



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE OBRÁBĚCÍHO
STROJE**

DIGITAL TWIN DESIGN OF THE MACHINE TOOL

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Kroupa

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

BRNO 2022

Abstrakt

Tato dizertační práce je zaměřena na problematiku návrhu digitálního dvojčete obráběcích strojů. Hlavním cílem je navrhnout digitální dvojče obráběcího stroje. Rešerše v oblasti digitálních dvojčat ukazuje nejednoznačný pohled na koncept digitálního dvojčete. Proto je přistoupeno k formulování systematické definice digitálního dvojčete a jeho hlavních součástí. Definice je pak rozšířena o metodiku návrhu digitálního dvojčete. Tato metodika je v druhé části práce aplikována při návrhu digitálního dvojčete výrobní buňky UVSSR Cell. Díky tomu je možné navrhnout digitální dvojče, představující nástroj pro řešení tří technických problémů, kterými jsou monitorování stavu technické soustavy, predikce chyby přesnosti najetí do polohy způsobené změnou teplot a podpora uživatele při obsluze technické soustavy. Na závěr je softwarová a hardwarová část navrženého digitálního dvojčete implementována spolu s vytvořeným komunikačním rozhraním integrujícím uživatele prostřednictvím virtuální a rozšířené reality.

KLÍČOVÁ SLOVA

Digitální dvojče, kyber-fyzikální systém, virtuální realita, rozšířená realita

Abstract

This thesis focuses on the design of a digital twin of machine tools. The main objective is to design a digital twin of a machine tool. A survey in the field of digital twins shows an ambiguous view of the concept of digital twin. Therefore, it is proceeded to formulate a systematic definition of digital twin and its main components. The definition is then expanded to include a design methodology for the digital twin. This methodology is applied in the second part of the thesis to the design of a digital twin of a UVSSR Cell manufacturing cell. As a result, it is possible to design a digital twin representing a tool for solving three technical problems which are monitoring the state of the technical system, prediction of the positioning accuracy error caused by temperature changes and user support in the operation of the technical system. Finally, the software and hardware part of the proposed digital twin is implemented together with the developed communication interface integrating the user through virtual and augmented reality.

KEYWORDS

Digital twin, cyber-physical system, virtual reality, augmented reality

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KROUPA, Jiří. *Návrh digitálního dvojčete obráběcího stroje*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137827>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Vladislav Singule.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval svému školiteli doc. Ing Vladislavovi Singulemu, CSc. za jeho trpělivost, ochotu a rady. Zvláštní poděkování pak patří mému školiteli specialistovi Ing. Jiřímu Kovářovi, Ph.D., díky kterému mohla tato práce vzniknout. Za jeho odborné rady, konzultace, trpělivost a za jeho podporu v těžkých chvílích. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing., Dipl.-Ing, Michalovi Holubovi, Ph.D., a dalším kolegům z ústavu ÚVSSR za jejich cenné rady a podporu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také mé rodině za trpělivost a podporu v průběhu doktorského studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Vladislava Singuleho, CSc., a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29.3.2022

.....

Kroupa Jiří

OBSAH

1. MOTIVACE.....	7
2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	9
2.1 Internet věcí (IoT).....	9
2.1.1 Architektura	10
2.2 Kyber-fyzikální systémy (CPS)	11
2.2.1 Architektura	12
2.3 Digitální dvojče.....	13
2.3.1 Nástroj pro podporu rozhodování.....	15
2.3.2 Studium dlouhodobého chování systému a jeho predikce.....	16
2.3.3 Analýza stavu systémů pro zlepšení plánování údržby	17
2.3.4 Implementace digitálního dvojčete.....	17
2.4 Big Data	18
2.5 Chytré továrny	21
3. ANALÝZA A SYNTÉZA POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE.....	23
3.1 Formulace problému	23
3.2 Cíle dizertační práce	23
3.3 Zvolené metody zpracování.....	24
4. SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE.....	25
4.1 Systém podstatných a nepodstatných veličin u digitálního dvojčete.....	25
4.2 Digitální dvojče v čase.....	26
4.3 Digitální dvojče v prostoru	28
4.3.1 Digitální dvojče	30
4.3.2 Technická soustava.....	35
4.3.3 Uživatel.....	35
4.3.4 Okolí	35
4.3.5 Uložiště	36
4.4 Metodika návrhu digitálního dvojčete	36
4.5 Dílčí závěr dizertační práce	42
5. APLIKACE METODIKY PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE VÝROBNÍ BUŇKY UVSSR CELL.....	43
5.1 Identifikace technické soustavy	43
5.1.1 Vazba TS3	44
5.1.2 Vazba TS4	45
5.1.3 Vazba TS1	45
5.1.4 Vazba TS2	45
5.1.5 Struktura technické soustavy	45
5.2 Návrh digitálního dvojčete pro monitorování stavu	46
5.2.1 Zdroj dat v rámci technické soustavy	46
5.2.2 Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete	47
5.2.3 Vazba DD1	48
5.2.4 Struktura digitálního dvojčete pro monitorování stavu technické soustavy	48
5.3 Návrh digitálního dvojčete pro predikci chyby přesnosti najetí do polohy způsobenou změnou teplot.....	49
5.3.1 Geometrická přesnost	50

5.3.2	Pracovní přesnost	51
5.3.3	Výrobní přesnost	51
5.3.4	Vliv teploty na přesnost obráběcího stroje	51
5.3.5	Současné metody kompenzace teplotních chyb	52
5.3.6	Identifikace soustavy	53
5.3.7	Syntéza	58
5.3.8	Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete	60
5.3.9	Modul M1.....	60
5.3.10	Modul M2.....	60
5.3.11	Modul M3.....	61
5.3.12	Modul M4.....	61
5.3.13	Struktura digitálního dvojčete pro predikce chyby přesnosti najetí do polohy obráběcího centra na základě změny teplot.....	61
5.4	Návrh digitálního dvojčete pro podporu uživatele při obsluze technické soustavy.....	62
5.4.1	Podpora uživatele při obsluze výrobní buňky UVSSR Cell	62
5.4.2	Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete pro podporu uživatele při obsluze technické soustavy	63
5.4.3	Modul M5.....	63
5.4.4	Struktura digitálního dvojčete pro podporu uživatele při obsluze technické soustavy	63
5.5	Digitální dvojče výrobní buňky UVSSR Cell	64
5.6	Uživatel.....	64
5.6.1	Vazba V7	64
5.6.2	Vazba V2	65
5.7	Propojení technické soustavy a digitálního dvojčete.....	65
5.7.1	Vazba V1	65
5.8	Uložiště.....	65
5.8.1	Vazba V4.....	65
5.8.2	Vazba V3.....	65
5.9	Okolí	65
5.9.1	Vazba V9.....	66
5.10	Struktura kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell	66
6.	IMPLEMENTACE DIGITÁLNÍHO DVOJČETE VÝROBNÍ BUŇKY UVSSR CELL.....	68
6.1	Technická soustava.....	68
6.2	Digitální dvojče	70
6.2.1	Komunikační rozhraní.....	70
6.2.2	Uživatelské rozhraní.....	70
6.2.3	Modul M1.....	74
6.2.4	Modul M2.....	75
6.2.5	Modul M3.....	75
6.2.6	Modul M4.....	75
6.2.7	Modul M5.....	75
6.2.8	Vazby	75
6.3	Propojení technické soustavy a digitálního dvojčete.....	76
6.3.1	Vazba V1	76
6.4	Uložiště.....	76
6.4.1	Vazba V3.....	76

7. PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	77
7.1 Pedagogický přínos práce	77
7.2 Vědecký přínos práce.....	77
7.3 Praktický přínos práce	77
8. ZÁVĚR.....	83

ÚVOD

Trendem ve výrobě je neustálé zvyšování produktivity výroby při minimálně zachování její kvality, přičemž mezi klíčové faktory ovlivňující produktivitu výrobních strojů patří stupeň automatizace, inprocesní kontroly, neplánované odstávky vlivem poruch strojů a vhodně nastavená filozofie kolaborace člověka se strojem. Pro výrazné technologické skoky, které vedly ke zvyšování produktivity a kvality výroby, se vžil název průmyslové revoluce. V aktuální době se nacházíme v období 4. průmyslové revoluce, která je označována jako Průmysl 4.0. Hlavním cílem 4. průmyslové revoluce je vytvoření tzv. chytrých továren na základě implementace technologií jako jsou kyber-fyzikální systémy, digitální dvojčata, internet věcí, big data a například komunikace M2M. Zavádění principů Průmyslu 4.0 vede k vyšší efektivnosti a rychlosti výroby a zlepšení údržby zařízení včetně snížení prostojů.

Velkou roli v Průmyslu 4.0 představuje aplikace kyber-fyzikálních systémů a s nimi úzce související problematika digitálních dvojčat. Kyber-fyzikální systémy jsou založeny na těsném propojení prvků fyzického světa s prvky kyberprostoru za vzniku systémů, které jsou schopné v reálném čase monitorovat a řídit prvky z fyzického světa.

Předpokladem pro takové řízení je zajištění dostatečného množství kvalitních informací o provozu zařízení, pomocí kterých je možné včasné detekovat blížící se změny stavů, vedoucí k výrobě nekvalitních produktů, popřípadě k odstávce stroje. Z pohledu struktury se jedná o velké objemy heterogenních dat. V kontextu Průmyslu 4.0 jsou tyto data získávány skrze snímače a chytrá zařízení pomocí technologie internet věcí (IoT). Kvůli svým vlastnostem jako jsou velký objem, velká rychlost generování a nestrukturovanému formátu jsou tato data označovány jako big data. Taková data je dále nutné dále zpracovat a analyzovat.

Digitální dvojče představuje jeden z prvků v kyberprostoru, jež je možné charakterizovat jako digitální kopii reálného zařízení z fyzického světa. Takové digitální dvojče si po celou dobu životnosti své reálné předlohy může nést informace v podobě statických informací jako je 3D model nebo dokumentace, matematických analýz pro vyhodnocení stavu nebo matematických modelů jednotlivých procesů probíhajících uvnitř reálného zařízení, na základě kterých je možné odhadovat budoucí chování zařízení. Digitální dvojčata jsou tedy schopna zpracovávat a vyhodnocovat big data popsaná výše a na základě výsledků provádět příslušné akční zásahy, popřípadě informovat obsluhu zařízení o aktuálních stavech a potenciálně vznikajících problémech.

Spolu s výše uvedeným souvisí i způsob předávání informací obsluze zařízení. Pro zajištění srozumitelnosti je nutné získané informace vhodně interpretovat. Jako vhodné prostředky pro vizualizaci velkých objemů dat se jeví technologie virtuální a rozšířené reality. Zatímco virtuální realita najde uplatnění pro vzdálenou správu a monitorování pracoviště, rozšířená realita je vhodná například pro zobrazení aktuálních informací nebo postupu údržby v těsné blízkosti fyzického pracoviště.

Předložená dizertační práce si klade za cíl sestavení metodiky návrhu digitálního dvojčete a všech náležitostí k tomu potřebných. Metodický postup pro návrh digitálního dvojčete je vytvořen na základě provedené systémové analýzy v kap. 4. Tato metodika je poté aplikována při návrhu digitálního dvojčete výrobní buňky UVSSR Cell v kap. 5 pro řešení problému monitorování stavu buňky, predikci chyby přesnosti najetí do polohy a podpory uživatele při její obsluze formou prvků virtuální a rozšířené reality. Na základě návrhu je pak

v kap. 6 digitální dvojče implementováno. V závěru dizertační práce jsou shrnuty dosažené výsledky a přínosy vyvinuté metodiky včetně její aplikace u průmyslových partnerů řešených v rámci vědecko-výzkumných činností.

1. MOTIVACE

Motivací pro vytvoření metodiky návrhu digitálního dvojčete je zejména rozpolcenost a nejednoznačný pohled vědecké komunity na problematiku digitálního dvojčete. Ve vědeckých ale i průmyslových kruzích se vyskytují dva náhledy na problematiku digitálního dvojčete. Prvním rozporem je náhled na samotnou koncepci digitálního dvojčete, kdy část autorů uvažuje digitální dvojče jako digitální reprezentaci reálného zařízení a druhá část chápe pod pojmem digitální dvojče soustavu reálného zařízení, jeho digitální reprezentaci a vazby mezi nimi.

Nejednoznačný je také pohled na strukturu této digitální reprezentace kdy část autorů uvádí, že aby bylo možné řešení nazývat digitálním dvojčetem je nutné, aby byla vnitřní struktura tvořena matematickými modely popisující chování reálného zařízení. Druhá část autorů pak není k výkladu definice digitálního dvojčete tak striktní a za digitální dvojče považuje řešení obsahující jakékoliv produktové informace o reálném zařízení v průběhu celého životního cyklu reálného zařízení s tím, že může obsahovat také matematické modely popisující chování reálného zařízení.

I s ohledem na tyto nejednoznačnosti v chápání problematiky digitálního dvojčete neexistuje metodika, která by usnadnila jeho návrh. Implementace digitálního dvojčete je přitom značně komplexní úkol, který vyžaduje mezioborovou spolupráci napříč obory strojírenství, informatiky, elektrotechniky a matematiky. Systémový přístup při návrhu digitálního dvojčete je pak v konečném důsledku neocenitelný, protože na základě vhodné metodiky je možné značně zredukovat čas potřebný k návrhu a vyvarovat se chyb, které jsou následně odhaleny až ve fázi implementace. Přínosem systémového přístupu je tedy časová a finanční úspora.

