

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Filip Kšica

Metodika tvorby virtuálního dvojčete dynamické soustavy
Methods for design of virtual twin of a dynamic system

zkrácená verze PhD Thesis

Obor: D-IME Inženýrská mechanika
Školitel: doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
Oponenti:

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

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

KEYWORDS

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

Místo uložení rukopisu:

Knihovna VUT-FSI v Brně, Technická 2896/2, 61669 Brno.

Filip Kšica, 2022

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

OBSAH.....	3
1. ÚVOD	5
2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	6
2.1 Koncept digitálního dvojčete.....	6
2.2 Definice digitálního dvojčete.....	7
2.3 Kyber-fyzikální systém	8
2.4 Nástroje pro tvorbu a využití DT a CPS.....	9
3. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	11
4. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS	11
4.1 Výpočtové modelování vertikální frézky	11
4.2 MKP model a redukce stupňů volnosti.....	13
4.3 Stabilita řezného procesu.....	15
4.4 Real-time monitorování vibrací frézky	15
4.5 Konfrontace poznatků	17
5. CPS PRO LETECTVÍ.....	18
5.1 Konfrontace poznatků	20
6. MODELOVÁNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH VRSTEV.....	20
6.1 Začlenění MFC do výpočtových modelů.....	20
6.2 Fyzikální interpretace odezvy MFC.....	21
7. CPS PRO MONITOROVÁNÍ ŽELEZNIC.....	22
7.1 Konfrontace poznatků	24
8. ZÁVĚR	25
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	26
CURRICULUM VITAE	29
ABSTRAKT	30
ABSTRACT	30

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. Historicky byly nežádoucí nebo neočekávané projevy detekovány a řešeny zásahy 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 v těchto ohledech 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 a kyber-fyzikálních systémů.

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. 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. 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]. Významnou roli v Průmyslu 4.0 hrají tzv. kyber-fyzikální systémy (dále jako CPS) [2] a digitální dvojčata (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.

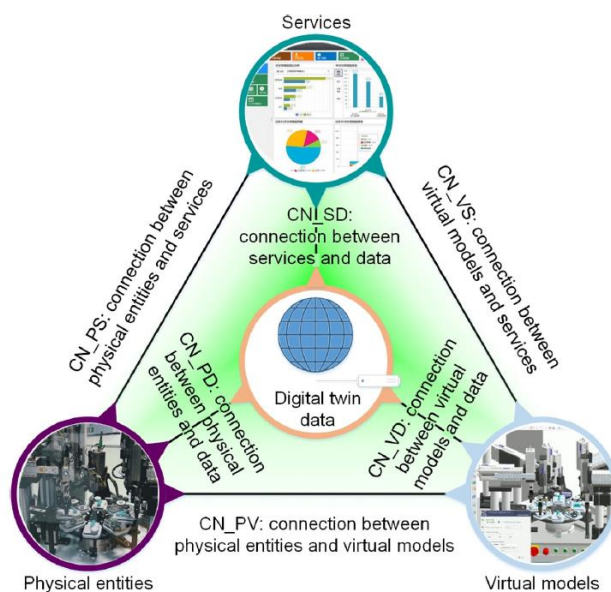
Se vznikem nových metod a přístupů pro práci s DT úzce souvisí i vznik nových pojmů a definic, z nichž význam některých není i přes jejich značné využívání a publikovanost zcela sjednocený, a to především kvůli jejich aplikaci v širokých, často pouze okrajově spolu souvisejících oblastech. Jedním z těchto pojmů je vlastní digitální dvojče, které se často spojuje či zaměňuje s celou řadou podobných pojmů¹, jejichž význam se však vzhledem ke aplikační oblasti, ve které se objevují, značně liší. 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.

2.1 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 [4], popisovaného jako jednoduchý systém skládající se ze tří prvků: reálného objektu, digitálního objektu a interaktivní vazby mezi nimi. Od tohoto roku však 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 dvojčete. 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 [5], kteří v roce 2019 definovali rozšířený obecnější model o pěti dimenzích, kde Obrázek

¹ Například virtual twin, digital couple, digital clone, virtual mirror, virtual model, digital thread, digital shadow, product avatar aj.

1 znázorňuje schematickou interpretaci jejich konceptu založeného na definici dat, vazeb a služeb jako samostatných entit.



Obrázek 1: Digitální dvojčte o pěti dimenzích (převzato z [6])

2.2 DEFINICE DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

Pro vymezení a pochopení toho, co digitální dvojčte má nebo nemá splňovat, je nutné nahlédnout na některé z obecně přijatých definic. Konkrétní formulace aktuálně přijatých definic jsou chronologicky uvedeny například v [7].

Tabulka 1: Výběr charakteristických definic DT (přeloženo z [7])

#	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 ² a služeb.
6	2016	Simulace fyzického objektu s cílem predikovat jeho budoucí chování.

² Internet of Things (IoT).

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 ³ , 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.

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 fidelitu⁴ bez ohledu na požadavky definované pro konkrétní aplikaci, na což poukazují i autoři [8].

2.3 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 [9], 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 embedded⁵ 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 2.2) 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 [10] navrhl 5C architekturu, která sestává sekvenční postup při

³ Digital Thread, koncept DT využívaný k popisu životního cyklu produktu.

