechatronice (RAE-A).

Studovaná problematika a s ní související témata byly rovněž podnětem ke vzniku řady bakalářských a diplomových prací.

10. ZÁVĚR

V této práci je představena problematika digitálních dvojčat a kyber-fyzikálních systémů, započínající rozsáhlou studií vývoje a aktuálního chápání těchto a souvisejících pojmů v kontextu průmyslových aplikací. Koncept digitálního dvojčete prochází výrazným vývojem již od roku 2015, a to především v oblasti výrobního průmyslu, kde se využívá pro modernizaci a digitalizaci výrobních procesů, linek a celých podniků. Jejich využití pro digitalizaci jednotlivých zařízení, na které je nahlíženo jako na dynamicky zatěžované mechanické struktury, je však velmi neprobádanou oblastí, a i přes dostupnost širokého spektra výpočetních nástrojů nebyl doposud formulován jednotný přístup při realizaci v této oblasti.

V práci byly shrnuty všechny požadavky kladené na digitální dvojčata a kyber-fyzikální systémy, byla provedena studie aktuálně dostupných výpočetních nástrojů pro realizaci digitálních dvojčat jako celku, případě jejich dílčích částí. Dále byla vymezena role výpočtového modelování a vhodných metod redukce dynamických systémů pro potřeby simulací komplexních dynamických dějů v reálném či kvazi-reálném čase, přičemž byla navržena vhodná metodika demonstrováná na problému predikce samobuzených vibrací u vertikální frézky. Redukce stupňů volnosti klasických MKP modelů pomocí CMS metod a následná transformace do podoby stavového modelu se ukázalo jako efektivní přístup pro dramatické snížení výpočetního času potřebného k simulaci komplexních dynamických procesů.

Vzhledem ke komplexitě moderních zařízení je jedním z přístupů modelování dat namísto vlastních soustav, což vede k využití metod založených na umělé inteligenci, které zpravidla vyžadují velké množství klasifikovaných trénovacích dat. Pozornost tedy byla věnována i návrhu a tvorbě funkčních kyber-fyzikálních systémů založených na piezokompozitních senzorech, schopných poskytovat data obsahující užitečné informace v reálném čase, a to nejen pro potřeby přímé vibrodiagnostiky a zhodnocení provozních vlastností, ale především aplikace metod monitorování konstrukcí a prediktivní údržby. Reálné aplikace demonstrovány ve třech zájmových oblastech: obráběcím průmyslu, letectví a železniční dopravě, přičemž v poslední oblasti byly tyto systémy rozšířeny o další funkce, které umožnily implementaci v podobě IoT řešení pro monitorování železnic.

Navržená metodika a dosažené výsledky byly prezentovány v rámci řady publikací v impaktovaných časopisech, byly využity při řešení několika národních i mezinárodních projektů a budou v budoucnu sloužit k vývoji metod pro pokročilé zpracování dat v kontextu monitorování životnosti a prediktivní údržby.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DIGITAL, McKinsey. Industry 4.0 - how to navigate digitization of the manufacturing sector. *McKinsey & Company* [online]. 2015, 1–62. ISSN 13514180. Dostupné z: doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2
- [2] DELOITTE. *Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*. 2015.
- [3] BRETTEL, Malte, Niklas FRIEDERICHSEN, Michael KELLER a Marius ROSENBERG. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective [online]. 2014, **8**(1), 37–44. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.02.213
- [4] XU, Li Da, Eric L. XU a Ling LI. Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research* [online]. 2018, **56**(8), 2941–2962. ISSN 1366588X. Dostupné z: doi:10.1080/00207543.2018.1444806
- [5] NEGRI, Elisa, Luca FUMAGALLI a Marco MACCHI. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **11**(June), 939–948. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.198
- [6] BRADLEY, David, David RUSSELL, Ian FERGUSON, John ISAACS, Allan MACLEOD a Roger WHITE. The Internet of Things - The future or the end of mechatronics. *Mechatronics* [online]. 2015, **27**, 57–74. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2015.02.005
- [7] SCHLUSE, Michael, Marc PRIGGEMEYER, Linus ATORF a Jurgen ROMANN. Experimentable Digital Twins - Streamlining Simulation-based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* [online]. 2018, **14**(4), 1–1. ISSN 1551-3203. Dostupné z: doi:10.1109/TII.2018.2804917
- [8] BARRICELLI, Barbara Rita, Elena CASIRAGHI a Daniela FOGLI. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access* [online]. 2019, **7**, 167653–167671. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2019.2953499
- [9] SHAFTO, Mike, Mike CONROY, Rich DOYLE, Ed GLAESSGEN, Chris KEMP, Jacqueline LEMOIGNE a Lui WANG. *DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap Technology Area 11*. Washington, DC 20546: National Aeronautics and Space Administration. 2010
- [10] SINGH, Maulshree, Evert FUENMAYOR, Eoin P. HINCHY, Yuansong QIAO, Niall MURRAY a Declan DEVINE. *Digital twin: Origin to future* [online]. 2021. ISSN 25715577. Dostupné z: doi:10.3390/asi4020036
- [11] SEMERARO, Concetta, Mario LEZOUCHE, Hervé PANETTO a Michele DASSISTI. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry* [online]. 2021, **130**. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/j.compind.2021.103469
- [12] JONES, David, Chris SNIDER, Aydin NASSEHI, Jason YON a Ben HICKS.

- Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2020, **29**, 36–52. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2020.02.002
- [13] TAO, Fei, Fangyuan SUI, Ang LIU, Qinglin QI, Meng ZHANG, Boyang SONG, Zirong GUO, Stephen C.Y. LU a A. Y.C. NEE. Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research* [online]. 2019, **57**(12), 3935–3953. ISSN 1366588X. Dostupné z: doi:10.1080/00207543.2018.1443229
- [14] FEI, Tao, Liu WEIRAN, Zhang MENG, Hu TIANLIANG, Qi QINGLIN, Zhang HE, Sui FANGYUAN, Wang TIAN, Xu HUI, Huang ZUGUANG, Ma XIN, Zhang LIANCHAO, Cheng JIANGFENG, Yao NIANKUI, Yi WANGMIN, Zhu KAIZHEN, Zhang XINSHENG, Meng FANJUN, Jin XIAOHUI, Liu ZHONGBING, He LIRONG, Cheng HUI, Zhou ZHUAN, Li YANG, Lv QIAN a Luo YIMIN. Five-dimensional model of digital twin and its application in ten fields. *Computer Integrated Manufacturing Systems* [online]. 2019. Dostupné z: doi:10.13196/j.cims.2019.01.001
- [15] QI, Qinglin, Fei TAO, Tianliang HU, Nabil ANWER, Ang LIU, Yongli WEI, Lihui WANG a A. Y.C. NEE. Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2021, **58**(October 2019), 3–21. ISSN 02786125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmsy.2019.10.001
- [16] NEGRI, Elisa, Luca FUMAGALLI a Marco MACCHI. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **11**, 939–948. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.198
- [17] JONES, David, Chris SNIDER, Aydin NASSEHI, Jason YON a Ben HICKS. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2020, **29**, 36–52. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2020.02.002
- [18] TAO, Fei, He ZHANG, Ang LIU a A. Y. C. NEE. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* [online]. 2019, **15**(4), 2405–2415. ISSN 1551-3203. Dostupné z: doi:10.1109/TII.2018.2873186
- [19] WAGG, D. J., K. WORDEN, R. J. BARTHORPE a P. GARDNER. Digital Twins: State-of-The-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering* [online]. 2020, **6**(3). ISSN 23329025. Dostupné z: doi:10.1115/1.4046739
- [20] SINGH, Maulshree, Rupal SRIVASTAVA, Evert FUENMAYOR, Vladimir KUTS, Yuansong QIAO, Niall MURRAY a Declan DEVINE. Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)* [online]. 2022, **12**(11). ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/app12115727
- [21] JIANG, Yuchen, Shen YIN, Kuan LI, Hao LUO a Okyay KAYNAK. Industrial applications of digital twins. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2021, **379**(2207). ISSN 1364503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2020.0360
- [22] PHANDEN, Rakesh Kumar, Priavrat SHARMA a Anubhav DUBEY. A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics. *Materials*

- Today: Proceedings* [online]. 2020, **38**, 174–178. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.06.446
- [23] *Predix Platform* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.ge.com/digital/iiot-platform>
- [24] *Digital twin - Driving business value throughout the building life cycle*. B.m.: Siemens Switzerland Ltd. 2018. ISSN 1720898X
- [25] SIEMENS. *SINUMERIK ONE Create MyVirtual Machine System Manual* [online]. prosinec 2019. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/371/109777371/att_1013392/v1/ONE_cmvm_sys_man_1219_en-US.pdf
- [26] MALAKUTI, Somayeh. The digital twin: from hype to reality. *ABB Review* [online]. 2021. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/80770/the-digital-twin-from-hype-to-reality>
- [27] *3DEXPERIENCE Cloud Platform* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.3ds.com/cloud>
- [28] MATOUŠEK, Radomil, Roman PARÁK a Branislav LACKO. I4C - robotická buňka podle konceptů průmyslu 4.0. *AUTOMA 1/2021*. 2021, 10–12.
- [29] KROUPA, Jiri, Zdenek TUMA, Jiri KOVAR a Vladislav SINGULE. Virtual laboratory for study of construction of machine tools. *MM Science Journal* [online]. 2018, **2018**(November), 2503–2506. ISSN 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2018_11_2017100
- [30] HOLUB, Michal, Zdenek TUMA, Jiri KROUPA, Jiri KOVAR a Petr BLECHA. Case Study of Digitization of the Production Cell. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering* [online]. 2020, s. 253–262. ISBN 9783030313425. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-31343-2_22
- [31] *Workshop on Cyber-Physical Systems 2006* [online]. 2006. Dostupné z: <https://cps-vo.org/category/events/2006/workshop-cyber-physical-systems-2006>
- [32] LEE, Jay, Behrad BAGHERI a Hung An KAO. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* [online]. 2015, **3**, 18–23. ISSN 22138463. Dostupné z: doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- [33] DAHMEN, Ulrich a Juergen ROSSMANN. What is a Digital Twin - A Mediation Approach. *IEEE International Conference on Electro Information Technology* [online]. 2021, **2021-May**(July), 165–172. ISSN 21540373. Dostupné z: doi:10.1109/EIT51626.2021.9491883
- [34] VERMA, Pawan Kumar, Rajesh VERMA, Arun PRAKASH, Ashish AGRAWAL, Kshirasagar NAIK, Rajeev TRIPATHI, Maazen ALSABAAN, Tarek KHALIFA, Tamer ABDELKADER a Abdulhakim ABOGHARAF. Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications* [online]. 2016, **66**, 83–105. ISSN 10958592. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnca.2016.02.016
- [35] *Ansys Twin Builder, Simulation-Based & Hybrid Analytics* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.ansys.com/content/dam/product/digital-twin/twin->