2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Pojem „průmysl“ je souhrnné označení všech výrobních činností, při kterých jsou zpracovávány vstupní suroviny pomocí výrobních postupů a prostředků na konečné výrobky. Od začátku industrializace proběhlo několik výrazných technologických skoků, pro které se vžil název průmyslová revoluce. Tyto technologické skoky spočívaly v mechanizaci výroby (1. průmyslová revoluce), elektrifikaci a zavádění montážních linek (2. průmyslová revoluce) a automatizaci výroby (3. průmyslová revoluce) [1]. V roce 2013 byla organizací Plattform Industrie 4.0 na Hanoverském veletrhu představena strategická iniciativa Průmysl 4.0, která je považována za 4. průmyslovou revoluci.

Zatímco 3. průmyslovou revoluci odstartovalo zavádění informačních technologií a elektroniky do výroby, čímž došlo k její automatizaci, pak klíčovou technologií 4. průmyslové revoluce je internet. Hlavní myšlenkou Průmysl 4.0 je vytvoření inteligentních sítí za pomoci informačních a komunikačních technologií, které umožní propojení věcí, služeb a lidí. Tímto krokem vznikne ekosystém, ve kterém budou jednotlivé konstrukční díly komunikovat přímo s montážními roboty. Kde budou jednotlivá pracoviště obsluhována autonomními vozíky, zodpovědnými za distribuci zboží a materiálů v rámci výroby. Ve kterém se budou nacházet inteligentní stroje, které si budou sami koordinovat výrobní procesy a kde budou všechny věci sdílet informace o svém stavu pomocí cloudových služeb, na základě, kterých bude možné pomocí optimalizačních a výpočetních algoritmů zefektivnit proces výroby, zlepšit kvalitu výrobků, hlídat diagnostický stav jednotlivých zařízení a zajistit inteligentní monitoring stavu skladů [2]. Průmysl 4.0 je možné charakterizovat jako přechod od centralizovaného řízení k decentralizovanému řízení výroby. Hlavními výhodami tohoto řešení je zvýšení efektivnosti, snížení nákladů a úspora zdrojů. Průmysl 4.0 definuje celý životní proces produktu od jeho návrhu, přes vývoj a výrobu, až po jeho údržbu a recyklaci [3]. Vize Průmysl 4.0 je postavena na pěti klíčových komponentech, zajišťujících decentralizaci výroby. Těmito komponenty jsou internet věcí, kyber-fyzikální systémy, digitální dvojčata, big data a chytré továrny.

2.1 Internet věcí (IoT)

Slovní spojení internet věcí v originále „Internet of Things“ bylo poprvé použito v rámci přednášky zakladatele Auto-ID Labs Kevina Ashtona v roce 1999. Ten tuto frázi použil s odkazem na využití technologie RFID v oblasti managementu dodavatelského řetězce [4]. Internet věcí je technologie umožňující propojení věcí prostřednictvím komunikační sítě, za účelem výměny a sběru dat mezi zařízeními a jejich následné analýzy a sdílení bez účasti lidského zásahu. V kontextu internetu věcí je „věcí“ myšleno jakékoliv zařízení mající předem danou funkci, a které autonomně poskytuje data, jež jsou sdílena s ostatními věcmi nebo systémy [5]. Al-Fuqaha popsal 6 základních elementů popisující funkcionalitu internetu věcí [6]:

- Identifikace – hraje důležitou roli při určení identity jednotlivých zařízení v rámci sítě. Existuje mnoho identifikačních metod jako elektronické produkční kódy, uCode nebo adresace pomocí protokolů IPv4 a IPv6.
- Snímání – jedná se o shromažďování dat z jednotlivých zařízení a jejich distribuci do databází nebo cloudu. Data je možné snímat pomocí chytrých snímačů nebo nositelné elektroniky.

- Komunikace – pomocí komunikačních technologií jsou propojována různorodá zařízení se specifickými chytrými službami. Mezi komunikační protokoly využívané v rámci internetu věcí patří RFID, NFC, UWB, Bluetooth, Wifi, IEEE 802.15.4, Z-Wave a LTE.
- Výpočetní platforma – výpočetní schopnosti jsou dány především použitým hardwarovým a softwarovým vybavením. Pro provoz IoT systémů byly vyvinuty hardwarové platformy jako jsou SmartThings, Arduino, Phidgets, Intel Galileo, Raspberry Pi, Gadgeteer, BeagleBone nebo Cubieboard. Tyto platformy jsou obsluhovány Real-Time operačními systémy jako Contiki, TinyOS nebo RIoTOS. Další důležitou výpočetní složkou internetu věcí je tzv. Cloud computing. Jedná se o počítačovou technologii založenou na poskytování služeb či programů prostřednictvím internetových serverů. V rámci internetu věcí nachází cloud computing uplatnění v podobě zpracování a analýzy obrovského množství dat též nazývaných jako big data.
- Služby – služby poskytované v rámci internetu věcí je možné rozdělit do čtyř kategorií: Identifikační služby, služby pro agregaci informací, kooperační služby a ubikvitární služby. Nejzákladnějšími službami jsou identifikační služby, zajišťující rozeznávání jednotlivých zařízení. Agregací služeb slouží pro sběr naměřených dat, které jsou dále zpracovávány pomocí kooperačních služeb. Tyto služby obdržená data vyhodnotí a provedou potřebné akce. Úkolem ubikvitárních služeb je zprostředkovávat kooperační služby zařízením, která je potřebují nezávisle na tom, kde se zařízení nachází.
- Sémantika – jedná se o schopnost extrakce znalostí z různých zařízení a dále rozpoznání a analýza těchto získaných dat za účelem poskytování požadovaných služeb. Mezi sémantické technologie používané v rámci internetu věcí patří Efficient XML Interface (EXI), Resource Description Framework (RDF) a Web Ontology Language (OWL).

2.1.1 Architektura

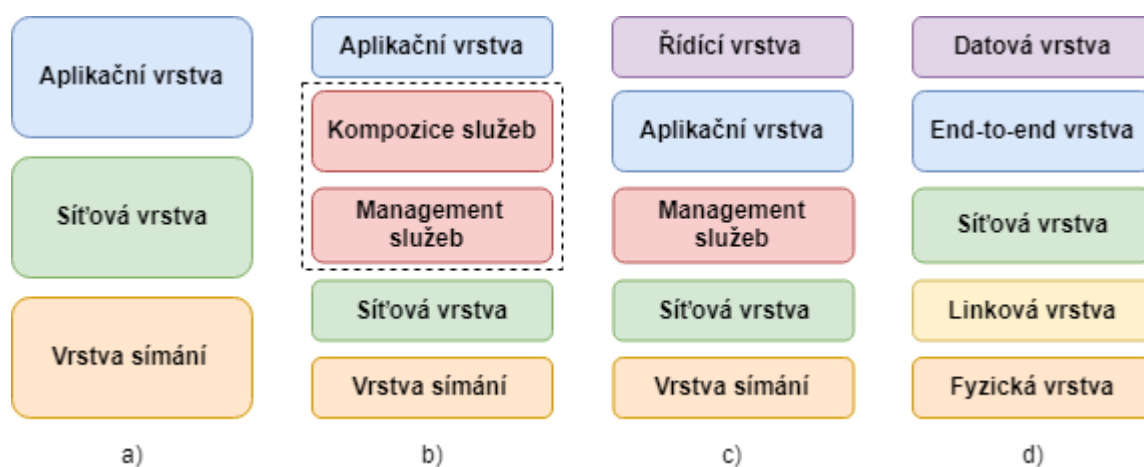
Ačkoliv se objevují pokusy o standardizaci IoT architektury [7], není zatím pevně specifikována architektura, která by byla jednotně využívána [8]. Yaqoob uvádí požadavky, které by měla každá architektura splňovat, jedná se o [9]:

- Řízení prostředků – každé chytré zařízení připojené k internetu věcí musí být vzdáleně přístupné a konfigurovatelné.
- Energetická efektivita – architektura musí být navržena tak aby se minimalizovala spotřeba energie a vyhnulo se zbytečné spotřebě energie.
- Kvalita služeb – zavedení prioritizace pro služby vyžadující vysoký výkon jako například zpracování dat v reálném čase a další opatření vedoucí ke zvýšení kvality služeb poskytovaných uživatelům.
- Interoperabilita – architektura musí umožňovat komunikaci mezi zařízeními od různých výrobců, komunikující různými protokoly.
- Interferenční management – s předpokladem že bude v budoucnu připojeno k internetu věcí velké množství zařízení, je nutné, aby navržená architektura byla odolná proti rušení.
- Bezpečnost – architektura musí být dostatečně bezpečná, aby se zabránilo neoprávněnému přístupu k zařízením.

Různé výzkumné skupiny přišly s návrhem vlastních architektur uzpůsobených podle svých požadavků. Mezi ty patří Servisně orientovaná architektura (SOA), IoT-A nebo

pětivrstvý model (Obr. 1). Většina těchto architektur víceméně vychází ze základního třívrstvého modelu, který obsahuje vrstvu snímání a síťovou a aplikační vrstvu.

- Vrstva snímání – jedná se o nejnižší vrstvu obsahují fyzická zařízení nebo komponenty jako jsou snímače, aktuátory a RFID tagy. Tato zařízení jsou připojena k IoT síti za účelem měření, sběru a zpracování dat, která jsou následně předávána vyšší vrstvě.
- Síťová vrstva – nejdůležitější vrstva, která je zodpovědná za distribuci dat mezi ostatní zařízení a aplikace. Distribuovaná data jsou získávána z vrstvy snímání, přičemž síťová vrstva musí být schopná přenášet tato data mezi jednotlivými zařízeními pomocí různých komunikačních protokolů (RIFD, NFC, UWB, Bluetooth, Wifi, IEEE 802.15.4, Z-Wave a LTE).
- Aplikační vrstva – poskytuje služby a operace nad daty přijatými ze síťové vrstvy. Zpravidla se jedná o poskytování úložiště, analytické služby pro vyhodnocování například budoucích stavů fyzických zařízení nebo vizualizaci a prezentaci dat.



Obr. 1 Přehled vrstev jednotlivých architektur internetu věcí, a) třívrstvý model, b) Servisně orientovaná architektura (SOA), c) pěťvrstvý model, d) IoT-A architektura

2.2 Kyber-fyzikální systémy (CPS)

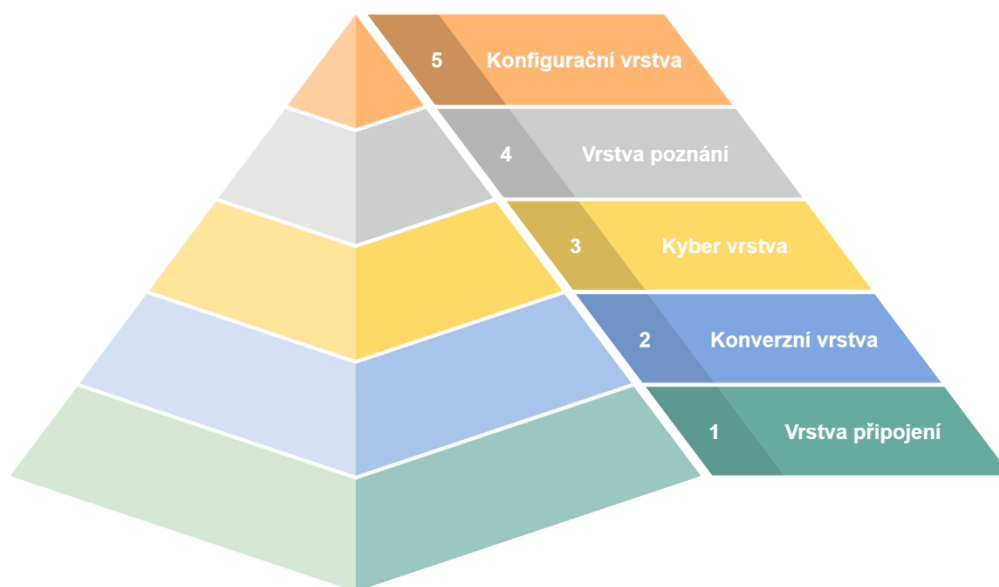
Jedná se o inteligentní systémy založené na propojení fyzického světa a softwarových komponent s cílem rozšířit možnosti fyzických zařízení o schopnosti provádění výpočtů a komunikace za účelem monitorování a řízení těchto zařízení [10]. Fyzický svět obsahuje zařízení, která je potřeba monitorovat či řídit, zatímco kyberprostor obsahuje relevantní data o těchto zařízeních, na základě kterých jsou prováděny analýzy a rozhodovací procesy [11]. Kyber-fyzikální systém stojí na dvou základních předpokladech. První z nich je konektivita, zajišťující real-time sběr dat z fyzického světa a informační zpětnou vazbu z kyberprostoru. Druhou součástí je pak inteligentní datový management, analýzy a výpočetní kapacity, tvořící kyberprostor. Propojením fyzického světa a kyberprostoru vzniká uzavřená řídicí smyčka.

Pro snadnější vývoj a implementaci kyber-fyzikálních systémů ve výrobních aplikacích navrhl Lee architekturu, popisující pět úrovní jasně definujících sekvenční postup při návrhu kyber-fyzikálního systému od sběru dat, přes analýzu až po zpětnou interpretaci výsledků zpět do fyzického světa [12].