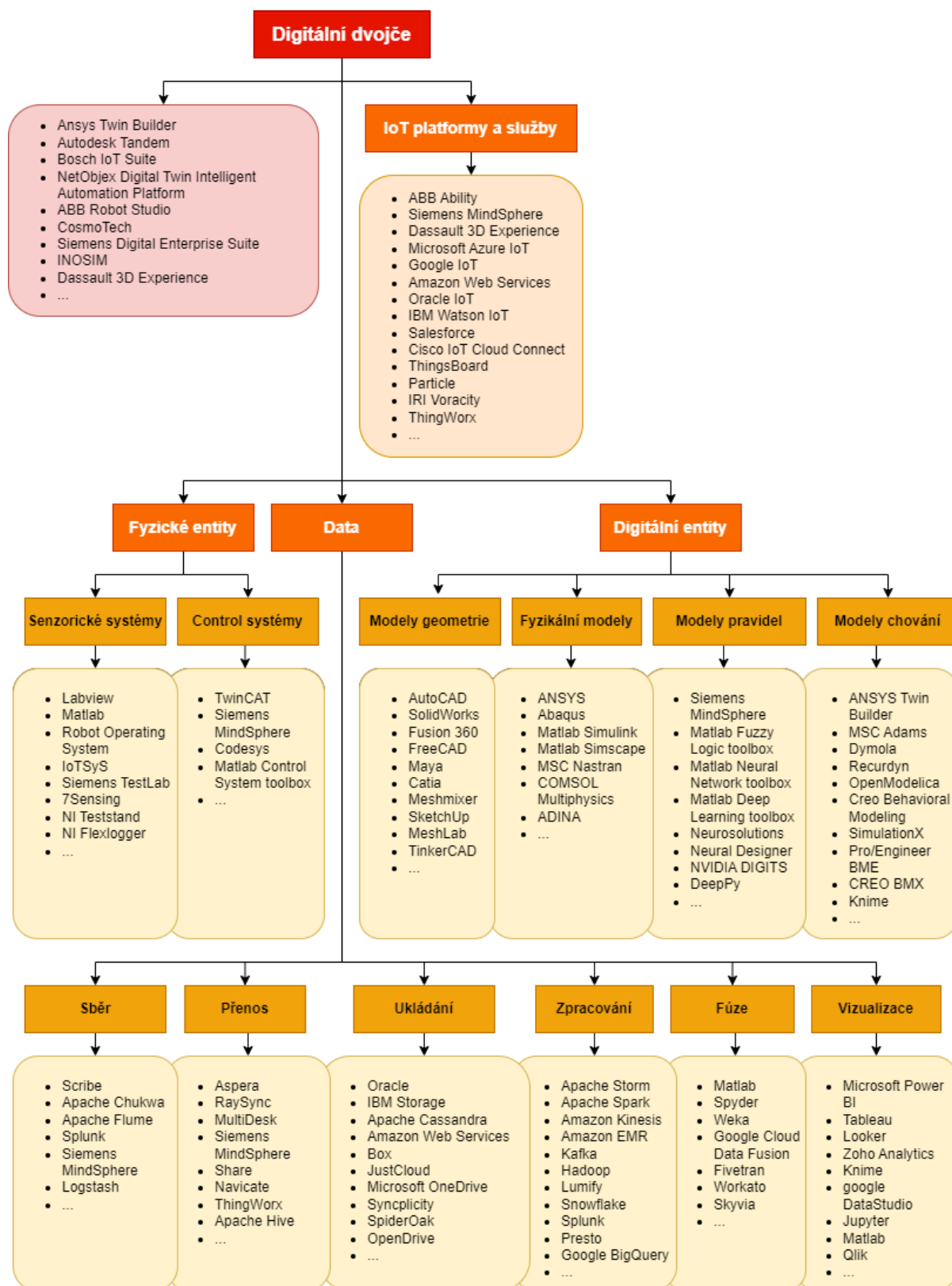
⁴ Můžeme chápat jako stupeň provázání či výstižnost, ne nutně přesnost.

⁵ V překladu vestavěné systémy, embedded systémy jsou počítačové systémy plnící specifické funkce uvnitř větších elektromechanických celků.

návrhu a 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. 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.

2.4 NÁSTROJE PRO TVORBU 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. Výběr dostupných software je orientován s ohledem na inženýrské a průmyslové aplikace v oblasti modelování dynamických soustav (Obrázek 2). 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) [11] či Autodesk Tandem [12]. U nástrojů vyvíjených průmyslovými lidry (Siemens, ABB, Bosch aj.) je však třeba předpokládat možnost jejich efektivního 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.



Obrázek 2: Výčet vybraných dostupných nástrojů pro realizaci DT

3. 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.

4. TVORBA VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO POTŘEBY DT A CPS

S ohledem na interní strukturu CPS 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.
- Senzorické 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, 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.

4.1 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ VERTIKÁLNÍ FRÉZKY

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.

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 [13–15] 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.

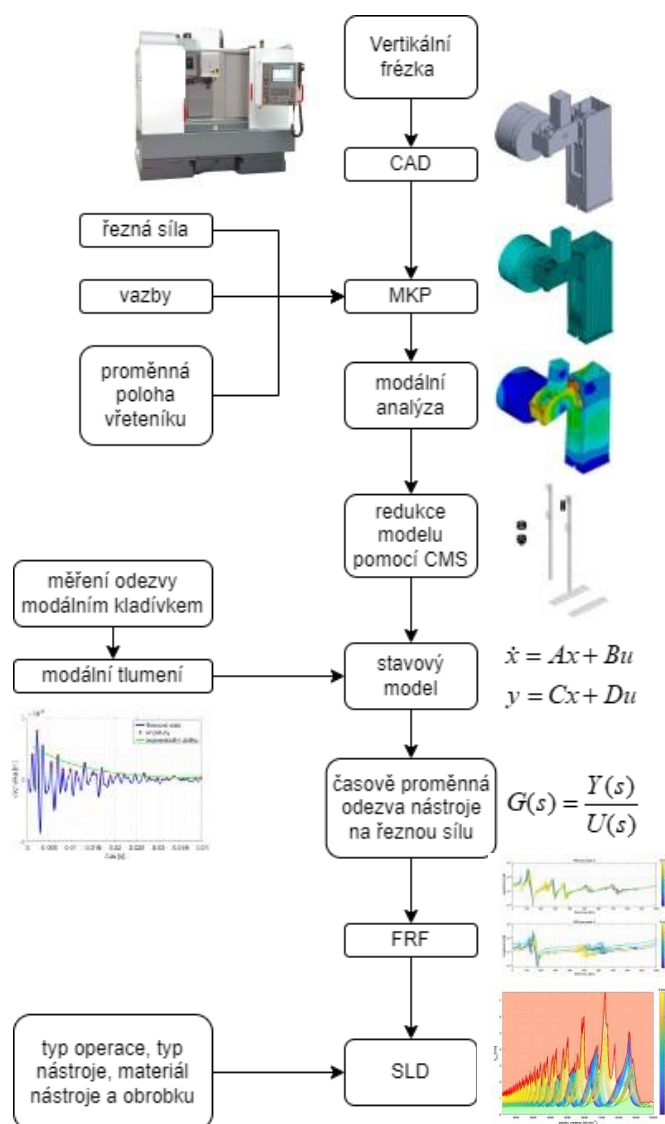
U procesu třískového obrábění může při nevhodné kombinaci parametrů docházet k fenoménu zvanému *regenerative chatter*⁶, který představuje vznik samobuzených vibrací stroje [16]. Tento jev má za následek výrazné snížení kvality povrchu, nadměrné opotřebení nástroje a ložisek, v kritickém případě poškození 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.