- builder/ansys-twin-builder-technical-datasheet.pdf
- [36] AUTODESK Tandem [online]. 2022. Dostupné z: <https://intandem.autodesk.com/>
- [37] KŠICA, Filip. *Models of dynamics and responses of multi-body systems*. B.m., 2016. Brno University of Technology.
- [38] BOSCHERT, Stefan a Roland ROSEN. Digital Twin—The Simulation Aspect. In: *Mechatronic Futures* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 59–74. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-32156-1_5
- [39] ALTINTAS, Y, C BRECHER, M WECK a S WITT. Virtual Machine Tool. nedatováno.
- [40] FOTSO, Arnaud Btabeko a Achim RETTBERG. State of the art for mechatronic design concepts. *Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications* [online]. 2012, 232–240. Dostupné z: doi:10.1109/MESA.2012.6275567
- [41] HADAS, Z., T. BREZINA, O. ANDRS, J. VETISKA a L. BREZINA. Simulation modelling of mechatronic system with flexible parts. In: *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)* [online]. B.m.: IEEE, 2012, s. LS2e.1-1-LS2e.1-7. ISBN 978-1-4673-1972-0. Dostupné z: doi:10.1109/EPEPEMC.2012.6397421
- [42] YU, Ying, Yu WANG, Chun XIE, Xiaoyang ZHANG a Weizhi JIANG. A proposed approach to mechatronics design education: Integrating design methodology, simulation with projects. *Mechatronics* [online]. 2013, **23**(8), 942–948. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2012.10.002
- [43] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie výroby 2 - řešené příklady*. nedatováno, 0–63.
- [44] TLUSTÝ, Jiri. *Manufacturing Processes and Equipment*. 1. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000. ISBN 0-201-49865-0.
- [45] SIDDHPURA, M. a R. PAUROBALLY. A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012, **61**, 27–47. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007
- [46] QUINTANA, Guillem a Joaquim CIURANA. Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2011, **51**(5), 363–376. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001
- [47] ZAGHBANI, I. a V. SONGMENE. Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2009. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.06.010
- [48] LI, Bin, Hui CAI, Xinyong MAO, Junbin HUANG a Bo LUO. Estimation of CNC machine-tool dynamic parameters based on random cutting excitation through operational modal analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **71**, 26–40. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.04.001
- [49] ALBERTELLI, P., M. GOLETTI a M. MONNO. A new receptance coupling

- substructure analysis methodology to improve chatter free cutting conditions prediction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **72**, 16–24. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.05.003
- [50] GARITAONANDIA, I., M. H. FERNANDES, J. M. HERNANDEZ-VAZQUEZ a J. A. EALO. Prediction of dynamic behavior for different configurations in a drilling-milling machine based on substructuring analysis. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2016, **365**, 70–88. ISSN 10958568. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2015.12.012
- [51] LUO, Bo, Dawei PAN, Hui CAI, Xinyong MAO, Fangyu PENG, Kuanmin MAO a Bin LI. A method to predict position-dependent structural natural frequencies of machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2015. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2015.02.009
- [52] LAW, Mohit, Yusuf ALTINTAS a A. SRIKANTHA PHANI. Rapid evaluation and optimization of machine tools with position-dependent stability. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **68**, 81–90. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.02.003
- [53] SCHMITZ, Tony L. a Kevin Scott SMITH. *Machining Dynamics* [online]. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-0-387-09644-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-09645-2
- [54] CHEN, G. J., X. Q. ZHOU, X. L. LIU, L. WANG a B. T. HE. Measure of cutting stiffness coefficient in high-speed precision turning of hardened steel. *Materials Research Innovations* [online]. 2015, **19**(sup6), S6-132-S6-135. ISSN 1432-8917. Dostupné z: doi:10.1179/1432891715Z.0000000001465
- [55] ŚNIEGULSKA-GRADZKA, Dominika, Mirosław NEJMAN a Krzysztof JEMIELNIAK. Cutting Force Coefficients Determination Using Vibratory Cutting. *Procedia CIRP* [online]. 2017, **62**(1), 205–208. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.06.091
- [56] MÖHRING, Hans Christian, Christian BRECHER, Eberhard ABELE, Jürgen FLEISCHER a Friedrich BLEICHER. Materials in machine tool structures. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2015, **64**(2), 725–748. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2015.05.005
- [57] MEHRPOUYA, Majid, Eldon GRAHAM a Simon S. PARK. FRF based joint dynamics modeling and identification. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2013. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2013.03.022
- [58] KLERK, D. De, Daniel J. RIXEN a Sven Niels VOORMEEREN. General Framework for Dynamic Substructuring: History, Review and Classification of Techniques. *AIAA Journal* [online]. 2008, **46**(5), 1169–1181. ISSN 0001-1452. Dostupné z: doi:10.2514/1.33274
- [59] GIBANICA, Mladen. Experimental-Analytical Dynamic Substructuring. 2013, 83.
- [60] BAMPION, M. C. C. a R. R. CRAIG, JR. Coupling of substructures for dynamic analyses. *AIAA Journal* [online]. 1968, **6**(7), 1313–1319. ISSN 0001-1452. Dostupné z: doi:10.2514/3.4741
- [61] LJUNG, L. *Ljung L System Identification Theory for User.pdf* [online]. 1987.