2.2.1 Architektura

Lee navrhl pětivrstvou architekturu kyber-fyzikálních systémů 5C, sloužící jako metodika pro vývoj a nasazení kyber-fyzikálních systémů ve výrobních aplikacích. Architektura je znázorněna na Obr. 2. Označení 5C vychází z anglických názvů vrstev architektury, které jsou [12]:

- Vrstva připojení – akvizice dat z fyzických zařízení. Sběr dat je nutným předpokladem ke vzniku kyber-fyzikálních systémů. Data mohou mít různý charakter. Jedná se o data ze snímačů (napětí, proud, vibrace, teplota atd.), data pro strojové vidění (obrázky, videa), data z řídicích systémů nebo z firemních výrobních informačních systémů jako jsou Enterprise Resource Planning (ERP), Supply Chain Management (SCM) a Capability Maturity Model (CMM). Při implementaci vrstvy je nutné vzít v úvahu dva důležité faktory. Prvním je volba vhodného přenosového protokolu a druhým faktorem je výběr vhodných snímačů.
- Konverzní vrstva – převod dat na konkrétní informace jako jsou predikce opotřebení a produktivity nebo analýzy technického stavu jednotlivých komponentů stroje, které je možné dále analyzovat.
- Kyber vrstva – vrstva obsahující metody pro analýzu dat získaných z fyzických zařízení, simulační modely a metody na podporu rozhodování. Účelem je na základě těchto metod extrahovat užitečné analytické informace o zařízeních pro lepší pochopení jejich chování a tím optimalizovat či predikovat jejich provoz.
- Vrstva poznání – slouží k prezentaci analytických informací získaných pomocí nižších vrstev přímo uživateli. Díky tomu je umožněno zapojit uživatele do rozhodovacího procesu.
- Konfigurační vrstva – obstarává zpětnou vazbu mezi kyberprostorem a fyzickým světem za účelem samočinné konfigurace a adaptace, v reakci na změnu vnějších vlivů pro dosažení optimálního výrobního procesu.



Obr. 2 5C model kyber-fyzikálního systému

2.3 Digitální dvojče

Teorie fenoménu digitální dvojče byla poprvé představena v roce 2002 jako myšlenka o vytvoření digitální entity na základě reálného systému, která bude propojená s reálným systémem během celé životní cyklu. [13] V prezentaci nebyl přímo zmíněn název „digitální dvojče“, ale popis obsahoval všechny jeho charakteristiky jako reálný a virtuální prostor, vazbu mezi nimi a výměnu dat. Ve vědeckých publikacích se je možné setkat s různými definicemi pojmu digitální dvojče.

„Jedná se o digitální kopii fyzického zařízení obsahující detailní informace o geometrii, materiálech a výrobních anomáliích. Může být tvořeno vzájemně propojenými složkami jako jsou například model přenosu tepla, dynamický model, model analýzy napětí nebo model únavy za účelem predikce dlouhodobého chování“ [14].

„Digitální dvojče je integrovaná multifyzikální, vícerozměrná, stochastická simulace využívající matematickofyzikálních modelů za účelem predikování stavů a životnosti fyzického zařízení.“ [15].

„Autonomní systém tvořený virtuálním obrazem reálného zařízení, poskytující realistickou reprezentaci stavů a chování, který spolu s detailními simulačními modely dokáže predikovat budoucí chování zařízení a konat patřičné zásahy“ [16].

„Virtuální reprezentace reálného produktu jako součást kyberprostoru kyber-fyzikálního systému obsahující produktové informace od počátku do konce životního cyklu produktu. Tato reprezentace je propojena s reálným produktem za účelem přenosu dat z fyzického produktu do virtuální reprezentace. Digitální dvojče může obsahovat vlastní inteligenci například v podobě rozhodovacích mechanismů“ [17].

„Virtuální reprezentace reálného systému, která je nutným předpokladem k vytvoření kyber-fyzikálního systému, umožňující centralizované analýzy a řízení produkčních procesů na základě toku dat z fyzického systému“ [18].

„Digitální dvojče je tvořeno fyzickou entitou, virtuálním modelem a jejich vhodným propojením, přičemž data z fyzického světa jsou přenášeny do virtuálního modelu za účelem simulace a validace dat. Výsledky simulací jsou odesílány zpět do fyzického světa pro zefektivnění probíhajících procesů“ [19].

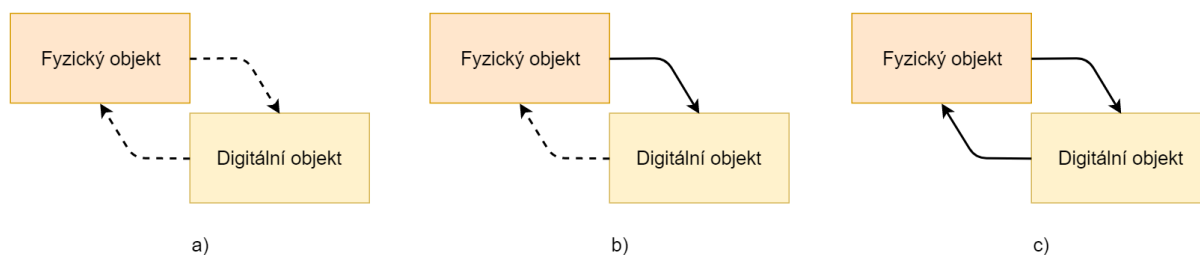
„Digitální dvojče je virtuální dynamická reprezentace fyzického systému, která je s tímto systémem propojená po celou jeho životního cyklu pomocí obousměrné datové komunikace.“ [20]

Z jednotlivých definic vyplývá, že chápání konceptu digitálního dvojčete autory napříč vědeckou obcí není jednotné. Část autorů digitální dvojče chápe pouze jako virtuální reprezentaci fyzického produktu a druhá část autorů označuje termínem digitální dvojče celek

sestavající se z fyzického produktu, jeho virtuální reprezentace a vazby, která tyto dva prvky propojuje. Stejně tak je chápána různě samotná struktura virtuální reprezentace fyzického produktu. Část autorů předpokládá jako nutnou součást virtuální reprezentace matematické modely věrně popisující chování fyzického produktu, zatímco druhá část chápe virtuální reprezentaci jako součást obsahující produktové informace v rámci životního cyklu fyzického produktu, která může mimo jiné obsahovat matematické modely a vlastní inteligenci. Tao ve své práci definuje 4 klíčové prvky digitálního dvojčete kterými jsou [21]:

- Model – Stejně jako má zařízení fyzickou reprezentaci ve reálném světě, má také digitální reprezentaci v kyberprostoru. Tato digitální reprezentace je tvořena sadou modelů, které velmi přesně popisují vlastnosti a chování reálného systému. Společně s využitím dat o systému by měly být tyto modely schopné následujícího chování:
 - reprodukovat chování reálného zařízení a tím vytvořit digitální duplikát, který popisuje všechny změny reálného zařízení.
 - Provádět zcela nezávisle simulace v rámci kyberprostoru, na základě kterých je možné zasahovat do chodu zařízení tak, aby byl jeho chod ideální.
 - Predikovat vznikající problémy související s provozem zařízení před jejich skutečným výskytem a stanovit strategie pro jejich eliminaci
 - Validovat funkčnosti výrobku nebo systému ještě před jeho dokončením.
- Data – jsou jedním ze základních předpokladů, který zajišťuje funkcionalitu digitálních dvojčat. V tomto ohledu se jedná jak o data pocházející z fyzického světa, tak o data z kyberprostoru. Těmi jsou například výsledky jednotlivých modelů a analýz, data z informačních systémů apod.
- Komunikace – k tomu, aby byla umožněna interakce mezi jednotlivými prvky digitálního dvojčete, je nutné zajistit jejich propojení. V návaznosti na místo, kde k propojení dochází, je možné hovořit o propojení v rámci fyzického světa, propojení v rámci kyberprostoru a propojení napříč fyzickým světem a kyberprostorem.
- Služba – vnitřní struktura digitálního dvojčete může být značně komplexní, přičemž pro uživatele bez potřebných znalostí vnitřních mechanismů bude jeho obsluha matoucí. Z tohoto důvodu je vhodné funkce digitálního dvojčete publikovat jako služby s definovanými vstupy a výstupy, se kterými bude možné pracovat v rámci uživatelského rozhraní. Uživatel pak může na tyto služby pohlížet jako na tzv. black-box bez nutnosti znalosti vnitřních mechanismů digitálního dvojčete.

Nejednoznačný je také pohled na vazbu mezi fyzickým produktem a jeho virtuální reprezentací. Někteří autoři definují digitální dvojče s obousměrnou vazbou, přičemž část autorů se zmiňuje pouze o jednosměrné vazbě z fyzického produktu do virtuální reprezentace. Na základě toho rozdělil Kritzinger digitální dvojče podle stupně integrace dat do tří kategorií, kterými jsou digitální model, digitální stín a digitální dvojče (Obr. 3) [22]. U nejnižšího stupně integrace tzv. digitálního modelu neexistuje žádný automatický datový tok mezi fyzickým produktem a virtuální reprezentací. To znamená že změna stavu fyzického produktu nemá přímý vliv na virtuální reprezentaci a stejně tak v opačném případě. Pokud změna stavu fyzického produktu vede ke změně stavu virtuální reprezentace, ale ne naopak, pak se jedná o tzv. digitální stín, který obsahuje právě jeden automatický datový tok. V případě že jsou datové toky mezi fyzickým produktem a jeho virtuální reprezentací plně integrovány v obou směrech jedná se o digitální dvojče.



Obr. 3 Znárodnění datového toku u jednotlivých kategorií digitálního dvojčete, a) digitální model, b) digitální stín, c) digitální dvojče

Z pohledu článků publikovaných v posledních letech lze rozdělit praktické využití digitálních dvojčat do tří kategorií:

1. Nástroj pro podporu rozhodování skrze inženýrské a statistické analýzy.
2. Digitální reprezentace fyzické entity za účelem studia dlouhodobého chování systému a predikce chování v závislosti na různých podmínkách prostředí a poskytování informací během různých fází životního cyklu.
3. Analýza stavu systémů pro zlepšení plánování údržby.

2.3.1 Nástroj pro podporu rozhodování

Tradiční proces návrhu produktu vyžaduje profesionální znalosti a zkušenosti návrhářů, kteří musí provést různé druhy testů pro ověření správnosti a použitelnosti návrhu. Oproti tomu se moderní způsob návrhu produktu zaměřuje na zapojení zákazníka do samotného procesu. Následkem toho se začíná čím dál tím více využívat vizualizace, virtualizace a síťové služby. Na základě těchto skutečností je moderní způsob návrhu produktu postaven na využití digitálních dvojčat [23]. Virtuální verifikace na základě digitálních dvojčat umožňuje rychlou a snadnou prognózu a ověření funkcí, chování, struktury a vyrobitelnosti. To umožňuje návrhářům přesněji nalézt slabá místa v návrhu, lépe optimalizovat navrhovaný model a snížit závislost na fyzickém testování. Tímto přístupem se šetří čas a peníze vložené do návrhu produktu [19], [24]. Proces návrhu je možné rozdělit do tří fází.

2.3.1.1 Koncepční návrh

Jedná se o první a nejdůležitější krok při procesu návrhu produktu, ve kterém je definována podoba budoucího produktu. Hlavním cílem konceptního návrhu je stanovení konceptu, estetických vlastností a hlavních funkcionalit vyvíjeného produktu. Za pomoci digitální dvojčete můžou být integrovány všechny potřebné informace, jako požadavky zákazníka, konkurenceschopnost produktu, investiční plány nebo prodeje produktu do jednoho virtuálního prostoru. To umožňuje návrhářům získat lepší orientaci v těchto datech, na základě čehož jsou pak schopni rychleji nalézt oblasti, ve kterých má být produkt vylepšen. Díky věrné kopii produktu ve formě digitálního dvojčete je následná komunikace se zákazníkem více transparentní a rychlejší. To umožňuje více využívat zpětnou vazbu od klienta ke zlepšení nového návrhu.

2.3.1.2 Podrobný návrh

Druhá fáze je zaměřena na dokončení kompletního designu a konstrukci prototypu produktu, společně s vývojem nástrojů potřebných pro jeho komerční výrobu. Dále je nutné upřesnit

funkce, vzhled, konfiguraci a parametry produktu. Tato fáze vyžaduje také opakované testování pomocí simulací sloužící k ověření, zda produkt dosahuje předpokládaných požadavků.

2.3.1.3 Virtuální verifikace

Poslední fáze procesu návrhu produktu se zabývá ověřením produktu ve virtuálním prostoru. U tradičního modelu nelze zhodnotit správnost a proveditelnost návrhu, aniž by bylo vyrobeno malé množství vzorků k otestování. To se projevuje nejen prodloužením produkčního cyklu, ale také výrazným zvýšením nákladů. Využitím digitálního dvojčete je možné zjistit kvalitu produktu ještě před jeho výrobou, přímo na základě modelu digitálního dvojčete. Ten může využívat data o produktu, prostředí, materiálech nebo také historických dat předchozích generací. Díky tomu je možné testovat, zda se u produktu vyskytuje defekt, popřípadě určit jeho příčinu. Využitím této metody se významně zlepšuje efektivita procesu návrhu, protože je možné se vyhnout dlouhému ověřování a testování [23].

Příkladem využití digitálního dvojčete v oblasti návrhu produktu je framework Digital Platform Twin. Hlavní myšlenka spočívá v odvození obecného digitálního dvojčete z vysoce přesných, už existujících digitálních dvojčat produktů stejné platformy, jako například osobní automobily nebo průmyslové roboty. Tento obecný model pak obsahuje jak historická data, hodnocení uživatelů nebo CAD modely už existujících produktů, tak data potřebná pro vývoj nového produktu, v podobě legislativy, pokročilých technologií, zákaznických požadavků nebo produkčních kapacit. Na základě tohoto obecného modelu je pak navrhován a verifikován nový produkt [25].