Použitá teorie stability na základě určení limitní třísky 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 [18] autora Jiřího Tlustého a knihu [19] autorů Smitha a Schmitze. Dynamická poddajnost stroje je určena na základě tzv. RCSA⁷ metodu [17], metodika využitá k vytvoření výpočtového modelu ve formě substruktur zohledňovala proměnnou 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.

Celý proces tvorby výpočtových modelů, jejich redukce a využití pro potřeby určení stability řezného procesu je schematicky vyobrazen níže (Obrázek 3).

⁶ Zjednodušeně lze říct, že samobuzené vibrace nastanou tehdy, když má nástroj, včetně 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 vybudena některá z vlastních frekvencí stroje.

⁷ Receptance Coupling Substructure Analysis.



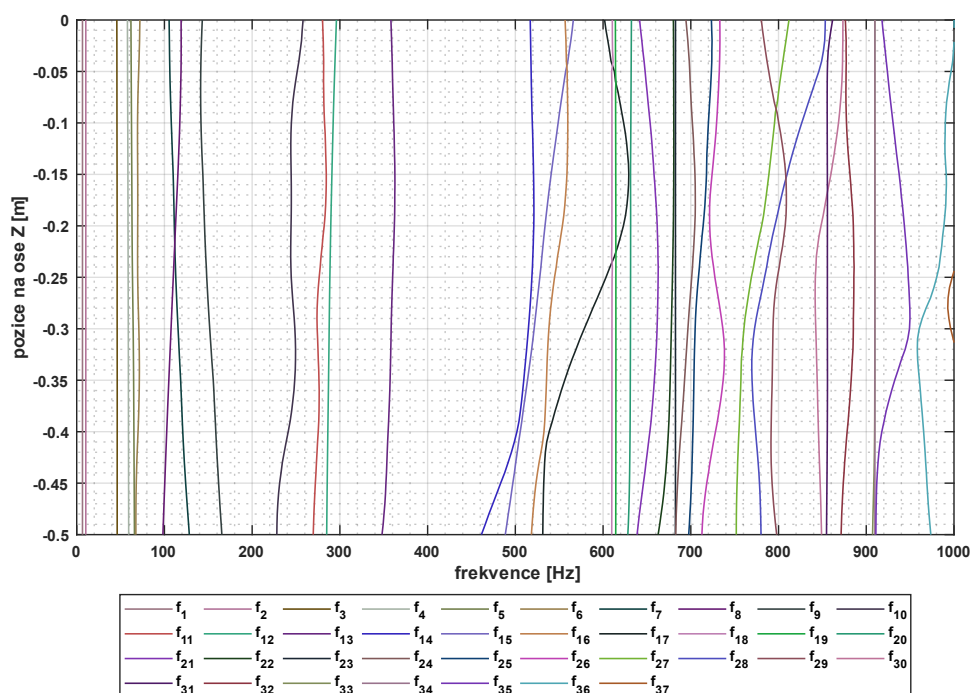
Obrázek 3: Schematické znázornění postupu tvorby výpočtového modelu vertikální frézky pro určení stability řezného procesu

4.2 MKP MODEL A REDUKCE STUPŇŮ VOLNOSTI

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 a na základě dynamických vlastností jednotlivých entit určit dynamické vlastnosti celé struktury. V případě vertikální frézky byla zvolena metoda CMS [20] založená uvažující rozhraní mezi subsystémy jako vetknutá, byla provedena analýza typu SUBSTR, jejíž výstupem jsou modely s prvky typu MATRIX50. Následně byl pro další výrazné snížení výpočetní náročnosti navazujících simulací redukovaný model převeden do stavového prostoru.

Protože dynamická tuhost stroje, která vstupuje 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. Na redukovaném modelu byla realizována modální analýza,

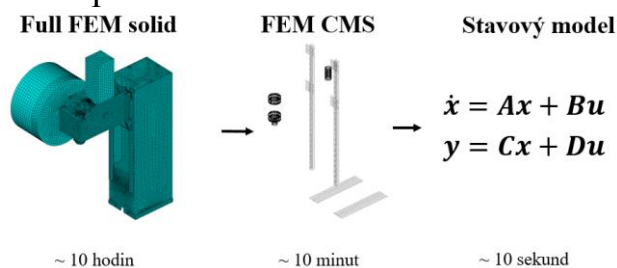
na které bylo možno pozorovat výkyvy vlastních frekvencí pro různé polohy vřeteníku (viz Obrázek 4), přičemž nelze obecně říci, pro kterou polohu vřeteníku bude hodnota dynamické tuhosti dosahovat svého maxima, případně minima.



Obrázek 4: Závislost vlastních frekvencí frézky na poloze vřeteníku

Cílem bylo umožnění realizací simulací dynamických dějů v reálném či alespoň kvazi-reálném čase, tj. maximálně v řádu sekund až desítek sekund, přičemž výrazné zesílení redukce ve strukturní formě modelu nebylo již možné, proto byl zvolen přístup založený na transformaci do podoby stavového modelu. 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.