- ISBN 0138816409. Dostupné z: doi:10.1016/0005-1098(89)90019-8
- [62] GEVERS, Michel. System Identification without Lennart Ljung : what would have been different ? *Forever Ljung in System Identification*. 2006, 139–162.
- [63] LJUNG, Lennart. System Identification. In: [online]. 1998, s. 163–173. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4612-1768-8_11
- [64] JANSSON, M. Subspace identification and ARX modeling. *Proceedings of the 13th IFAC symposium on system identification*. 2003, (February), 1625–1630.
- [65] GONDHALEKAR, Aditya Chandrashekhar. Strategies for Non - Linear System Identification. 2009.
- [66] MATHWORKS, The. *System Identification Toolbox™ User's Guide*. 2018.
- [67] SUZUKI, Norikazu, Yusuke KURATA, Takashi KATO, Rei HINO a Eiji SHAMOTO. Identification of transfer function by inverse analysis of self-excited chatter vibration in milling operations. *Precision Engineering* [online]. 2012, **36**(4), 568–575. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2012.04.004
- [68] BUDAK, E. a L. T. TUNC. Identification and modeling of process damping in turning and milling using a new approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2010, **59**(1), 403–408. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2010.03.078
- [69] ÖZS, O, E BUDAK a H N ÖZGÜVEN. Identification of bearing dynamics under operational conditions for chatter stability prediction in high speed machining operations [online]. 2015, **42**, 53–65. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2015.03.010
- [70] KROUPA, Jiří. *Návrh digitálního dvojčete obráběcího stroje*. B.m., 2022. Brno University of Technology.
- [71] BRAZINA, Jakub, Jan VETISKA, Vaclav STANEK, Frantisek BRADAC a Michal HOLUB. Virtual commissioning as part of the educational process. *Proceedings of the 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2020* [online]. 2020. Dostupné z: doi:10.1109/ME49197.2020.9286613
- [72] ICAO AVIATION DATA AND ANALYSIS SEMINAR. *Airline Operating Costs and Productivity* [online]. 2017. Dostupné z: [https://www.icao.int/MID/Documents/2017/Aviation Data and Analysis Seminar/PPT3 - Airlines Operating costs and productivity.pdf](https://www.icao.int/MID/Documents/2017/Aviation%20Data%20and%20Analysis%20Seminar/PPT3%20-%20Airlines%20Operating%20costs%20and%20productivity.pdf)
- [73] CUSANO, Claudio a Paolo NAPOLETANO. Visual recognition of aircraft mechanical parts for smart maintenance. *Computers in Industry* [online]. 2017. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/j.compind.2017.01.001
- [74] BAARAN, Jens. *Study on visual inspection of composite structures* [online]. 2009. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA_REP_RESEA_2007_3.pdf
- [75] BOLLER, Christian. State-of-the-art in structural health monitoring for aeronautics. *International Symposium on NDT in Aerospace* [online]. 2008, 1–8.

- Dostupné
z: http://www.hf.faa.gov/docs/508/docs/drury_doc.pdf%5Cnhttp://citeseerx.ist.ps.u.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.151.7689&rep=rep1&type=pdf
- [76] BOLLER, Christian. Structural Health Monitoring - A Design and Integration Issue. In: *1st Asian Pacific Workshop on Structural Health Monitoring*. nedatováno.
- [77] LE, Minh Quyen, Jean Fabien CAPSAL, Mickaël LALLART, Yoann HEBRARD, Andre VAN DER HAM, Nicolas REFFE, Lionel GEYNET a Pierre Jean COTTINET. Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications. *Progress in Aerospace Sciences* [online]. 2015, **79**, 147–157. ISSN 03760421. Dostupné z: doi:10.1016/j.paerosci.2015.10.001
- [78] GOYAL, D. a B. S. PABLA. The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering* [online]. 2016, **23**(4), 585–594. ISSN 18861784. Dostupné z: doi:10.1007/s11831-015-9145-0
- [79] PALMA, L Di, M BELARDO, N PALETTA a M PECORA. Usv1 in-Flight Loads Evaluation By Means of Strain Gauge Instrumentation Part I. 2007, (November 2017), 2293–2298.
- [80] HOLFORD, K. M., R. PULLIN, S. L. EVANS, M. J. EATON, J. HENSMAN a K. WORDEN. Acoustic emission for monitoring aircraft structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* [online]. 2009, **223**(5), 525–532. ISSN 09544100. Dostupné z: doi:10.1243/09544100JAERO404
- [81] V. K. HILL, Eric a Christopher L. ROVIK. In-Flight Fatigue Crack Growth Monitoring in a Cessna T-303 Crusader Vertical Tail. *Journal of Acoustic Emission*. 2013, **31**, 19–35.
- [82] CLARK, A., S. KAEWUNRUEN, R. JANELIUKSTIS a M. PAPAELIAS. Damage Detection in Railway Prestressed Concrete Sleepers using Acoustic Emission. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **251**(1), 012068. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012068
- [83] GIURGIUTIU, Victor. Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. In: *16th International Conference of Adaptive Structures and Technologies ICAST-2005*. 2005, s. 10–12.
- [84] GIURGIUTIU, Victor. SHM of Aerospace Composites – Challenges and Opportunities. 2015, 1–15.
- [85] PFEIFFER, Helge a Martine WEVERS. Aircraft Integrated Structural Health Assessment – Structural Health Monitoring and its implementation within the European project AISHA. *EU Project Meeting on Aircraft Integrated Structural Health Assessment (AISHA)*. 2007, (June), 1–9.
- [86] SALMANPOUR, Mohammad Saleh, Zahra Sharif KHODAEI a M. H. FERRI ALIABADI. Impact damage localisation with piezoelectric sensors under operational and environmental conditions. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2017, **17**(5), 1–18. ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s17051178