2.3.2 Studium dlouhodobého chování systému a jeho predikce

Výrobní proces se skládá ze tří hlavních aspektů, kterými jsou management zdrojů, výrobní plán a řízení procesu. Z pohledu studia a predikce dlouhodobého chování se digitální dvojče používá zejména v souvislosti s výrobními procesy. V tom případě hovoříme o tzv. digitálním dvojčeti výrobní haly neboli digitální továrně. Koncept digitální továrny je tvořen z fyzického prostředí, virtuálního prostředí, systému služeb a datové struktury. Fyzické prostředí je tvořeno sadou entit zodpovědných za přijímání výrobních úloh a jejich prováděním za účelem získání finálních produktů. Virtuální prostředí představuje model fyzického prostředí, nad kterým jsou prováděny simulace a prognózy výrobních plánů a procesů, a dále poskytuje optimalizační strategie systému služeb. Systém služeb je sada služeb, poskytující podporu a servis pro výrobu. Datová struktura je centrální úložiště, které sdružuje veškerá data související s fyzickým a virtuálním prostředím, systémem služeb a tím umožňuje vzájemnou interakci mezi těmito komponentami [26].

Problematika predikce produktivity a optimalizace výroby pomocí digitálního dvojčete je v současnosti řešena velkým počtem autorů. Jedním z případů je realizace virtuálního dvojčete linky na výrobu dutého skla, sloužícího k optimalizace provozu linky pomocí vícekritériálního programování. Hlavním cílem optimalizace je dosažení vyváženého zatížení linky, rychlé odezvy, vysoké účinnosti, nízké energetické náročnosti a dostatečné kapacity [24].

Vlastnosti a funkčnost kovových komponentů vyráběných laserovou aditivní výrobou jsou závislé na jejich geometrii, mikrostruktuře a defektech. Tyto jsou ovlivňovány přechodovými teplotními poli, rychlostí ochlazování a tuhnutím, jež jsou určeny procesními proměnnými, slitinou a parametry aditivní výroby. Pokud má mít výsledný produkt správnou strukturu a být spolehlivý, je nutné nastavit správně procesní proměnné. Knapp vyvinul výpočetně efektivní blok digitálního dvojčete, obsahující komplexní model určený pro predikci

geometrie, přechodových teplot a vlastnosti tuhnutí v trojdimenzionálním kartézském prostoru [27].

Vachálek se zaměřuje na vytvoření digitálního dvojčete výrobní linky, sloužící k optimalizaci výrobního procesu. Digitální dvojče je vytvořené pomocí simulačního nástroje Plant Simulation (Siemens). Pro optimalizaci výrobního procesu je využíván genetický algoritmus s cílem dosažení nízkých nákladů a snížení výrobního času. Výsledkem optimalizace pomocí digitálního dvojčete je redukce výrobního času o 5,2 % [28].

2.3.3 Analýza stavu systémů pro zlepšení plánování údržby

U produktů, jako jsou například výrobní stroje, které jsou charakteristické svou komplexní strukturou, je nezbytné monitorování jejich technického stavu. Včasná identifikace poruchových stavů vede ke snížení finančních nákladů v důsledku možnosti plánování vhodného času odstávky čímž dochází k eliminaci vzniku prostojů [29].

V případě monitorování stavu digitální dvojče zpracovává real-time data z jeho fyzické předlohy společně s daty o okolním prostředí, operačními parametry apod. Pomocí virtuálního modelu je pak možné simulovat operační podmínky zařízení v různých prostředích. Tím je možné získat závislost mezi stavem, životností a výkoností v závislosti na operačních podmínkách a okolním prostředí [19]. Na základě výše uvedeného monitorování společně s historickými data je možné pomocí digitálního dvojčete analyzovat a predikovat elektrickou spotřebu, poruchy zařízení, poskytovat vhodnou strategii údržby, inteligentní optimalizaci a sledovat uživatelské chování za účelem vylepšení produktivity [23]. K tomu, aby bylo možné provádět údržbu pomocí digitálního dvojčete, je nutné mít k dispozici věrný virtuální model produktu a vhodný vizualizační nástroj. Vzniklou závadu je pak možné vizuálně diagnostikovat a analyzovat pomocí virtuálního modelu ve virtuálním prostředí. Takto může být uživateli nebo údržbě zobrazena pozice vadné části a hlavní příčina vzniku poškození. Pro stanovení vhodné strategie údržby je možné provést virtuální údržbu.

2.3.4 Implementace digitálního dvojčete

V počáteční fázi návrhu, kdy ještě není nový produkt fyzicky vyroben, a tedy ani propojen s jeho digitální předlohou, hovoříme o prototypu digitálního dvojčete. Toto digitální dvojče popisuje prototypický fyzický artefakt, obsahující informace nezbytné pro popis a výrobu fyzické verze duplikovaného produktu nebo dvojčat virtuální verze. Může nést informace jako jsou 3D model, kusovník, procesní list, servisní list a likvidační list. Od střední fáze, tedy od okamžiku, kdy je produkt vyroben a je součástí kyber-fyzikálního systému, je digitální předloha nazývána jako instance digitálního dvojčete. Toto digitální dvojče popisuje specifický fyzický produkt, se kterým je spojeno po celou dobu jeho životnosti.

Každá implementace digitálního dvojčete je unikátní z pohledu systému, pro který je dvojče vytvářeno. Před samotnou implementací je nutné se zamyslet nad klíčovými body návrhu jako jsou [30]:

- Identifikace – každé digitální dvojče je tvořeno reálným systémem a jeho virtuální reprezentací které jsou navzájem propojeny. Informace o takovém systému mohou být dostupné v distribuované a decentralizované formě, proto je nutné použít jednoznačnou globální identifikaci pro propojení každého systému s jeho virtuální reprezentací.

- Datový management – vzhledem k velkému objemu dat shromažďovaných po celou dobu životnosti cyklu systému je nutné zvolit vhodný management a analýzu dat pro uchování pouze užitečných dat.
- Modely – během různých fází životního cyklu produktu jsou využívány různé digitální modely, jako například: systémové modely, funkční modely, 3D modely, multi-fyzikální modely nebo výrobní modely. Snahou by mělo být docílit interoperability mezi těmito modely.
- Informace – jsou získány z velkého množství vstupních dat (Big Data) jejich zpracováním pomocí analytických metod a algoritmů. Výsledné informace jsou uchovány v podobě technického stavu komponent, produktivity apod., přičemž následně slouží k predikci chování produktu.
- Uživatelské rozhraní – na základě digitálního dvojčete je generováno velké množství informací, které je potřeba vhodným a srozumitelným způsobem interpretovat uživateli. Jednou z možností, jak efektivně vizualizovat data, se jeví rozšířená a virtuální realita.
- Komunikace – informace produkované digitálními dvojčaty mohou být uloženy v různých databázích, přičemž je nutné najít takové komunikační rozhraní, které umožní výměnu informací mezi digitálním dvojčetem a uživatelským rozhraním kdykoliv a odkudkoliv.

2.4 Big Data

První koncepty databázových systémů pro uchování a analýzu dat začaly vznikat v 70. letech. V 80. letech se z důvodu nedostatečné skladovací a procesní kapacity začalo přecházet na distribuovanou výpočetní architekturu. Tato architektura je založená na využití více počítačů propojených do jedné sítě za účelem sdílení hardwarových a softwarových zdrojů, přičemž na venek se tváří jako jeden celek. S vývojem nových technologií jako byl například internet se objem generovaných dat začal rapidně zvyšovat, což si žádalo fundamentální změnu v architektuře a mechanismu zpracování velkých datových sad [31]. Koncept big data byl poprvé uveden ve studii „Extracting Values from Chaos“ organizace IDC. V ní Gantz definoval big data následujícím způsobem:

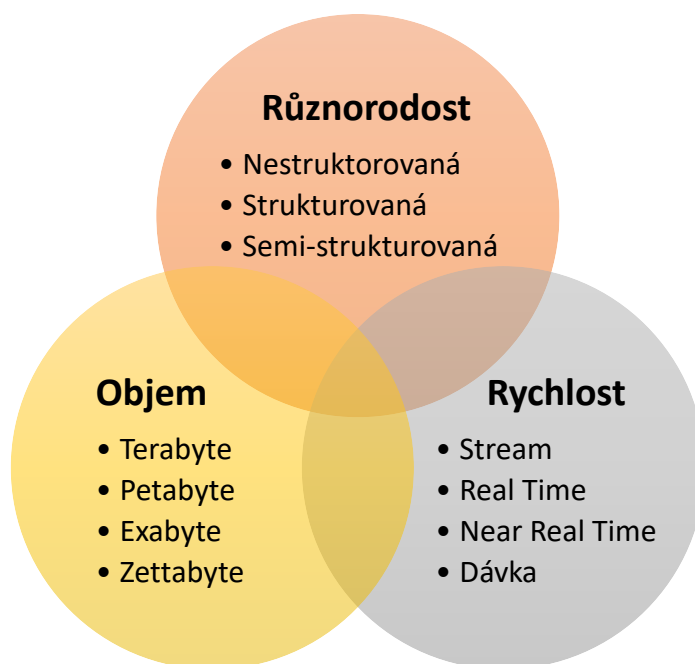
„Big data popisují novou generaci technologií a architektur, navržených pro ekonomickou extrakci hodnot z různorodých dat o velkých objemech, za pomoci rychlé akvizice, prohledávání a analýzy“ [32]

Pojmem big data se označují extrémně velké soubory různorodých dat s komplexní strukturou, kladoucí vysoké nároky na skladování, analýzu a vizualizaci [33]. Tato data jsou generována online transakcemi, emaily, multimediálními soubory, vyhledávacími dotazy, zdravotními záznamy, sociálními sítěmi, vědeckými daty, snímači a mobilními zařízeními [34]. S příchodem big dat byl výrazně ovlivněn výrobní průmysl. Během výrobního procesu je sbíráno velké množství dat, ať už z řídicích systémů, snímačů nebo podnikových informačních systémů. Ty lze rozdělit na online data (stavy strojů, informace o pracovních procesech, faktory okolí) a offline data (základní informace o produktu, funkce a struktura produktu, informace o údržbě, výrobní plán) [35]. Big data je možné popsat pomocí modelu 3V, znázorněného na Obr. 4. Ten obsahuje tři komponenty, kterými jsou:

- Variety (Různorodost) – data lze zobecnit do tří kategorií, a to na strukturovaná, nestrukturovaná a semi-strukturovaná. Mezi strukturovaná data patří tabulková data

například z relačních databází. Nestrukturovaná data mají podobu textu, obrázků, videí a audia. Typickým zástupcem semi-strukturovaných dat jsou například XML soubory, kdy se jedná o nestrukturovaný typ souboru, který má ale stanovenou vnitřní strukturu a je tudíž strojově dobře čitelný.

- Velocity (Rychlost) – odkazuje na rychlost s jakou jsou data generována, analyzována a zpracovávána.
- Volume (Objem) – udává velikost dat, která se pohybuje v řádech terabyte a petabyte [36].



Obr. 4 Komponenty modelu 3V

Objemy takovýchto dat mohou v závislosti na komplexnosti technické soustavy a na účelu digitálního dvojčete dosahovat vysokých hodnot. To klade nároky na datovou infrastrukturu jak z pohledu přenosu takto velkých dat, tak z hlediska jejich následného ukládání. V důsledku toho pak vznikají dodatečné provozní náklady v podobě neustálého navyšování kapacity datových uložišť. Cílem by tedy měla být co největší redukce objemů dat při zachování jejich informační hodnoty. Hlavními body spojenými s datovým management jsou:

- Stanovení relevantních dat poskytujících informace, které vedou k optimalizaci, diagnostice nebo predikci budoucích stavů technické soustavy.
- Volba vhodných metod k redukci dat tak, aby nedošlo ke ztrátě důležitých informací a vazeb mezi daty.
- Skladování dat.

Při řešení konkrétní problematiky je nejprve nutné vyspecifikovat relevantní data, u kterých existuje kauzální závislost s řešenou problematikou. Nutnou, ne však postačující podmínkou kauzality je korelace, protože platí zásada, že korelace neimplikuje kauzalitu. Mezi metody kauzální analýzy, pomocí které je možné ověřit kauzalitu, patří rozpoznávání entit, shluková analýza, asociační pravidla a klasifikační techniky jako rozhodovací stromy, neuronové sítě, metoda podpůrných vektorů apod. [37].

K redukci dat je možné přistupovat různými způsoby. Trovati ve své publikaci popisuje využití teorie sítí k extrakci topologických a dynamických vlastností big dat. Metoda je založena na vytvoření topologických sítí na základě vyhodnocení vazeb mezi daty. Redukce je pak realizována pomocí statistické analýzy nad jednotlivými uzly [38]. Maitra a kol. se zabývají redukcí dimenzionality big dat pomocí teorie grafů. V jejich práci je prvně využito Spearmanovy pořadové korelace, na jejímž základě je ze silně korelujících prvků sestaven síťový graf v podobě matice sousednosti. Na tomto grafu je pak implementována datová struktura disjoint-set a extrakcí kořenů jsou data ořezána [39].

Další využívanou technikou pro redukci dat je metoda komprese. Přestože je režie spojená s kompresí a dekompresí dat velká, je díky ní možné snížit nároky zejména na šířku pásma pro přenos dat a na jejich skladování. Komprese může být bezztrátová a ztrátová. Bezztrátové metody nachází uplatnění u dat, kde není žádoucí, aby bylo zmenšení velikosti vykoupeno ztrátou informace. Typickými příkladem, kde je žádoucí bezztrátová komprese, jsou číselná, textová, databázová či diskrétní data. Algoritmy používané pro bezztrátovou kompresi je možné rozdělit do tří kategorií, a to na entropické kódování (Aritmetické kódování, Adaptivní Huffmanovo kódování, Shannonovo kódování, Tunstallovo kódování, univerzální Fibonacciho kódování apod.), slovníkové metody (Lz77, Lz78, LZW, Deflate, LZ4, LZS, LZX apod.) a obecné metody komprese (BWT, CTW, Delta, PPM, DMCMTF, PAQ nebo RLE) [40]. Oproti tomu metody ztrátové komprese fungují na principu odstranění méně důležitých informací z původních dat. Tyto informace jsou nenávratně ztraceny, a tudíž je nelze zrekonstruovat z již komprimovaných dat. Ztrátové metody jsou pak vhodné ke kompresi obrázků, audio nebo video souborů. Nejpoužívanějšími metodami ztrátové komprese jsou diskrétní kosinová transformace (DCT), rychlá Walsh-Hadamardova transformace nebo diskrétní vlnková transformace (DWT) [41].