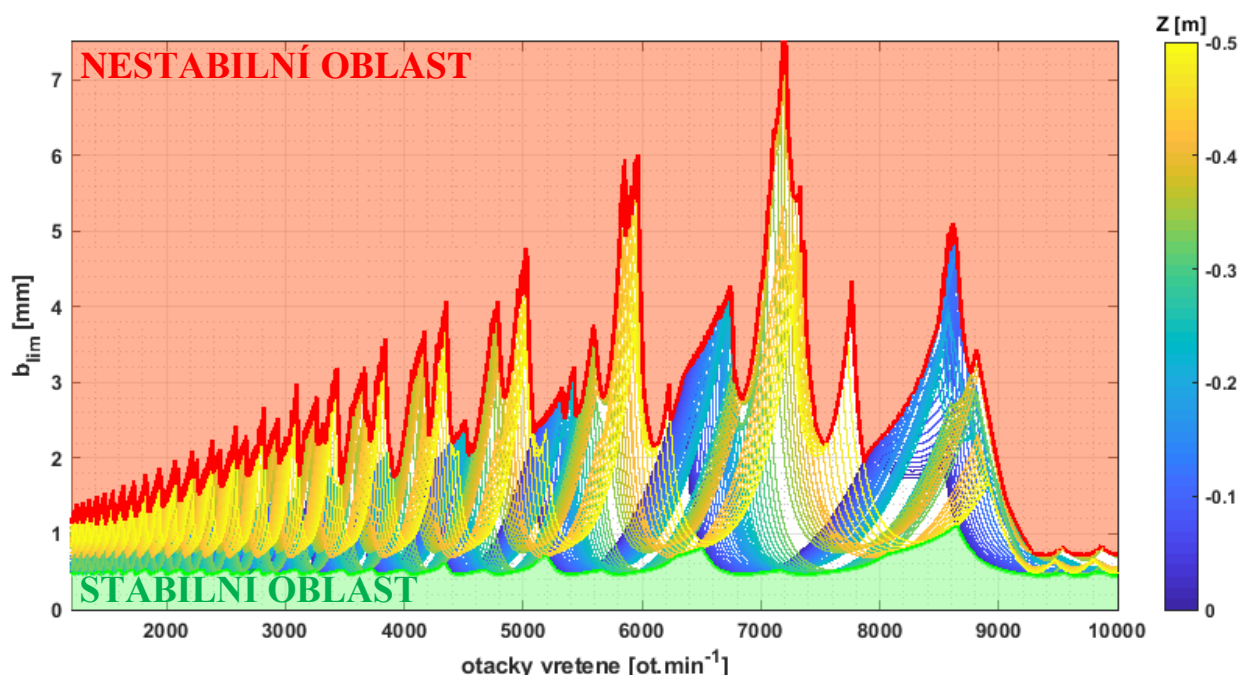
Je nutné podotknout, že nebyly provedeny referenční transientní analýzy na plném, neredukovaném MKP modelu ze SOLID prvků, avšak vzhledem k předchozím analýzám v diplomové práci autora [21] provedených na jednodušších výpočtových modelech lze očekávat, že transientní analýza v požadovaném rozsahu by na použitém výpočetním hardware trvala v řádu desítek hodin. Přechodové analýzy provedené na modelu redukováném pomocí CPS by se pak pohybovaly v řádu desítek minut až hodin, ve stavovém prostoru pak v řádu sekund až desítek sekund (viz Obrázek 5).



Obrázek 5: Srovnání výpočetní náročnosti přechodových analýz na dílčích výpočtových modelech

4.3 STABILITA ŘEZNÉHO PROCESU

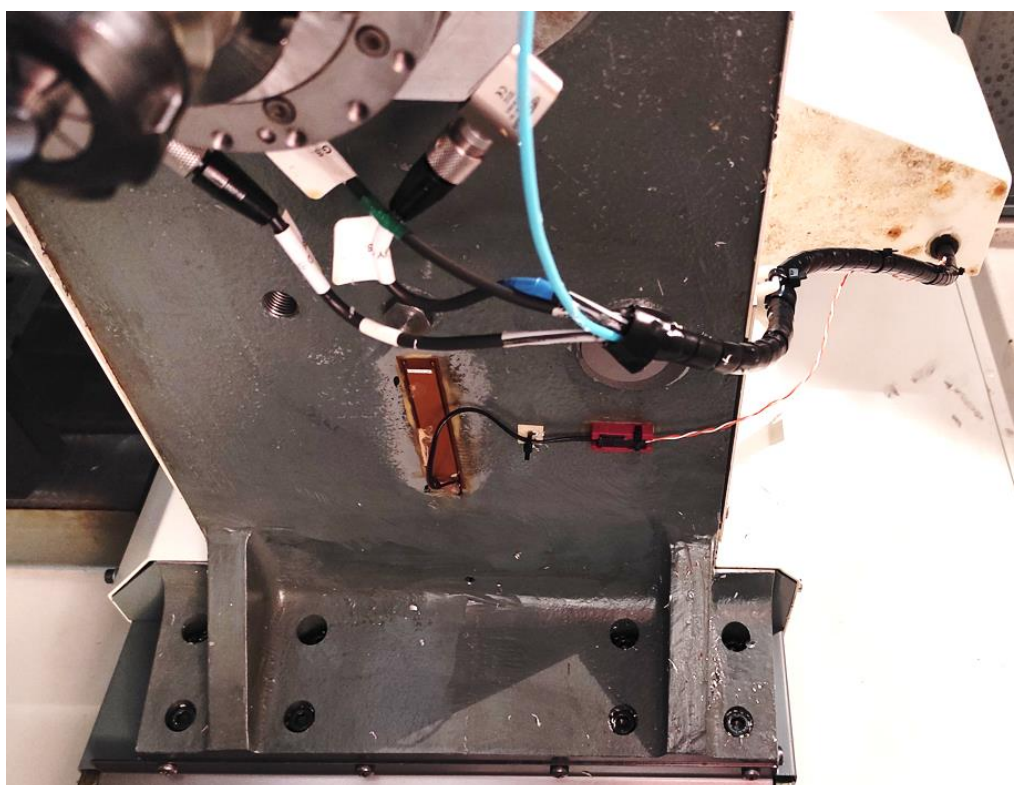
Po dokončení všech předchozích kroků výpočtového modelování a integrace experimentálně určených dat byl finalizován výpočtový model v prostředí Matlab / Simulink. V posledním kroku byla využita metodika stability řezného procesu a byly provedeny simulace odezvy ve frekvenční oblasti pro směry X a Y, které byly pro zvolený řezný proces převedeny do formy orientované přenosové funkce FRF_o a fázového posuvu ε potřebné k určení závislosti limitní šířky třísky b_{lim} na otáčkách stroje a poloze vřeteníku na ose Z (jinak známé jako SLD). Výsledné zobrazení stabilních, nestabilních a polohou na ose Z podmíněně stabilních oblastí znázorňuje Obrázek 6, ve kterém jsou ve spektru žluté až modré barvy znázorněny SLD křivky pro jednotlivé polohy, červeně je vyplněna oblast vždy nestabilní a zeleně oblast vždy stabilní.