- [87] LIN, B., M. GRESIL, V. GIURGIUTIU, T. KNIGHT, A.E. MENDEZ-TORRES a L. YU. Nuclear environmental effects on piezoelectric wafer active sensors based acousto-ultrasonic sensing system. *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP 2014*. 2014, **3**(August), 2234–2239.
- [88] HILL, Kenneth O. a Gerald MELTZ. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 1997, **15**(8), 1263–1276. ISSN 07338724. Dostupné z: doi:10.1109/50.618320
- [89] DI SANTE, Raffaella. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. *Sensors* [online]. 2015, **15**(8), 18666–18713. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s150818666
- [90] SMART MATERIAL CORP. *Smart Material* [online]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com>
- [91] SUN, Hao a Oral BÜYÜKÖZTÜRK. Optimal sensor placement in structural health monitoring using discrete optimization. *Smart Materials and Structures* [online]. 2015, **24**(12). ISSN 1361665X. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/24/12/125034
- [92] WITTMAN, D. *Fisher Matrix for Beginners D*.
- [93] PAPADIMITRIOU, C. Optimal sensor placement methodology for parametric identification of structural systems. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2004, **278**(4–5), 923–947. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2003.10.063
- [94] RUČEVSKIS, Sandris, Tomasz ROGALA a Andrzej KATUNIN. Optimal Sensor Placement for Modal-Based Health Monitoring of a Composite Structure. *Sensors* [online]. 2022, **22**(10), 3867. Dostupné z: doi:10.3390/s22103867
- [95] KRATOCHVÍL, Ing Aleš, Ing Martin ZEJDA, Ing Michael KONVALINKA a Č V U T PRAZE. MKP Aeroelastická analýza větroně. nedatováno, 1–7.
- [96] HERNÁNDEZ, Santiago, Edoardo MENGA, Pablo NAVEIRA, Daniel FREIRE, Carlos LÓPEZ, Miguel CID MONTOYA, Simón MOLEDO a Aitor BALDOMIR. Dynamic analysis of assembled aircraft structures considering interfaces with nonlinear behavior. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2018. ISSN 12709638. Dostupné z: doi:10.1016/j.ast.2018.03.004
- [97] NURHANIZA, M, M K A ARIFFIN, Aidy ALI, F MUSTAPHA a A W NORAINI. Finite element analysis of composites materials for aerospace applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2010, **11**, 012010. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/11/1/012010
- [98] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. *Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně Brno*. 2008, 1–94.
- [99] AL-MADANI, Ramadan A., M. JARNAZ, K. ALKHARMAJI a M. ESSURI. Finite Element Modeling of Composites System in Aerospace Application. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2012, **245**, 316–322. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.245.316
- [100] OKOLI, O. I. a G. F. SMITH. Failure modes of fibre reinforced composites: The effects of strain rate and fibre content. *Journal of Materials Science* [online]. 1998,

- 33(22), 5415–5422. ISSN 00222461. Dostupné z: doi:10.1023/A:1004406618845
- [101] BĚHAL, Josef. *Integrace smart materiálu do mechanické konstrukce*. B.m., 2019. Brno University of Technology.
- [102] CANNON, D. F., K. O. EDEL, S. L. GRASSIE a K. SAWLEY. Rail defects: An overview. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* [online]. 2003, **26**(10), 865–886. ISSN 8756758X. Dostupné z: doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00693.x
- [103] ALEMI, A. *Railway wheel defect identification* [online]. Delft: Delft University of Technology, 2019. ISBN 9789055841745. Dostupné z: doi:10.4233/uuid:https://doi.org/10.4233/uuid:981edd2c-1674-4cba-8146-cf097b29c4f1
- [104] LAGNEBÄCK, Robert. Evaluation of wayside condition monitoring technologies for condition-based maintenance of railway vehicles. 2007, 1–138.
- [105] BERNAL, Esteban, Maksym SPIRYAGIN a Colin COLE. Onboard Condition Monitoring Sensors, Systems and Techniques for Freight Railway Vehicles: A Review. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2019, **19**(1), 4–24. ISSN 1530437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2018.2875160
- [106] ZHAI, Wanming, Zhaoling HAN, Zhaowei CHEN, Liang LING a Shengyang ZHU. Train–track–bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2019, **57**(7), 984–1027. ISSN 17445159. Dostupné z: doi:10.1080/00423114.2019.1605085
- [107] NIEWALDA, Tobias. *Deep Learning Based Classification of Rail Defects Using On-board Monitoring in the Stockholm Underground*. B.m., 2020. KTH Royal Institute of Technology.

SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

V této kapitole jsou vedeny všechny publikace, které vznikly v průběhu doktorského studia. Číslování publikací začíná písmenem „V“, které značí, že se jedná o publikaci vlastní. Publikace jsou řazeny chronologicky od nejnovějších po nejstarší. Tento odlišný citační styl je zvolen pro separaci od ostatních publikací jiných autorů.

- [V1] KSICA, Filip, Ondrej RUBES, Jiri KOVAR, Jan CHALUPA a Zdenek HADAS. Smart Sensing System for Railway Monitoring. In: *20th Mechatronika 2022*. 2022. ISBN 9781665410403.
- [V2] HADAS, Z, O RUBES, F KSICA, Z MAJER, M MONCMAN a J CHALUPA. Passing Train as Source of Energy for Autonomous LoRa Monitoring System. *The Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*. 2022.
- [V3] HADAS, Zdenek, Petr HADRABA, Stanislav VECHET, Filip KSICA, Ondrej RUBES a Marek MONCMAN. Development of trackside test rig for testing of railway sensing systems. *The Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*. 2022.
- [V4] HADAS, Zdenek, Ondrej RUBES, Filip KSICA a Jan CHALUPA. Kinetic Electromagnetic Energy Harvester for Railway Applications—Development and Test with Wireless Sensor. *Sensors* [online]. 2022, **22**(3), 905. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22030905
- [V5] ŠEVEČEK, Oldřich, Filip KŠICA, Ondřej RUBEŠ, Zdeněk MACHŮ, Jan BOLCEK a Zdeněk HADAŠ. Analysis of piezoelectric skin on vibrating structure for energy harvesting and structural health monitoring applications. *European Physical Journal: Special Topics* [online]. 2022, **231**(8), 1529–1536. ISSN 19516401. Dostupné z: doi:10.1140/epjs/s11734-022-00494-w
- [V6] RUBES, Ondrej, Jan CHALUPA, Filip KSICA a Zdenek HADAS. Development and experimental validation of self-powered wireless vibration sensor node using vibration energy harvester. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2021, **160**, 107890. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2021.107890
- [V7] MACHU, Zdenek, Filip KSICA, Zdenek HADAS, Martina KRATOCHVILOVA a Jan PODROUZEK. SENSING RAIL SYSTEM WITH PIEZOELECTRIC ELEMENTS. *MM Science Journal* [online]. 2021, **2021**(1), 4230–4237. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2021_03_2020066
- [V8] ZELENKA, S., Z. HADAS, S. BADER, T. BECKER, P. GLJUŠČIĆ, J. HLINKA, L. JANAK, E. KAMENAR, F. KSICA, T. KYRATSI, L. LOUCA, M. MRLIK, A. OSMANOVIĆ, V. PAKRASHI, O. RUBES, O. ŠEVEČEK, J.P.B. SILVA, P. TOFEL, B. TRKULJA, R. UNNTHORSSON, J. VELAGIĆ a Ž. VRCAN. Energy harvesting technologies for structural health monitoring of airplane components—a review. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2020, **20**(22). ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s20226685

- [V9] KSICA, Filip, Josef BEHAL, Ondrej RUBES a Zdenek HADAS. Homogenized Model of Piezoelectric Composite Structure for Sensing Purposes. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing* [online]. 2020, s. 358–365. ISBN 9783030299927. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-29993-4_44
- [V10] KSICA, F., Z. HADAS a J. HLINKA. Integration and test of piezocomposite sensors for structure health monitoring in aerospace. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* [online]. 2019, **147**. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2019.106861
- [V11] HADAS, Z., F. KSICA a O. RUBES. Piezoceramic patches for energy harvesting and sensing purposes. *The European Physical Journal Special Topics* [online]. 2019, **228**(7), 1589–1604. ISSN 1951-6355. Dostupné z: doi:10.1140/epjst/e2019-800156-6
- [V12] RUBES, O., P. TOFEL, R. MACKU, P. SKARVADA, F. KSICA a Z. HADAS. Piezoelectric Micro-fiber Composite Structure for Sensing and Energy Harvesting Applications. In: *Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018*. 2019. ISBN 9788021455443.
- [V13] KSICA, Filip, Zdenek HADAS a Jiri HLINKA. Application of Piezoelectric Sensors for Structural Health Monitoring in Aerospace. In: *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)* [online]. 2018. Dostupné z: doi:10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453610
- [V14] KSICA, Filip a Zdenek HADAS. Prediction of position-dependent stability lobes based on reduced virtual model. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, **211**(The 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV)). Dostupné z: doi:110.1051/matecconf/201821117005
- [V15] KOVAR, Jiri, Katerina MOURALOVA, Filip KSICA, Jiri KROUPA, Ondrej ANDRS a Zdenek HADAS. Virtual reality in context of Industry 4.0. In: *Proceedings of the 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2016*. 2017. ISBN 9788001058831.
- [V16] KSICA, F. a Z. HADAS. Position-dependent response simulation of machine tool using state-space models. *MM Science Journal* [online]. 2017, **2017**(December). ISSN 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2017_12_201799
- [V17] KŠICA, Filip, Jan VETIŠKA a Zdeněk HADAŠ. Methodology for predicting dynamic behaviour of machine tools based on a virtual model. *Engineering mechanics 2017*. 2017, (May), 534–537.
- [V18] HADAŠ, Z. a F. KŠICA. Model-based design of testing electromagnetic shaker with flexible beam. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics, Mechatronika 2014* [online]. 2014. ISBN 9788021448162. Dostupné z: doi:10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018290