Častý problém vedoucí ke zvětšování objemu dat je jejich redundance. Z dlouhodobého hlediska dochází při sběru dat k ukládání již jednou uložených dat čímž vzniká duplicita. Rehman popisuje tři příčiny duplicity dat [42]:

- Přidávání nových zdrojů dat.
- Rozšiřování datových sad.
- Replikace dat.

Duplicita dat vede k vyšším nárokům na velikost uložení, která se dále zvyšuje při zálohování takových dat. Deduplikační proces je založen na porovnávání bytových oblastí mezi ukládanými a uloženými daty. Pokud se taková data v paměti nachází, je duplicitní oblast v nově ukládaných datech nahrazena odkazem, na již vyskytující se stejná data v paměti. Mezi techniky deduplikace patří Σ -Dedupe [43], SiLo [44], DEBAR [45], ChunkFarm [46], Boafft [47].

K redukci big dat je možné využít také metody strojového učení. Algoritmy jako skryté Markovovy modely mohou být použity pro kontextualizaci dat, na jejichž základě jsou poté ukládány pouze relevantní informace, například při signifikantní změně měřené veličiny [48]. Společně se zaváděním kyber-fyzikálních systémů a internetu věcí dochází k nárůstu měřených dat. Díky rušení, nekompletnosti či nekonzistentnosti se u takových dat vyskytuje nejistota, která má vliv na přesnost výsledků. Z tohoto důvodu je nutné využít pokročilých analytických technik, které jsou schopny nejistotu potlačit. S rostoucím objemem big dat dochází i ke zvětšování nejistoty, což vede k rostoucím nárokům na výpočetní výkon. Jedním z možných

přístupů je použití metod strojového učení jako jsou umělé neuronové sítě k zajištění optimální datové sady [49].

Vzhledem k heterogenitě a velikosti big dat a jejich formě, která je většinou nestrukturovaného či semi-strukturovaného charakteru, není vhodné pro jejich ukládání, sdílení, analyzování a vizualizace používat běžné nástroje jako jsou relační databázové systémy. Z těchto důvodů jsou pro permanentní ukládání a práci s daty používány distribuované souborové systémy, NoSQL databáze, nebo programovací modely. U těchto typů uložení se bere ohled na faktory jako jsou konzistence (Consistency), dostupnost (Availability) a toleranci oddílů (Partition Tolerance). Podle Brewera (2000) a jeho CAP teorie, je možné zároveň uspokojivě splnit maximálně dva požadavky [50]. Z výše popsaného vyplývá, že tak lze distribuovaná datová uložení rozdělit do tří kategorií:

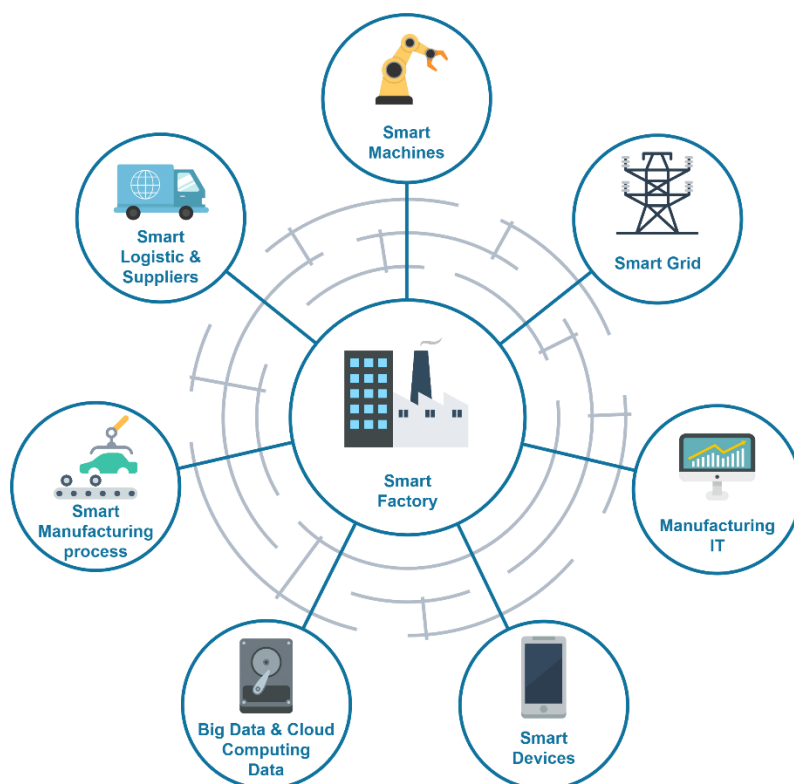
- CA systémy – nesplňují požadavky na toleranci oddílů, což znamená, že nedokážou zpracovávat síťové selhání. Obecně se jedná o systémy s jedním serverem využívající relační databáze. Nejsou moc rozšířené v oblasti big dat.
- CP systémy – Tyto systémy zajišťují konzistenci dat a taktéž jsou odolné vůči síťovým selháním. Díky vysokým nárokům na zajištění konzistence ale nezajišťují dobrou dostupnost. Tyto systémy jsou vhodné především v oblastech se střední zátěží a přísnými požadavky na přesnost dat. Například BigTable, Hbase.
- AP systémy – Systémy s odolností proti síťovým selháním s dobrou dostupností, nicméně nezajišťují konzistenci dat. Proto jsou vhodné v aplikacích s vysokou frekvencí dotazů, kde není kladen důraz na přesnost. Například Dynamo a Casandra.

2.5 Chytré továrny

Jedním z důležitých ukazatelů efektivity výroby je metrika OEE (celková efektivita zařízení) udávající, kolik procent z celkového výrobního času bylo skutečně produktivních. Výpočet OEE je definován jako součin dostupnosti, výkonnosti a kvality [51]. Hodnoty OEE se běžně pohybují mezi 60 a 85 %, přičemž dosažení hodnoty 100 % znamená, že linka pracuje bez prostojů, nejvyšší možnou rychlostí a zároveň produkuje pouze dobré výrobky [52]. Z toho plyne, že v současné době existuje minimálně 15 % potenciál pro zlepšení efektivity výroby. Jeden ze způsobů, jak toho dosáhnout, je vytvoření tzv. chytré továrny, tedy kyber-fyzikálního produkčního systému, sjednocujícího komunikační, výpočetní a řídicí procesy pro dosažení průmyslových požadavků [53]. Jedná se o flexibilní, samo-optimalizační autonomní systémy, které se dokáží samy učit [54]. Chytré továrny jsou klíčovým prvkem Průmysl 4.0, postaveným na komunikaci a spolupráci mezi stroji, lidmi a prostředky. K tomu využívají technologie jako jsou internet věcí a služeb, kyber-fyzikální systémy a big data. Chytré továrny se dokážou vypořádat s komplexními problémy, jsou méně náchylné k narušení a umí efektivněji vyrábět zboží [55]. Na základě analýzy výrobních dat umožňují flexibilní výrobu, dynamickou rekonfiguraci a produktovou optimalizaci v dynamických výrobních závodech s rychle se měnícími požadavky na výrobu z důvodu změn obchodních modelů nebo přání zákazníka [56]. Lasi popisuje chytrou továrnu jako výrobu vybavenou snímači a autonomními systémy [1], využívající chytrých technologií založených na holistických digitálních modelech, díky čemuž vznikne zcela autonomní výroba, ve které bude plánování probíhat pomocí systémů a počítačů [57]. Mezi hlavní požadavky kladené na chytré továrny patří flexibilita, spolehlivost a splnění

vysokého standardu kvality [53]. Koncept chytré továrny využívá několika klíčových komponent (Obr. 5):

- Chytré stroje – zahrnuje Machine to Machine komunikaci a dále komunikaci strojů s ostatními zařízeními a lidmi.
- Chytrá zařízení – chytrá zařízení připojená v rámci továrny.
- Chytrý výrobní proces – slouží k řízení dynamických výrobních prostředí za pomoci internetu věcí, skrze dynamickou, automatickou a real-time komunikaci.
- Manufacturing IT – obsahuje aplikace pro řízení podniků, sledování a řízení zařízení skrze data z chytrých snímačů a inteligentní řízení provozů.
- Chytrou logistiku – sada chytrých logistických nástrojů a procesů, které reagují na nepředvídatelné změny v produkci a sdílení informací v reálném čase s dodavateli, za účelem výběru nejvhodnějšího dodavatele pro potřeby výroby.
- Big Data a Cloud computing data – algoritmy pro zpracování dat, aplikace pro analýzu.
- Chytrá rozvodná síť – reprezentuje chytrou infrastrukturu v oblasti rozvodů elektrické energetické, za účelem regulace spotřeby a výroby elektrické energie v reálném čase.



Obr. 5 Klíčové komponenty chytré továrny

Výsledkem použití chytré továrny je vyšší efektivnost, rychlost, snížení prostojů, redukce nepotřebného personálu, snížení plýtvání zdroji a lepší schopnost předvídat a přizpůsobovat se změnám [54]. Jako vhodný nástroj pro reprezentaci stavů výrobních procesů může sloužit virtuální a rozšířená realita. Ta najde uplatnění jak při zobrazování měřených dat, tak jako asistenční systémy například pro montáž či demontáž sestavy [58].

3. ANALÝZA A SYNTÉZA POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

V rešeršní části této práce byl popsán současný stav v oblasti Průmyslu 4.0, zejména problematika digitálních dvojčat. Ta představuje v rámci výrobních strojů velký potenciál pro optimalizaci výrobních procesů za účelem zpřesňování a zvyšování kvality výroby, redukci provozních nákladů a řešení diagnostiky a údržby strojů. S problematikou digitálních dvojčat úzce souvisí také další technologie Průmyslu 4.0, kterými jsou kyber-fyzikální systémy, internet věcí a big data. Jedná se o technologie, které jsou v rámci implementace digitálního dvojčete často používány.

Z provedené rešerše plyne, že pohled na problematiku digitálních dvojčat je nejednoznačný. V rámci vědecké i průmyslové sféry je problematika digitálního dvojčete chápána různě. Nejednoznačnost panuje zejména v těchto oblastech:

- Co je to digitální dvojče?
- Jak je digitální dvojče reprezentované?
- Jaká existuje vazba mezi digitální reprezentací a reálným zařízením?

3.1 Formulace problému

Nejednoznačnost v pohledu na problematiku digitálních dvojčat výrazně komplikuje vytvoření univerzální metodiky pro návrh digitálního dvojčete. Na základě studie vědeckých prací nebyla doposud taková metodika, která by usnadnila návrh digitálního dvojčete popsána. Systémový přístup při návrhu takto komplexního úkolu je ovšem na místě, neboť na základě vhodné metodiky je možné značně zredukovat čas potřebný k návrhu a vyvarovat se chyb, které jsou následně odhaleny až ve fázi implementace. V současné době neexistuje univerzální metodika návrhu digitálního dvojčete, na základě které by bylo možné vydefinovat všechny prvky a vazby v systému tak, aby navrhované řešení splňovalo požadavky na digitální dvojče kladené. Taková metodika by ale značně zjednodušila proces návrhu a následnou implementaci digitálního dvojčete.

3.2 Cíle dizertační práce

Hlavním cílem dizertační práce je stanovení obsahu definice digitálního dvojčete a specifikace jeho návrhu pomocí vytvořené metodiky. Na základě takové metodiky bude možné definovat a popsat všechny prvky a vazby v systému digitálního dvojčete tak, aby bylo možné navržené dvojče implementovat. Díky této metodice bude možné:

- Definovat všechny potřebné prvky a vazby;
- Popsat definované prvky a vazby;
- Posoudit správnost navrženého digitálního dvojčete;
- Využít navržené řešení k implementaci digitálního dvojčete.

3.3 Zvolené metody zpracování

V této dizertační práci je postupováno tak, že je nejdříve pomocí systémového přístupu stanovena definice digitálního dvojčete, která je poté rozšířena o metodiku návrhu digitálního dvojčete.

Na základě aplikace této metodiky je následně navržena struktura digitálního dvojčete výrobní buňky UVSSR Cell pro tři vybrané případové studie, kterými jsou:

- Monitorování stavu technické soustavy.
- Predikce chyby přesnosti najetí do polohy způsobené změnou teplot.
- Podpora uživatele při obsluze technické soustavy.

. Výsledkem aplikace systémového přístupu je schéma digitálního dvojčete se všemi potřebnými prvky a vazbami, které je nutné implementovat. Ověření funkčnosti navržené metodiky bude na závěr provedeno pomocí implementace navrženého digitálního dvojčete výrobní buňky UVSSR Cell.

4. SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

Protože hlavním tématem této kapitoly je návrh digitálního dvojčete, je nejprve nutné tento pojem přesně definovat. Jak vyplývá z kapitoly 2.3, chápání pojmu digitální dvojče není jednotné napříč vědeckou obcí. V této dizertační práci je pojmem „digitální dvojče“ označována virtuální reprezentace fyzického produktu. Z uvedených definic pak vyplývá, že digitální dvojče je virtuální reprezentací reálného systému, a to takovou, aby pomocí ní bylo možné simulovat, predikovat či monitorovat stav reálného systému s cílem využití těchto výstupů za účelem zefektivnění procesů probíhajících v reálném systému, sledováním stavů systému, popřípadě identifikovat nežádoucí stavy systému. Za účelem výměny dat je mezi digitálním dvojčetem a reálným systémem vytvořena vazba, která může být buďto jednosměrná či obousměrná v závislosti na typu aplikace.