Obrázek 6: Stability lobe diagram pro proměnnou polohu vřeteníku na ose Z, pohled zepředu

4.4 REAL-TIME MONITOROVÁNÍ VIBRACÍ FRÉZKY

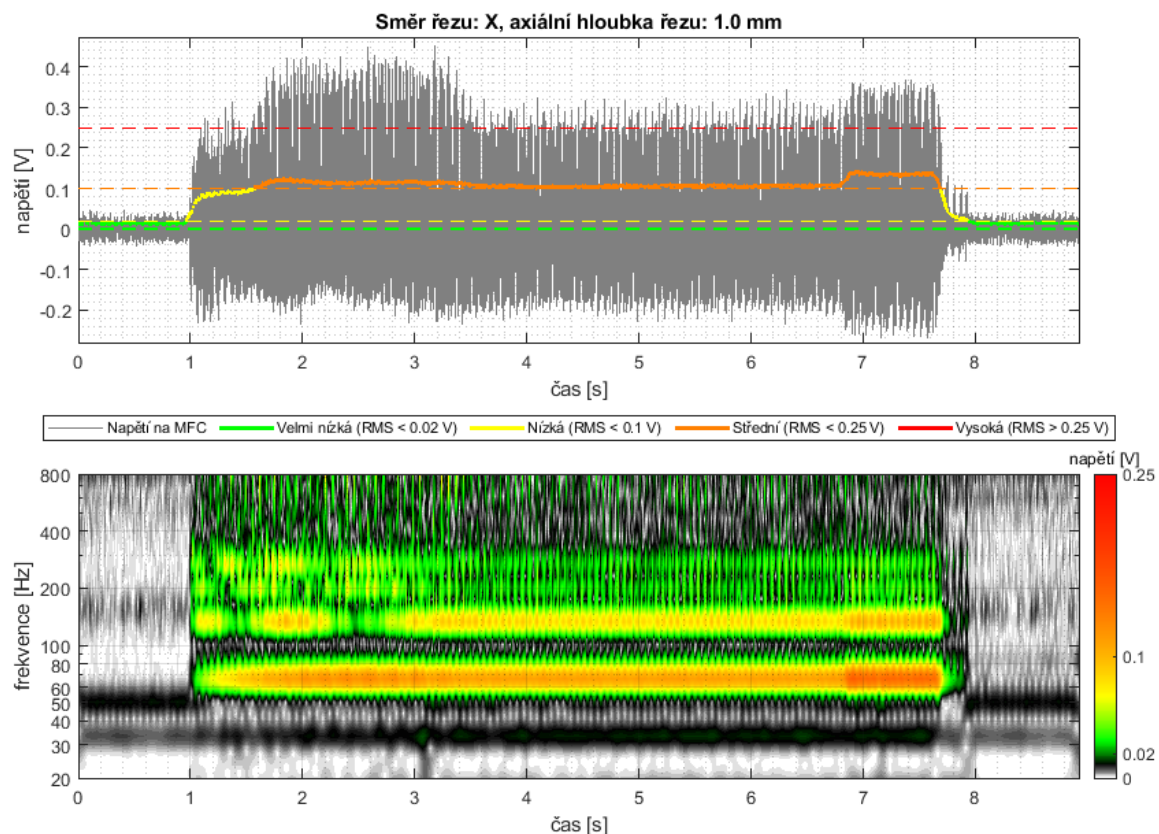
V případě zvolené tříosé frézky byl formulován požadavek na vytvoření CPS, který by umožňoval automatizovaný sběr dat a jejich real-time vyhodnocení a vizualizaci provozních vibrací pro potřeby obsluhy stroje. Cílem nebylo kvantifikovat aktuální výchylky nástroje či částí stroje, ale kvalitativním způsobem podávat informaci o aktuálních vibracích, které přímo souvisí s přítomností *chatteru*. Systém byl založen na integraci aktivního MFC senzoru přímo na vřeteník frézky do místa citlivého na vibrace stroje (viz Obrázek 7). Měřená odezva senzoru byla vyhodnocena v časové a časově-frekvenční oblasti a aktuální úroveň vibrací byla vizualizována ve formě virtuální stavové LED.



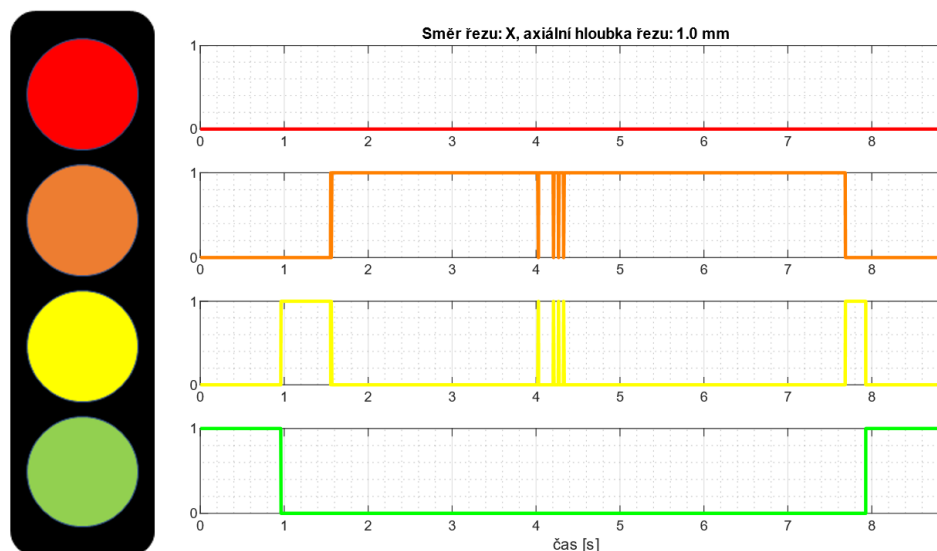
Obrázek 7: Umístění MFC senzoru na vřeteníku frézky (hnědá barva)

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. znázorňuje surová naměřená data (šedá barva), klasifikační úrovně (přerušovaná zelená, žlutá, oranžová a červená barva) a RMS signálu, které je s těmito úrovněmi porovnáváno.

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 FPGA 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 9). V tomto kroku lze implementovat sofistikovanější metody pro vyhodnocení, například fuzzy-logiku se vstupními metadaty přímo ze stroje, ta však nebyla pro potřeby této studie k dispozici. 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.



Obrázek 8: Real-time klasifikace úrovně vibrací frézky v časové a časově-frekvenční oblasti pro axiální hloubku řezu 1 mm



Obrázek 9: Real-time signalizace úrovně vibrací frézky pomocí stavové LED

4.5 KONFRONTACE POZNATKŮ

Díky vytvoření redukovaného 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 redukovaných 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 redukcii 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.