SEZNAM PATENTŮ

- [UV1] Z. Hadaš, F. Kšica a O. Rubeš, “Snímací vrstva pro strojní součásti,” užitný vzor, patent č. 33551, Vysoké učení technické v Brně, 2019

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
AI	Artificial Intelligence
ARMA	Autoregressive moving average
ARMAX	Autoregressive Moving Average Exogenous,
ARX	Autoregressive Exogenous
BaaS	Backup as a Service
BJ	Box-Jenkins
CAD	Computer Aided Design
CMS	Component mode synthesis
CPS	Cyber-Physical System, kyber-fyzikální systém
CWT	Continuous wavelet transformation
DOF	Degree of freedom, stupeň volnosti tělesa
DT	Digital Twin, digitální dvojče
EMA	Experimental modal analysis
FBG	Fiber-Bragg Grating
FPGA	Field Programmable Gate Array, programovatelné hradlové pole
FRF	Frequency Response Function
GL	General-Linear
HaaS	Hardware as a Service
HMM	Hidden Markov model
IaaS	Infrastructure as a Service
IoT	Internet of Things
MFC	Macro-Fibre Composite
MKP	Metoda konečných prvků
NARX	Nonlinear Autoregressive Exogenous
NN	Neural network
OE	Output-Error
OMA	Operational modal analysis
PaaS	Platform as a Service
PHM	Prognostics and Health Management
PM	Predictive Maintenance
PWAS	Piezoelectric Wafer Active Sensors
RCSA	Receptance Coupling Substructure Analysis
RMS	Root-Mean Square, kvadratický průměr
ROM	Reduced-Order Model
SaaS	Software as a Service
SHM	Structure Health Monitoring
SLD	Stability lobe diagram
SoS	System of Systems
TTBDIM	Train-track-bridge dynamic response model

VM	Virtuální modelování, virtuální model
XaaS	Everything as a Service

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Sled průmyslových revolucí (převzato z [4]).....	11
Obrázek 2: Schematické znázornění Grievesova konceptu digitálního dvojčete	12
Obrázek 3: Vývoj množství publikací zaměřených na digitální dvojče (převzato z [21])	13
Obrázek 4: Časový vývoj publikovanosti konceptu digitálního dvojčete s ohledem na zájmovou oblast (převzato z [8])	14
Obrázek 5: Shluková analýza klíčových slov souvisejících se souborem definic C4, velikost textu odpovídá četnosti výskytu (převzato z [11])	15
Obrázek 6: Schéma vazeb mezi fyzickým a digitálním objektem (převzato z [12])	16
Obrázek 7: Technologie digitálního dvojčete (převzato z [13])	17
Obrázek 8: Digitální dvojče o pěti dimenzích (převzato z [15])	18
Obrázek 9: Využití digitálního dvojčete v průběhu životního cyklu produktu	21
Obrázek 10: Digitální dvojče robotické buňky (převzato z [28]).....	23
Obrázek 11: Multifunkční obráběcí centrum ve virtuální realitě (převzato z [29]).....	24
Obrázek 12: 5C architektura CPS (převzato z [32])	25
Obrázek 13: Čtyři hlavní oblasti vývoje CPS (převzato z [33]).....	26
Obrázek 14: Výčet vybraných dostupných nástrojů pro realizaci DT	29
Obrázek 15: Srovnání návrhu pomocí digitálního modelování s klasickým návrhem (převzato z [39]).....	31
Obrázek 16: W model pro návrh DT (převzato z [19])	32
Obrázek 17: Schematické znázornění významu výpočtových modelů v konceptu CPS (publikováno ve [V15])	33
Obrázek 18: Důsledky vzniku samobuzeného kmitání na kvalitu obráběného povrchu, vlevo před vznikem, vpravo po vzniku.....	34
Obrázek 19: Příklad proměnné topologie vertikální frézky (převzato z [50]).....	35
Obrázek 20: Příklad stability lobe diagramu v základní podobě (převzato z [53])	37
Obrázek 21: Zvolená tříosá vertikální frézka	38
Obrázek 22: Schematické znázornění postupu tvorby výpočtového modelu vertikální frézky pro určení stability řezného procesu.....	39
Obrázek 23: MKP model vertikální frézky s vazbami mezi jednotlivými díly sestavy (publikováno ve [V14])	41
Obrázek 24: Podstata substrukturování dynamických soustav (převzato z [58]).....	42
Obrázek 25: Závislost vlastních frekvencí na poloze vřeteníku	44