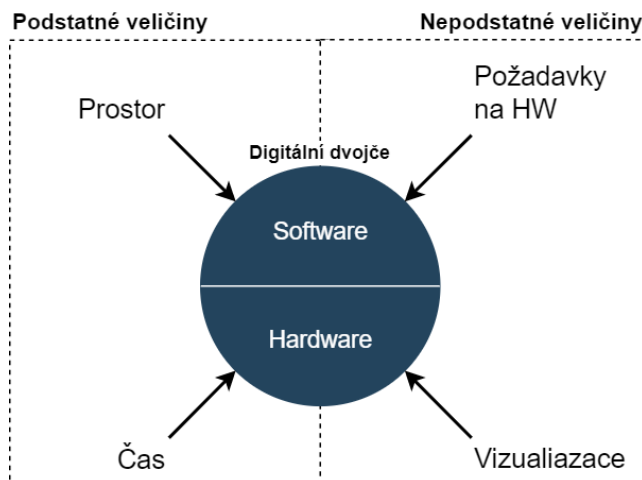
S problematikou digitálních dvojčat úzce souvisí pojem kyber-fyzikální systém. Jedná se o systém tvořený dvěma prostory, a to fyzickým světem a kyberprostorem. Fyzický svět obsahuje reálné systémy, které je potřeba řídit a monitorovat. Kyberprostor pak obsahuje softwarové komponenty pro ukládání dat, provádění analýz a pro rozhodovací mechanismy. Tyto dva prostory jsou vzájemně propojeny za vzniku uzavřené řídicí smyčky. Kyber-fyzikální systém nicméně nepopisuje dílčí implementace jednotlivých prvků v systému, ale pouze jejich architekturu. Na základě toho je možné prohlásit kyber-fyzikální systém za framework se stanovenou architekturou a koncept digitálního dvojčete je pak jeho cílenou aplikací. Zatímco digitální dvojče zaujímá své místo v kyberprostoru, fyzický produkt, se kterým je dvojče propojené, se nachází ve fyzickém světě. Vzájemným propojením obou prvků vzniká kyber-fyzikální systém. Ke stejnému závěru došel ve své publikaci Tao [59]. Jako digitální dvojče je tedy možné označit řešení které splňuje následující podmínky:

1. Slouží k agregaci dat z reálného systému za účelem jejich dalšího zpracování pomocí analýz, simulací, predikcí nebo pomocí vizualizace.
2. Pro zpracování agregovaných dat může digitální dvojče obsahovat matematické analýzy a matematické modely věrně popisující fyzikální podstatu vybraného procesu.
3. Mezi digitálním dvojčetem a reálným systémem existuje vazba sloužící k přenosu dat, která může být buďto jednosměrná nebo obousměrná. Účelem takové vazby je přenos procesních dat z reálného systému do digitálního dvojčete a zpětná vazba z digitálního dvojčete do reálného systému v podobě akčních zásahů za účelem zefektivnění procesů.
4. Digitální dvojče je s reálným systémem propojeno během svého životního cyklu.

4.1 Systém podstatných a nepodstatných veličin u digitálního dvojčete

Přestože je digitální dvojče uvažováno jako virtuální reprezentace (software) fyzického produktu, tak z pohledu jeho implementace je nutné tuto reprezentaci (všechny statické informace, matematické analýzy a modely) provozovat na nějakém hardwaru. Podstatnými veličinami při návrhu této soustavy hardware-software, jsou čas a prostor, jak je zobrazeno na Obr. 6. Z pohledu času je nutné určit provázání mezi životními cykly technické soustavy a digitálního dvojčete. Veličina prostor pak definuje všechny prvky a vazby vyskytující se v systému s digitálním dvojčetem.

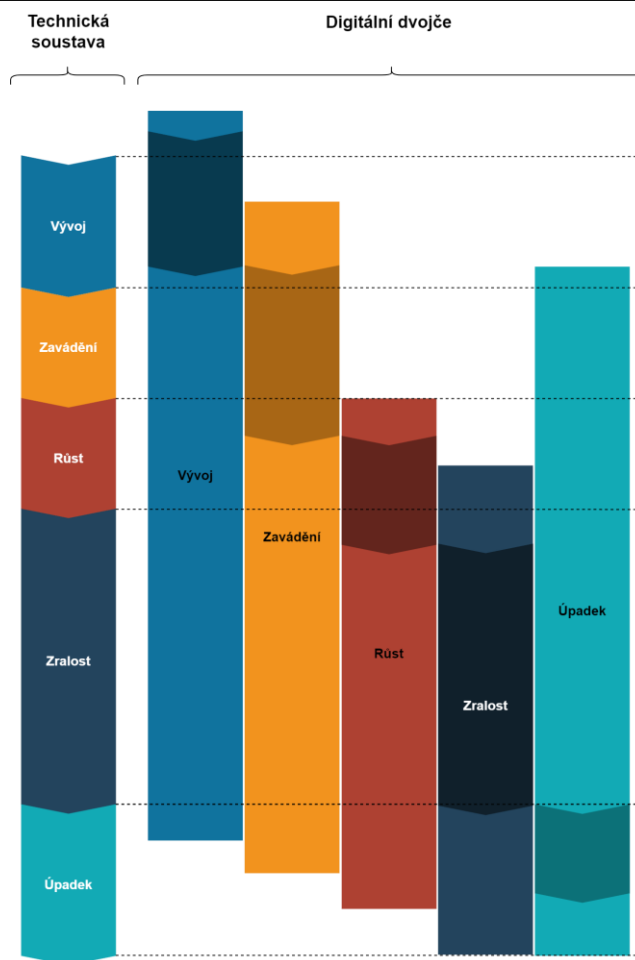
Nepodstatnými veličinami pro návrh digitálního dvojčete jsou pak například výpočetní požadavky na použitý hardware nebo způsob vizualizace digitálního dvojčete.



Obr. 6 Podstatné a nepodstatné veličiny u digitálního dvojčete

4.2 Digitální dvojče v čase

Vazby v kyber-fyzikálním systému jsou závislé na čase, některé v čase vznikají, některé zanikají, popřípadě dochází ke změně účelu. Aby bylo možné všechny tyto vazby definovat, je nutné k digitálnímu dvojčeti přistupovat jako k dynamickému prvku kyberprostoru. Stejně jako jakýkoliv produkt i digitální dvojče prochází během své životnosti určitými fázemi životního cyklu, kterými jsou vývoj, zavádění, růst, zralost a úpadek. Vzhledem k tomu, že digitální dvojče je součástí technické soustavy, jsou jejich životní cykly provázány a navzájem se ovlivňují. Jak je vidět na Obr. 7, jednotlivé fáze životního cyklu digitálního dvojčete nemusí přímo odpovídat fázím životního cyklu technické soustavy.



Obr. 7 Vztah mezi fázemi životního cyklu technické soustavy a digitálního dvojčete. Tmavě je zaznačen ukázkový životní cyklus digitálního dvojčete v rámci technické soustavy

Vývoj digitálního dvojčete je možné začít kdykoliv v průběhu celého životního cyklu technické soustavy. Pokud vývoj začíná souběžně s vývojem technické soustavy nebo jej předchází, pak hovoříme o tzv. produkčním designu na základě digitálního dvojčete. V takovém případě slouží digitální dvojče k validaci designu a funkčnosti navrhované technické soustavy ve virtuálním prostoru. Tento přístup vede ke snížení nákladů vynaložených ke konstrukci fyzických prototypů. K vývoji digitálního dvojčete ve fázi zavádění, růstu a zralosti technické soustavy dochází zejména z důvodu inovace technické soustavy, zefektivnění její funkčnosti, popřípadě jako snaha získat konkurenční výhodu s cílem ovládnutí většího prostoru na daném trhu. Pokud se technická soustava nachází ve fázi úpadku, je možné vývojem a nasazením digitálního dvojčete opětovně nastartovat růstovou fázi a tím prodloužit životní cyklus technické soustavy. V případě úspěšného vývoje přechází digitální dvojče do fáze zavádění.

Ve fázi zavádění dochází k propojení digitálního dvojčete s technickou soustavou za účelem jeho reálného nasazení. V této fázi se mohou objevit technické nedostatky, které nebylo možné zjistit během fáze vývoje. K zavádění digitálního dvojčete může dojít až během pozdní fáze vývoje technické soustavy, za předpokladu existence před-produkčního kusu, se kterým je možné digitální dvojče propojit. Stejně jako u vývoje i k fázi zavádění je možné přistoupit v jakékoliv fázi životního cyklu technické soustavy. Vzhledem k vysokému riziku neúspěchu, které tuto fázi provází, je možný přechod do fáze úpadku. V případě úspěchu nastává fáze růstu.

Fáze růstu je charakteristická nasazováním digitálního dvojčete na více technických soustav. Nutnou, ne však postačující podmínkou k dosažení tohoto stavu je přechod technické

soustavy do fáze růstu, kdy dochází k nárůstu objemu prodaných kusů, a tudíž potenciálního prostoru pro nasazení digitálního dvojčete. Vzhledem k tomu, že digitální dvojče může být distribuováno separátně, není zaručeno, že bude součástí každé technické soustavy. Z tohoto důvodu může být fáze růstu digitálního dvojčete značně opožděná vůči fázi růstu technické soustavy. Pokud je digitální dvojče vyvíjeno jako inovace na konci zralosti či na začátku úpadku technické soustavy, může fáze růstu signalizovat změnu trendu a návrat technické soustavy zpět do fáze zralosti. Fáze růstu může být následována fází zralosti nebo úpadkem v případě, že se jednalo pouze o krátkodobou konjunkturu.

Fáze zralosti je zpravidla nejdelší fází životního cyklu. Přechod do této fáze může nastat už ve fázi růstu technické soustavy, a to za předpokladu, kdy převládá zájem spíše o technickou soustavu a poptávka po digitálním dvojčeti byla do značné míry uspokojena. V této fázi je vhodné inovovat či modifikovat digitální dvojče tak, aby se eliminoval vstup do fáze úpadku.

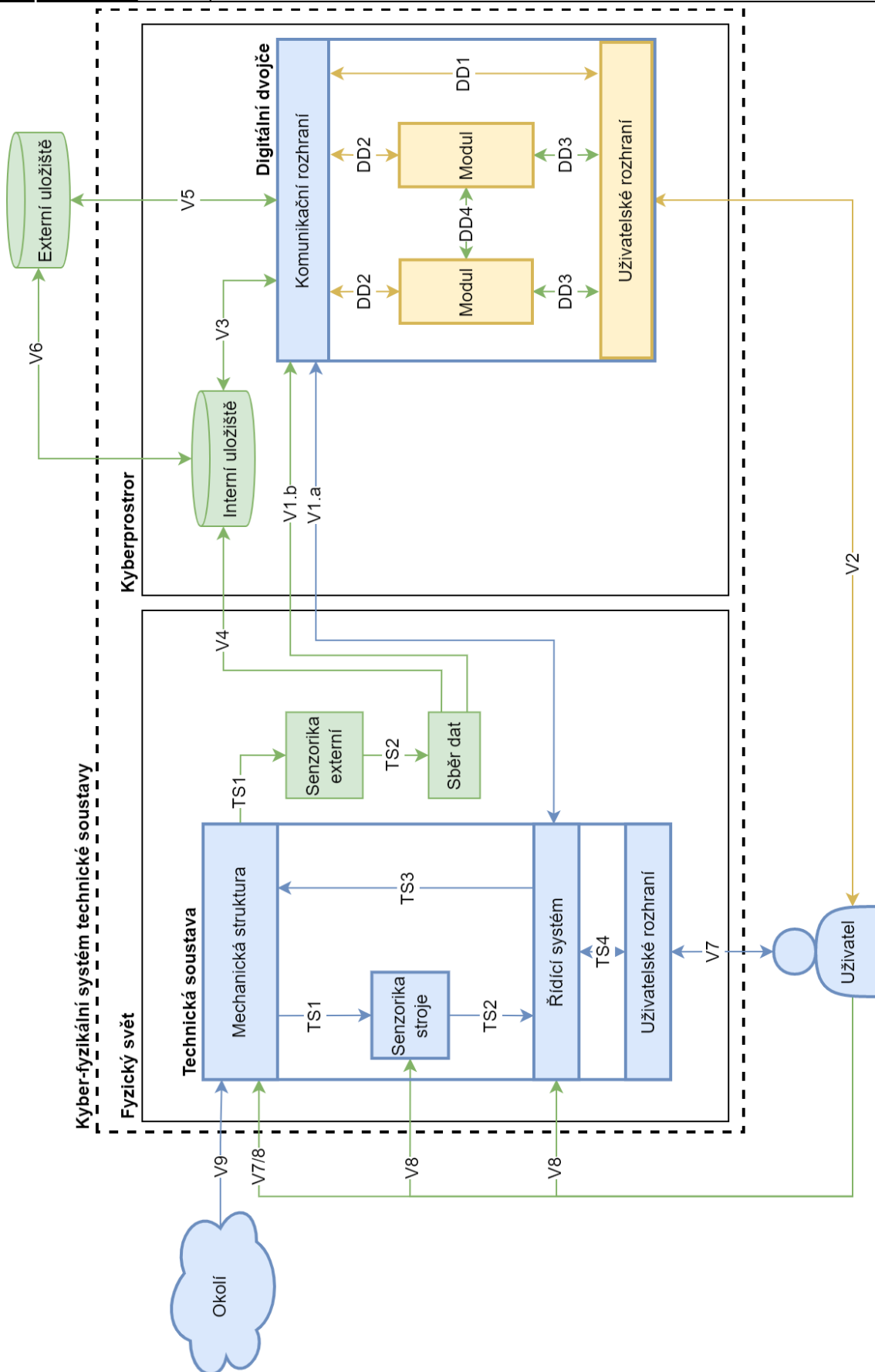
Fáze úpadku u digitálního dvojčete může nastat ze dvou příčin. První příčina je ze strany digitálního dvojčete, způsobená nedostatečnými inovacemi a tím snížení efektivity řešení, čímž se stává pro uživatele nezajímavé. Druhou příčinou je pak samotný přechod technické soustavy do fáze úpadku, kdy spolu s poklesem poptávky po technické soustavě klesá také poptávka po digitálním dvojčeti. K odvrácení tohoto stavu jsou zapotřebí inovace, které mohou zvýšit poptávku jak po digitálním dvojčeti, tak po technické soustavě.