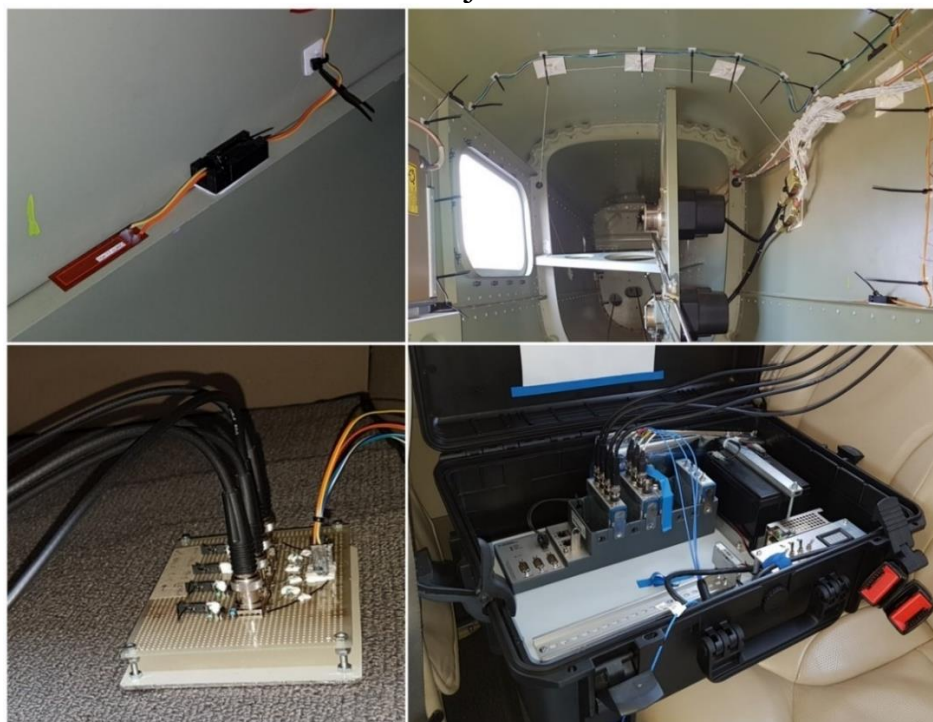
5. CPS PRO LETECTVÍ

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. Obdobné funkce bylo snahou docílit i v kontextu letectví, kdy byly formulovány požadavky na měření vibrací v konstrukci během letu, a to pro potřeby vyhodnocení v rámci CM a SHM. Problematika zasahovala do tří hlavních oblastí:

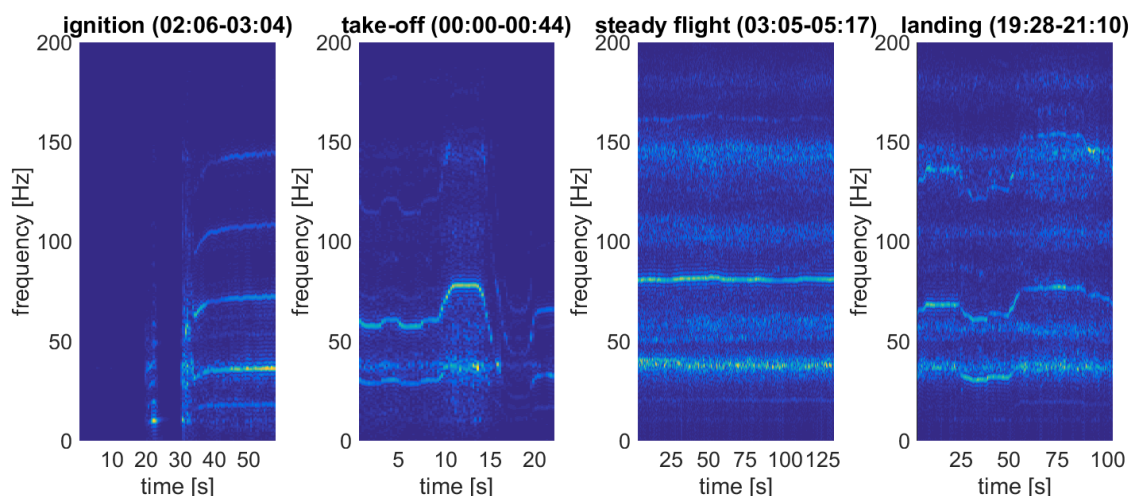
- Typ senzorů – analýza aktuálně dostupných senzorů pro měření mechanických vlastností (vibrací, deformace aj.) struktur, zohlednění jejich využitelnosti pro autonomní CPS systémy, nákladů atd.
- Rozmístění senzorů – zhodnocení přístupů pro nalezení vhodného počtu a rozmístění senzorů v rámci monitorovaných 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

Do předurčených míst na nosných prvcích konstrukce byly umístěny MFC senzory připojené k mobilní měřicí ústředně, která byla schopna zaznamenávat napět'ové signály v reálném čase. Funkčnost byla ověřena v rámci letové zkoušky, během které probíhal manuální záznam dat ve zhruba jeden až dvouminutových segmentech. Finální realizaci měřicího řetězce znázorňuje Obrázek 10.



Obrázek 10: Instalace MFC do trupu letadla, vlevo nahoře: detail na senzor, vpravo nahoře: pohled na stringery osazené senzory, vlevo dole: odporový dělič a přepěťová ochrana, vpravo dole: DAQ ústředna



Obrázek 11: Napět'ová odezva MFC umístěných na stringerech letadla, časově-frekvenční oblast (publikováno ve [V10])

Dalo se předpokládat, že dominantní zdroj vibrací představoval především čtyřválcový spalovací motor⁸, potvrdilo vykreslením odezvy v časově-frekvenční oblasti (Obrázek 11), 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.

5.1 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 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 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.

6. MODELOVÁNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH VRSTEV

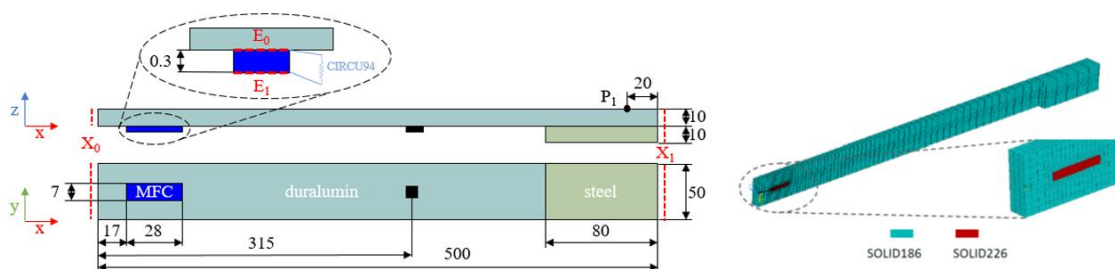
Jak bylo demonstrováno na předchozích příkladech aplikací, piezoelektrické vrstvy představují jádro navržených CPS systémů pro monitorování mechanických vibrací. Přestože v těchto aplikacích postačovalo chápat senzor jako *black box*, u kterého máme na vstupu mechanické vibrace a na výstupu elektrické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

6.1 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

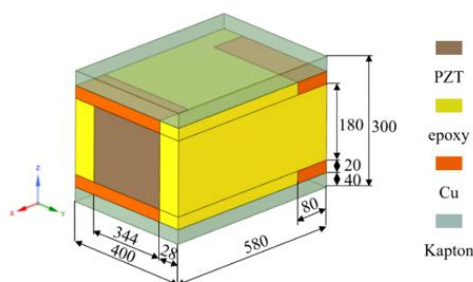
⁸ Poskytnutý letoun Cessna byl osazen motorem LYCOMING IO-360-L2A s pevnou dvoulistou vrtulí.

226⁹ prvků, jak bylo publikováno ve [22], v případě MFC bylo nutné provést homogenizaci komplexní struktury, které byla věnována diplomová práce [23] a publikace [24]. Homogenizovaný model MFC pak lze integrovat do výpočtového modelu obdobným způsobem, jako v případě PZT (viz Obrázek 12).



Obrázek 12: Implementace MFC ve formě homogenizovaného modelu do MKP modelu

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 13).



Obrázek 13: Reprezentativní buňka MFC senzoru (rozměr v μm)

Výsledky homogenizace byly verifikovány s použitím experimentální soustavy sestávající se z vetknutého nosníku s MFC senzorem umístěným u jeho vetknutí, a publikovány v rámci [24].

6.2 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) 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

⁹ 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.

na zatížení v podélném směru (ve směru vláken). Za těchto předpokladů byly pro lineární piezoelektrický materiál namáhaný prostým tahem v publikaci [25] odvozen tvar základních elektromechanických rovnic (6.1) a (6.2)

$$\varepsilon_x = S_{11}^E \sigma_x + d_{31} E_z \quad (6.1)$$

$$D_z = d_{31} \sigma_x + \epsilon_{33}^T E_z \quad (6.2)$$

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

$$\varepsilon_x(t) = \frac{1}{e_{31}LB} \left(\frac{1}{R_L} \int_0^t U(t) dt + C_{MFC} U(t) \right) \quad (6.3)$$

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 karty¹⁰, 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.

7. 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 [26], avšak i v dnešní moderní době je řada z nich odhalena pouze občasnými vizuálními inspekcemi. Aktuálně využívané přístupy pro detekci defektů popisuje autor [27], přičemž z hlediska umístění měřicích systému se v současnosti využívají dva přístupy, v kolejišti (wayside) [28] nebo na vlcích (onboard) [29]. Retrofitting

¹⁰ Například v případě dříve uvedené napěťové karty NI 9234 je tato hodnota 305 kΩ.

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 vlacích, ale slouží pouze jako reaktivní systémy, jejichž úkolem je zabránit nadměrnému poškození trati vlivem defektů přítomných na vlacích.

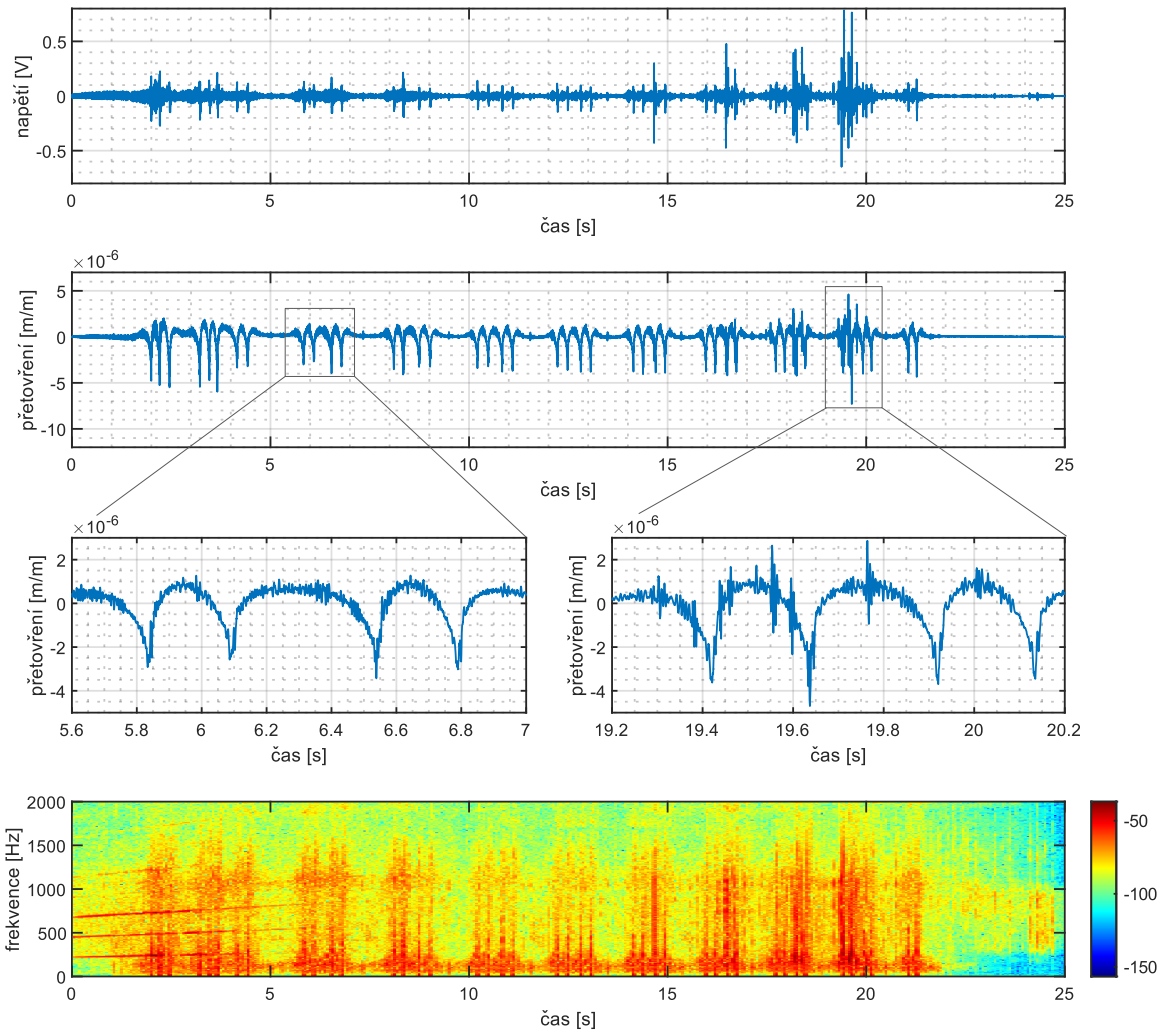
S využitím metodiky tvorby DT a CPS systémů popsané v této práci, a poznatků z předchozích aplikací v leteckém a obráběcím průmyslu, byl navržen, aplikován a otestován systém pro monitorování železnic. Stejně jako u předchozích dvou aplikací na obráběcím stroji a v letectví, ve výchozí formě se jednalo o snímací systém, který skrze měření vibrací dokáže poskytovat užitečné informace v digitální formě, což lze považovat za základní podobu CPS, jehož jádrem je právě snímací piezoelektrický prvek.