Obrázek 26: Implementace stavového modelu vertikální frézky v prostředí Simulink .	46
Obrázek 27: Srovnání výpočetní náročnosti přechodových analýz na dílčích výpočtových modelech.....	46
Obrázek 28: Role experimentu ve výpočtovém modelování.....	47
Obrázek 29: Princip identifikace dynamických systémů.....	47
Obrázek 30: Experimentálně určené odezvy frézky ve frekvenční oblasti pro buzení ve směru osy X (podélný směr stolu) a Y (příčný směr stolu).....	49
Obrázek 31: Určení tlumení pomocí exponenciální obálky	49
Obrázek 32: Polohově závislý přenos stroje ve směru X a Y.....	51
Obrázek 33: Stability lobe diagram pro proměnnou polohu vřeteníku na ose Z, izometrický pohled	52
Obrázek 34: Stability lobe diagram pro proměnnou polohu vřeteníku na ose Z, pohled zepředu.....	52
Obrázek 35: Umístění MFC senzoru na vřeteníku frézky (hnědá barva).....	54
Obrázek 36: Real-time klasifikace úrovně vibrací frézky v časové oblasti pro různé axiální hloubky řezu.....	55
Obrázek 37: Real-time signalizace úrovně vibrací frézky pomocí stavové LED.....	56
Obrázek 38: Real-time klasifikace úrovně vibrací frézky v časové a časově-frekvenční oblasti pro axiální hloubku řezu 1 mm	57
Obrázek 39: Lokalizace mechanických vibrací v leteckých konstrukcích (převzato z [77])	60
Obrázek 40: Princip akustické emise (převzato z [82]).....	61
Obrázek 41: Podstata SHM pomocí PWAS (převzato z [87]).....	62
Obrázek 42: Podstata aplikace FBG (převzato z [89])	62
Obrázek 43: MFC senzor přetvoření	63
Obrázek 44: Strukturální model větroně s použitím skořepinových prvků (převzato z [95])	65
Obrázek 45: Zastoupení materiálů použitých v konstrukci letadla (převzato z [97]).....	65
Obrázek 46: Výpočtové modelování kompozitního materiálu (převzato z [97])	66
Obrázek 47: Schéma dílčích kroků při realizaci CPS pro vibrodiagnostiku letounu	67
Obrázek 48: Fotografie letounu Cessna 172.....	67
Obrázek 49: Fotografie vnitřní části trupu letounu Cessna 172 (levá: zeleně stringer s L profilem, pravá: červeně stringer s C profilem).....	68
Obrázek 50: MKP model části trupu letadla Cessna 172	68

Obrázek 51: Lokalizace vhodných míst pro MFC senzory na jednotlivých nosných prvcích (publikováno ve [V10])	69
Obrázek 52: Instalace MFC do trupu letadla, vlevo nahoře: detail na senzor, vpravo nahoře: pohled na stringery osazené senzory, vlevo dole: odporový dělič a přepětová ochrana, vpravo dole: DAQ ústředna	70
Obrázek 53: Napěťová odezva MFC umístěných na stringerech letadla, časová oblast (publikováno ve [V10])	71
Obrázek 54: Napěťová odezva MFC umístěných na stringerech letadla, časově-frekvenční oblast (publikováno ve [V10]).....	71
Obrázek 55: Implementace MFC ve formě homogenizovaného modelu do MKP modelu (publikováno ve [V9])	73
Obrázek 56: Reprezentativní buňka MFC senzoru (rozměr v μm , publikováno ve [V9])	74
Obrázek 57: Srovnání odezvy MFC ze simulace a experimentu, frekvence buzení 19,8 Hz (publikováno ve [V9]).....	74
Obrázek 58: První instalace MFC na železniční trať, vlevo první lokalita v roce 2019, vpravo druhá lokalita v roce 2020	77
Obrázek 59: Napěťová odezva MFC při průjezdu dvounápravového vozu	77
Obrázek 60: Schéma IoT senzorického systému pro monitorování železnic, vpravo detail hardwarové části (publikováno ve [V1])	79
Obrázek 61: Grafické rozhraní serverové aplikace.....	80
Obrázek 62: Vyhodnocení základních provozních parametrů jedoucího vlaku	81
Obrázek 63: Průběhy napětí a přetvoření kolejnice při průjezdu vlaku v časové a časově-frekvenční oblasti, detaily na průběhy bez a s možnými defekty na povrchu kola	82
Obrázek 64: Vývojové fáze hardwaru CPS v rámci projektu TAČR DELTA 2	83
Obrázek 65: Vytvořený HW a vyhodnocení dat v rámci projektu TAČR TREND	84
Obrázek 66: Realizace CPS a DT na srdcovkové části výhybky v rámci projektu I2T3	84
Obrázek 67: Monitorování lepeného izolovaného styku	85
Obrázek 68: Přínosy dizertační práce v oblasti realizace a využití CPS	86

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výběr charakteristických definic pojmu digitální dvojče (přeloženo z [16])	19
Tabulka 2: Hodnoty tuhostí vazebních prvků v MKP modelu	40
Tabulka 3: Celkový počet prvků MKP modelu frézky	41
Tabulka 4: Výkyvy vlastních frekvencí pro vybrané módy	44
Tabulka 5: Experimentálně určené hodnoty modálního tlumení	50