Z pohledu návrhu digitálního dvojčete jsou důležité fáze vývoje a zavádění digitálního dvojčete, protože v těchto fázích dochází k jeho realizaci, propojení s technickou soustavou a opravení všech problémů. Zejména okamžik zahájení vývoje digitálního dvojčete ovlivňuje použitelné prostředky pro jeho realizaci. Ty jsou limitovány v případě, že je vývoji přistoupeno před samotným vývojem technické soustavy nebo v jeho průběhu. Vzhledem k neexistenci reálné technické soustavy v této fázi je vývoj digitálního dvojčete realizován pouze na základě matematicko-fyzikální analýzy systému za vzniku parametrického matematického modelu. V pozdějších fázích, kdy je technická soustava v provozu, je možné kromě výše uvedeného způsobu model extrahovat na základě zkoumání závislosti mezi vstupními a výstupními daty získanými z technické soustavy.

4.3 Digitální dvojče v prostoru

Stejně důležité jako vymezení digitálního dvojčete v čase je nutné také jeho vymezení v prostoru. Schéma kyber-fyzikálního systému technické soustavy je znázorněno na Obr. 8. V kyber-fyzikálním systému se nachází prvky a vazby, které jsou navzájem barevně rozlišeny do skupin podle jejich důležitosti v rámci systému:

- Modré podbarvení – všechny prvky a vazby, které jsou v systému vždy přítomné. Jedná se jak o prvky, jejichž přítomnost v systému vyžaduje definice digitálního dvojčete, tak prvky, které se systémem přichází do styku a jejich vliv není možné eliminovat.
- Zelené podbarvení – všechny prvky a vazby, které není nutné implementovat, aby mohlo řešení naplňovat definici digitálního dvojčete. V určitých případech jsou ale tyto prvky vyžadovány k zajištění požadované funkcionality digitálního dvojčete.
- Žluté podbarvení – jedná se o skupinu prvků, kdy alespoň jeden z nich musí být implementován, aby řešení naplňovalo definici digitálního dvojčete.



Obr. 8 Implementace digitálního dvojčete v rámci kyber-fyzikálního systému

4.3.1 Digitální dvojče

Subsystém nacházející se v kyberprostoru, tvořící digitální obraz technické soustavy z fyzického světa. Vnitřní struktura digitálního dvojčete je tvořena komunikačním rozhraním, moduly a uživatelským rozhraním. Komunikační rozhraní je povinným prvkem digitálního dvojčete. Tato skutečnost vyplývá z definice, která stanovuje, že každé digitální dvojče je propojeno s jeho fyzickou předlohou. Toto propojení zajišťuje právě komunikační rozhraní. Z definice digitálního dvojčete dále plyne, že data z technické soustavy jsou pomocí digitálního dvojčete agregována a následně jsou postoupena k dalšímu zpracování. Takové zpracování může být zajištěno vnitřními moduly nebo uživatelem skrze uživatelské rozhraní. Z toho vyplývá, že digitální dvojče musí vždy obsahovat alespoň jeden modul nebo uživatelské rozhraní, které bude zodpovědné za zpracování dat.

4.3.1.1 Komunikační rozhraní

Jedná se o prvek obsahující soubor metod, tříd a protokolů, zprostředkovávající výměnu dat mezi prvky kyber-prostoru a vnitřní strukturou digitálního dvojčete. Klíčovou vazbou je propojení digitálního dvojčete s technickou soustavou (V1). Technická soustava může obsahovat více prvků, které mohou sloužit jako zdroj dat pro digitální dvojče. Pro přehlednost a následnou jednodušší implementaci digitálního dvojčete je vhodné vazbu V1 rozdělit podle jednotlivých zdrojů dat. Rozdělení vazby je patrné z obrázku Obr. 8, kde je vazba V1 rozdělena na vazbu V1.a propojující komunikační rozhraní s řídicím systémem technické soustavy a vazbu V1.b, která umožňuje přenášet naměřené hodnoty pomocí externí senzorky. Dále může být komunikační rozhraní použito pro přenos dat mezi digitálním dvojčetem a interním (V3), popřípadě externím (V5) uložištěm dat.

4.3.1.2 Modul

Objekt s definovanými vstupními a výstupními parametry, jehož vnitřní logika zpracovává vstupní data předem specifikovaným způsobem, přičemž výsledky jsou dále distribuovány v rámci digitálního dvojčete pomocí výstupních parametrů. Vnitřní logiku je možné reprezentovat matematicko-fyzikálním modelem, analytickou metodou, expertním systémem nebo prvky umělé inteligence. Účelem modulu je především:

- Simulace zaměřené na vyhodnocení funkčnosti technické soustavy ve fázi návrhu.
- Real-time simulace právě probíhajícího procesu za účelem ověření požadované kvality za aktuálních podmínek.
- Optimalizace procesu při změně vstupních podmínek.
- Vyhodnocení stavu technické soustavy nebo konkrétních součástí z pohledu prediktivní údržby.
- Predikce vývoje změny stavů jako je například predikce teplot kritických součástí technické soustavy.
- Zastávat funkci rozhodovacího mechanismu, pomocí kterého jsou prováděny akční zásahy.

K tomu, aby bylo možné modul začlenit do struktury digitálního dvojčete, je nutné definovat jeho vazby na ostatní prvky v subsystému. Z pohledu obsahu dat se jedná vždy o vstupní parametry a výstupní hodnoty. Každý modul musí obsahovat alespoň jednu vstupní a jednu výstupní vazbu. V případě, že modul nemá vstupní vazbu, není vnitřní logika modulu ovlivněna proměnným vstupem, tudíž je výstup takového modulu vždy konstantní a jeho

použití postrádá smysl. Pokud naopak chybí výstupní vazba, výsledky modulu nejsou použity, tudíž je použití modulu rovněž zbytečné. Podle prvku, se kterým je modul propojen, je možné vazby rozdělit na:

- **Vazba DD2** – propojení modulu a komunikačního rozhraní. Umožňuje modulu přistupovat prostřednictvím komunikačního rozhraní k prvkům nacházejícím se mimo digitální dvojče. Vazba může být obousměrná.
- **Vazba DD3** – propojení modulu a uživatelského rozhraní. Slouží k interakci modulu a uživatele prostřednictvím uživatelského rozhraní. Tato interakce může být obousměrná.
- **Vazba DD4** – propojení modulů mezi sebou. Umožňuje vytvářet modulární strukturu digitálního dvojčete, při které je řešení komplexního problému rozděleno na podúlohy, jejichž řešení je implementováno pomocí samostatných modulů. Předávání vstupních a výstupních dat mezi moduly pak probíhá pomocí této vazby. Výhodou tohoto řešení je využitelnost modulů i v rámci řešení jiných problémů.

4.3.1.3 Uživatelské rozhraní

Jedná se o prvek zprostředkovávající interakci mezi uživatelem a digitálním dvojčetem. Uživatelské rozhraní umožňuje uživateli zadávat vstupní data potřebná k provádění simulací či správě digitálního dvojčete a zároveň informovat uživatele o výsledcích těchto simulací a stavu technické soustavy. Ve vnitřní struktuře digitálního dvojčete je uživatelské rozhraní propojeno s ostatními prvky pomocí vazeb DD1 a DD3. Na základě těchto vazeb je možné definovat tři typy vstupů, sloužící k:

- Parametrizaci digitálního dvojčete. Vstupy získané skrze uživatelské rozhraní jsou dále distribuovány pomocí vazby DD3 do modulů digitálního dvojčete. Jedná se o vstupní parametry modulů, které jsou vyžadovány k simulaci a optimalizaci procesu, nastavení rozhodovacího mechanismu nebo úpravě vnitřních parametrů modulů apod.
- Parametrizaci technické soustavy. Zadané parametry jsou pomocí vazby DD1 přeneseny do komunikačního rozhraní a odtud dále do technické soustavy. S ohledem na bezpečnost by neměla tato vazba sloužit k ovládání kritických úkonů, jako je polohování stroje apod.
- Ovládání uživatelského rozhraní. Takové vstupy nejsou dále distribuovány pomocí vnitřních vazeb v rámci digitálního dvojčete. Jedná se zejména o navigaci v uživatelském rozhraní, jejíž součástí může být také interakce s ostatními uživateli prostřednictvím virtuálního avatara nebo interakce s virtuálním prostředím při provádění školení.

Výstupem uživatelského rozhraní je vizualizace dat. Taková data je možné na základě jejich zdroje rozdělit na:

- Výstupní data modulů. Jedná se o výsledky simulací, analýz, predikcí a doporučení poskytované moduly digitálního dvojčete prostřednictvím vazby DD3.
- Data vně digitálního dvojčete. Tyto data jsou vyčítána za pomoci vazby DD1 přímo z komunikačního rozhraní. Zdrojem těchto dat můžou být všechny prvky napojené na komunikační rozhraní. Jedná se tedy o aktuální data z technické soustavy (měřené veličiny, strojní parametry nebo stavy soustavy), historická data z úložiště obsahující

jak historii technické soustavy, tak digitálního dvojčete, externí data v podobě napojených podnikových systémů apod.

- Informace z uživatelského rozhraní. V tomto případě se jedná o vizualizaci avatarů představující další uživatele v kyberprostoru nebo vizualizace procesních postupů jako podpora při jejich vykonávání.

Uživatelské rozhraní je možné rozdělit na softwarovou a hardwarovou část. Softwarová část je reprezentována aplikací, jejíž cílem je zprostředkovávat data mezi digitálním dvojčetem a uživatelem. Hardwarová část pak představuje veškeré vstupně-výstupní zařízení potřebné ke zprostředkovávání informací uživateli a interakci s uživatelským rozhraním. Na základě způsobu vizualizace a ovládání aplikace je možné definovat tři technologie, pomocí kterých je možné uživatelské rozhraní implementovat.

A. Zobrazovací panel

Konvenční způsob vizualizace informací a ovládání, který se v průmyslové praxi využívá zejména v souvislosti se SCADA systémy. Informace jsou vizualizovány za pomoci HMI (Human Machine Interface) panelů, popřípadě jiných 2D zobrazovacích panelů, kde je uživatel odkázán na ovládání pomocí dotykové obrazovky či vstupních zařízení jako jsou počítačová klávesnice a myš. Takové zobrazení neposkytuje žádnou míru imerze. Vizualizace je omezena pouze 2D projekcí a velikostí zobrazovacího panelu. Z pohledu použití je možné technologii využít přímo u zařízení k monitorování současného stavu ale i ke vzdálenému monitorování. Vzhledem k omezením projekce a ovládání nachází tato technologie uplatnění v oblasti monitorování stavů a ovládání zařízení změnou parametrů technické soustavy.

B. Virtuální realita

Poskytuje plně virtuální prostředí tvořené prostorovou scénou obsahující 3D modely a infografiku zprostředkovávající informace, kde je uživatel zcela izolován od reálného světa a vnímá pouze svět virtuální. Virtuální prostředí působí na uživatelské smysly pomocí vizuální, zvukové a haptické zpětné vazby. Uživateli je umožněna interakce s virtuálním prostředím za účelem jeho zkoumání, manipulace či ovládání pomocí ovladačů nebo gest. Využití virtuální reality není vázáno na konkrétní místo, tzn., že je možné projekci realizovat odkudkoliv se stejným výsledným vjemem, jako by se uživatel nacházel přímo u stroje. Zásadní vliv na kvalitu zobrazení mají zejména dva aspekty, a to rozlišení headsetu a jeho zorné pole. Hlavní výhodou virtuální reality je 3D projekce a schopnost vizualizace reálného systému v libovolném měřítku. Vizualizace digitálního dvojčete pomocí virtuální reality je vhodná zejména pro ověření designu technické soustavy ve fázi návrhu, jako nástroj pro školení obsluhy, monitorování stavu a kooperaci více uživatelů při řešení problémů.

Pokud je digitální dvojče vyvíjeno před samotným návrhem technické soustavy, je možné vizualizaci pomocí virtuální reality využít k ověření ergonomie návrhu z pohledu přístupnosti ovládacích prvků nebo dostupnosti určitých částí, jež by bylo bez fyzického prototypu těžko realizovatelné. Dále je možné virtuální realitu využít k ověření sestavitelnosti navrženého řešení a kontrole kolizí jednotlivých součástí [60], [61].

Detailní virtuální prostředí virtuální reality je vhodné k zaškolování obsluhy v činnostech spojených s obsluhou či údržbou technické soustavy. V takovém případě nehrozí poškození reálné technické soustavy vlivem špatně provedeného úkonu zaškolované osoby. Díky interakci s virtuální předlohou technické soustavy dochází kromě získání potřebných

teoretických znalostí také k řetězení motorických úkonů tedy tzn. senzomotorickému učení [62], [63].