Obrázek 14: První instalace MFC na železniční trať, vlevo první lokalita v roce 2019, vpravo druhá lokalita v roce 2020

Naměřený průběh napětí (Obrázek 15) kvalitativně odpovídá teoretickému průběhu, kdy při přibližování kola k senzoru dochází k jeho nárůstu a po přejezdu k poklesu, což je charakteristický průběh přetvoření uveden například v [27]. Na obrázku níže je znázorněn příklad naměřených dat při průjezdu osobního vlaku o devíti vagónech taženého šestinápravovou lokomotivou a rozjíždějícího se ze stanice nedaleko umístění sensorického systému. Lze si všimnout, že ve spektru vibrací lze například vidět nejen charakteristické frekvence diesellové 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, stejně tak jako poskytovat základní provozní informace o projíždějícím vlaku přímo obsluze železnic.



Obrázek 15: 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

7.1 KONFRONTACE POZNATKŮ

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. Navržený a realizovaný systém je momentálně součástí komplexního bezdrátového IoT senzorského systému vyvíjeného v rámci aktuálně řešených projektů na pracovišti, který je instalován na několika lokalitách v ČR a na Taiwanu a je v provozu už více jak 16 měsíců s více jak 8000 zaznamenanými průjezdy. Metodika tvorby CPS systémů s přidáním funkcemi pro implementaci jako IoT systému a dosažené výsledky, nejen v podobě vlastní metodiky a vytvořených CPS senzorských systémů, ale především velkého množství naměřených dat, mohou tvořit základ další spolupráce s průmyslem ve vývoji a aplikacích nové generace chytrých senzorských systémů, které pomohou zvyšovat bezpečnost a spolehlivost železniční dopravy.

8. 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. 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] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] *Workshop on Cyber-Physical Systems 2006* [online]. 2006. Dostupné z: <https://cps-vo.org/category/events/2006/workshop-cyber-physical-systems-2006>
- [10] 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
- [11] *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>
- [12] *AUTODESK Tandem* [online]. 2022. Dostupné z: <https://intandem.autodesk.com/>
- [13] 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
- [14] 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.
- [15] 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/mateconf/201821117005
- [16] 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
- [17] 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
- [18] TLUSTY, Jiri. *Manufacturing Processes and Equipment*. 1. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000. ISBN 0-201-49865-0.
- [19] 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
- [20] 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
- [21] KŠICA, Filip. *Models of dynamics and responses of multi-body systems*. B.m., 2016. Brno University of Technology.
- [22] 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
- [23] BĚHAL, Josef. *Integrace smart materiálu do mechanické konstrukce*. B.m., 2019. Brno University of Technology.
- [24] KSICA, Filip, Josef BEHAL, Ondrej RUBES a Zdenek HADAS. Homogenized Model of Piezoelectric Composite Structure for Sensing Purposes. In: [online]. 2020, s. 358–365. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-29993-4_44
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] LAGNEBÄCK, Robert. Evaluation of wayside condition monitoring technologies for condition-based maintenance of railway vehicles. 2007, 1–138.
- [29] 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

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno: Ing. Filip Kšica
Datum narození: 16.01.1992
Občanství: ČR
E-mail: Filip.Ksica@vutbr.cz

Zaměstnání:

2015–2020 Servisní technik, Unimed Praha s.r.o.
2017–2018 Technicko-hospodářský pracovník, FSI VUT v Brně
2018–dosud Odborný asistent, FSI VUT v Brně

Vzdělání:

2007–2010 Výuční list, obor Mechanik elektronických zařízení, SŠITSP
Purkyňova 97, 612 00 Brno
2007–2011 Vzdělání zakončené maturitou, obor Slaboproudá elektrotechnika,
SPŠE Kounicova 16, 602 00 Brno
2011–2014 Vzdělání zakončené titulem Bc., obor Mechatronika, FSI VUT
v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno
2014–2016 Vzdělání zakončené titulem Ing., obor Inženýrská mechanika a
biomechanika, FSI VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno
2016–dosud Vzdělání zakončené titulem Ph.D., obor Inženýrská mechanika,
FSI VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno

Publikační a vědecká činnost:

Autor a spoluautor 18 publikací, z toho 6 v impaktovaných časopisech. Celkem 119 citací a h-index 6 dle databáze Scopus. Člen řešitelského týmu řady mezinárodních a tuzemských projektů, spoluautor jednoho užitého vzoru.

Jazykové znalosti:

Čeština – mateřský jazyk
Angličtina – C1
Němčina – A1

Technické znalosti a dovednosti:

Certifikace 50/1978 §6 pro práci s elektrickými zařízeními, kapitánský průkaz kategorie B. Znalost inženýrských simulačních a modelovacích software, kancelářských programů, software pro editaci foto a videa, nástrojů pro 3D tisk.

Zájmy:

3D tisk, fotografování, sport, hudba.

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 algoritmy monitorování stavu konstrukcí a prediktivní údržby.

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 context of currently solved 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 digital twin and are introduced in the last part of this thesis in 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.