Pomocí virtuální reality je možné informaci dat v podobě hodnoty a času rozšířit o prostorovou informaci. Příkladem může být vizualizace teplot, kdy lze kromě konkrétní hodnoty naměřené v určitém čase zobrazit také pozici, kde byla daná teplota naměřena. Další informace pak lze zobrazovat v jejich přirozené podobě jako například polohy jednotlivých součástí, které je možné kromě vyčíslené hodnoty vizualizovat také pomocí změny polohy virtuální součásti v prostoru. To vede ke snazší a rychlejší orientaci ve vizualizovaných datech a zároveň je tak umožněno zobrazit více informací při zachování jejich přehlednosti. Díky tomu je možné rychleji diagnostikovat už vzniklý nebo včasné rozpoznat teprve vznikající problém [64], [65], [66], [67].

Virtuální prostředí je také vhodnou platformou pro kooperaci více uživatelů. Díky virtuální realitě je možné přenést více uživatelů do stejného virtuálního prostoru. Podstatným rozdílem od konvenčně používaných řešení používaných pro vzdálenou komunikaci založených na audiovizuální komunikaci je přítomnost uživatelů v jednom virtuálním prostoru s možností interakce jak mezi uživateli, tak interakce uživatel-technická soustava, respektive její digitální dvojče. Díky tomu je možné ostatní uživatele lépe navádět při řešení problému, nebo zaškolování.

Ve všech jmenovaných případech se jedná o úlohy, které při požadavku na co nejpresnější reprezentaci daného problému vyžadují 3D vizualizaci a také fyzickou interakci s virtuálním prostředím. Z tohoto důvodu není možné tyto úlohy pomocí jiných vizualizačních technologií zrealizovat v požadovaném rozsahu a kvalitě.

C. Rozšířená realita

Technologie rozšířené reality zprostředkovává uživateli reálný svět doplněný o virtuální objekty ať už v podobě statických informací umístěných v uživatelově zorném poli, tak virtuálních objektů umístěných v prostoru reálné technické soustavy. Na rozdíl od virtuální reality není cílem úplné ponoření uživatele do virtuálního světa, ale naopak poskytnout uživateli plné uvědomění světa reálného s cílem rozšíření o dodatečné informace. Díky tomu je umožněna jak interakce s reálným světem, tak současně s tím i interakce se světem virtuálním, probíhající přirozeně pomocí gest. V závislosti na použité technologii může být celkový vjem prostorový v případě použití AR brýlí, nebo 2D, pokud je pro zobrazení rozšířené reality použito mobilní zařízení jako tablet či chytrý telefon. Od použité technologie se odvíjí také zorné pole vizualizace. Vzhledem k tomu, že jsou dodatečné virtuální informace umísťovány do reálného prostředí kolem technické soustavy, je předpokladem přítomnost uživatele v tomto prostředí. Tomu odpovídá také typické využití rozšířené reality, které mohou být monitorování stavů technické soustavy, nebo zobrazení výsledků simulací a procesních postupů například v rámci obsluhy či údržby.

Zatímco virtuální realita nachází uplatnění pro vzdálené monitorování stavu, rozšířená realita je zacílená na poskytování informací o stavu přímo obsluze zařízení. Toto řešení obsahuje dvě zásadní výhody oproti zobrazovacím panelům. Stejně jako u virtuální reality, i zde lze rozšířit vizualizovaná data o zobrazení v prostoru. Druhou výhodou je pak neustálý přehled o stavech odkudkoliv v okolí technické soustavy, aniž by byl uživatel limitován umístěním zobrazovacích panelů. Lze tak rychleji reagovat na případné nežádoucí změny stavů.

Kromě stavů a aktuálních hodnot lze vizualizovat také výsledky simulací a výpočtů, které mohou pomoci obsluze zařízení v rozhodování například o způsobilosti stroje pro dosažení požadované přesnosti obrábění. Využitím prostorových vizualizací například pomocí vektorových polí v prostoru vede opět k lepší názornosti zobrazovaných dat.

S rostoucí vypslostí zařízení rostou také náklady na kvalifikovanou a proškolenou obsluhu. Stejně tak z pohledu údržby je nutné prvně zaškolení na daný typ zařízení pro získání potřebných pracovních postupů. Rozšířená realita umožňuje celý postup procesních úkonů vizualizovat za účelem podpory uživatele při činnostech spojených s obsluhou či údržbou zařízení.

Hlavní výhoda rozšířené reality tedy spočívá zejména v přehlednější a rychlejší orientaci mezi vizualizovanými daty a dále v intuitivnější podpoře uživatele k provádění specifických úkonů. Porovnání parametrů mezi výše popsányi technologiemi je uvedeno v Tab. 1.

Tab. 1 Porovnání parametrů vizualizačních technologií

	Zobrazovací panel	Virtuální realita	Rozšířená realita
Prostředí	Virtuální	Plně virtuální	Reálné prostředí rozšířené o virtuální objekty.
Imerze	Žádná	Plně ponoření uživatele do virtuálního světa s vizuální, zvukovou, popřípadě haptickou zpětnou vazbou	Uživatel plně vnímá reálné prostředí rozšířené o virtuální objekty, které mohou poskytovat vizuální či zvukovou zpětnou vazbu
Interakce	Pouze v rámci vizualizace pomocí dotekové obrazovky nebo pomocí vstupních zařízení jako je počítačová klávesnice a myš	Pouze s virtuálními objekty, za pomoci gest či ovladačů	Možná interakce jak s reálnými, tak s virtuálními objekty pomocí přirozených pohybů
Omezení použití	Žádné, je možné používat kdekoli	Žádné, je možné používat kdekoli	V prostoru reálného zařízení
Zorné pole	Zobrazovací plocha je dána velikostí panelu	Do 180°x104°	Do 43°x30°
Prostorový vjem	Ne	Ano	Ano v případě AR brýlí
Použití	Monitorování stavu, řízení	Ověření designu, trénink, monitorování stavu, vzdálená kooperace více lidí při řešení problému	Monitorování stavu, nástroj k podpoře uživatele během provádění úkonu, zaškolení na reálném zařízení

4.3.2 Technická soustava

Jedná se o prvek, který se v rámci kyber-fyzikálního systému nachází ve fyzickém světě. V rámci této práce je na něj nahlíženo jako na obecný CNC řízený stroj. V subsystému technické soustavy může být popsán mechanickou strukturou, senzorikou stroje tvořenou snímači převádějící fyzikální veličinu na elektrický signál (enkodéry, snímači teplot apod.), řídicím systémem vyhodnocujícím elektrické signály ze snímačů, na jejichž základě jsou generovány akční zásahy ovlivňující mechanickou strukturu pomocí aktuátorů a uživatelským rozhraním, které umožňuje uživateli stroj ovládat a sledovat jeho aktuální stav. Subsystém technické soustavy tvoří fyzickou předlohu pro digitální dvojče a je tedy nezbytnou součástí konceptu digitálního dvojčete. V případě vzniku požadavku na data, která není možné získat z řídicího systému na základě interní senzoriky stroje, může být technická soustava rozšířena o externí senzoriku a systémem sběru dat pro agregaci informací ze všech snímačů. Technická soustava obsahuje několik vnitřních vazeb.

- **Vazba TS1** – měřitelná neelektrická vstupní veličina.
- **Vazba TS2** – elektrický signál reprezentující hodnotu měřené neelektrické veličiny.
- **Vazba TS3** – akční zásah řídicího systému na základě zpětné vazby ze stroje a zásahu uživatele.
- **Vazba TS4** – datový tok mezi řídicím systémem a uživatelským rozhraním. Směrem z řídicího systému jsou odesílány informace o parametrech stroje a jeho stavu. V opačném směru jsou přenášeny akční zásahy od uživatele.

4.3.3 Uživatel

Uživatel není součástí kyber-fyzikálního systému technické soustavy, ale velkou měrou se podílí na jeho ovlivňování. Na uživatele je možné pohlížet jako na operátora technické soustavy, údržbu/servisního technika nebo uživatele digitálního dvojčete.

Z pozice operátora má zásadní vliv na chod technické soustavy a její stav. Interakce operátora s technickou soustavou spočívá v přípravě pracovního procesu seřízením funkce stroje pro dosažení požadovaných tolerancí, upnutím obrobku a jeho vyrovnáním a dále nastavením programu a parametrů. Operátor má tedy přístup (V7) jak k uživatelskému rozhraní technické soustavy, tak k její mechanické struktuře.

Úkolem údržby potažmo servisního technika je předcházet vzniku závad na technické soustavě, popřípadě odstraňovat již vzniklé závady. K tomu, aby bylo možné předcházet vzniku závad je nutné pravidelně monitorovat stav technické soustavy a provádět jeho údržbu. Za tímto účelem má technik přístup k celé technické soustavě (V8).

Uživatel digitálního dvojčete má přístup k jeho uživatelskému rozhraní (V2), pomocí něhož je mu umožněna interakce s digitálním dvojčetem s cílem podpory rozhodování uživatele z pohledu operátora či servisního technika stroje.

4.3.4 Okolí

Prvek reprezentující všechny okolní vlivy působící (V9) na technickou soustavu, konkrétně na její mechanickou strukturu. Tyto vlivy mají negativní dopad jak na kvalitu a přesnost obrábění, tak na technický stav soustavy. Okolí může na technickou soustavu působit prostřednictvím následujících vlivů [68]:

- Teplo
- Vibrace
- Nečistoty

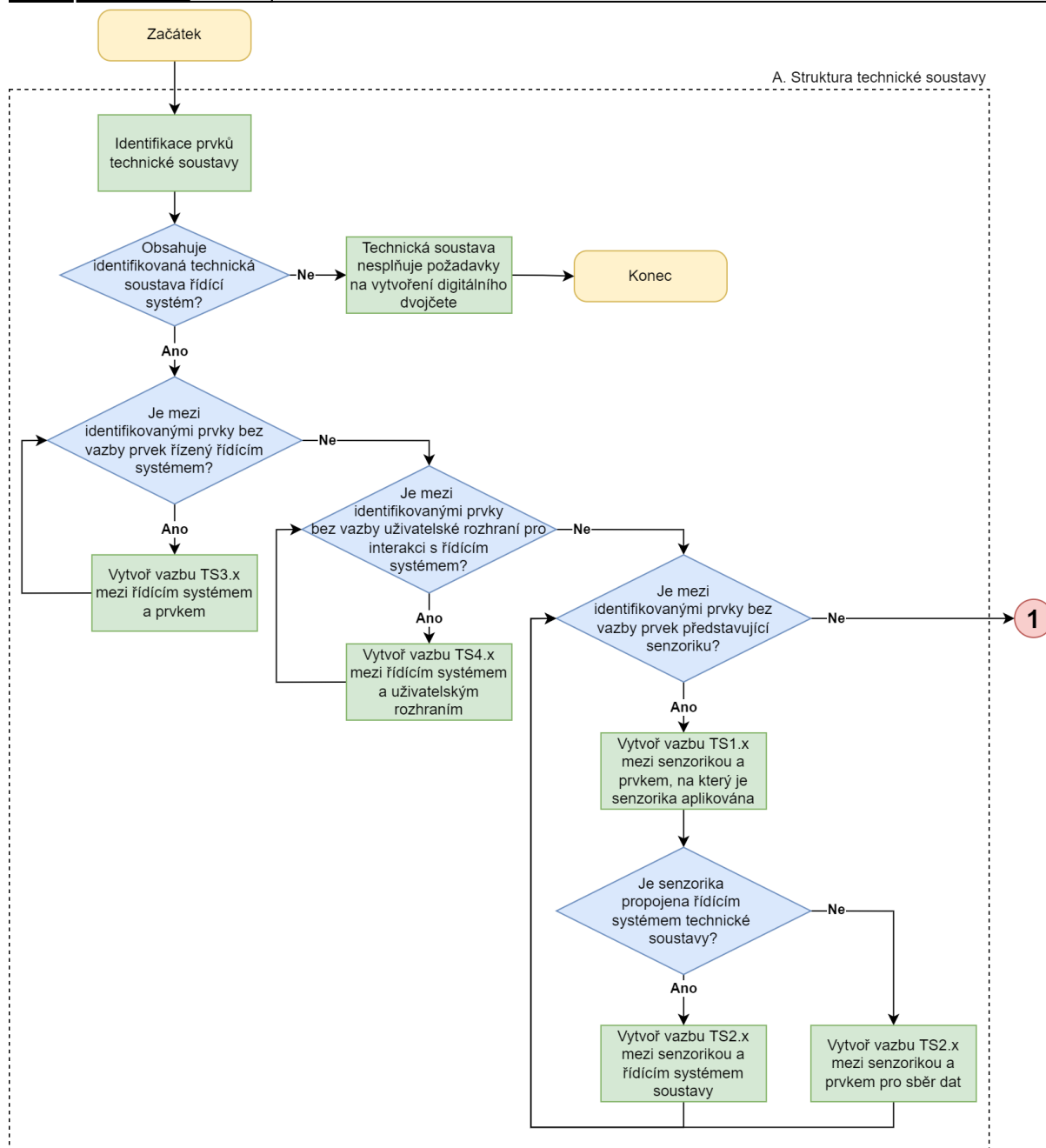
Vliv okolí na technickou soustavu je v rámci jejího životního cyklu proměnlivý, kdy některé z vlivů mohou být potlačeny, a naopak může dojít ke vzniku nových působišť stávajících vlivů. Technická soustava je vždy ovlivněna okolními vlivy, z principu tedy není možné tento prvek eliminovat. Jednotlivé vlivy je nicméně možné regulovat a částečně potlačit tak, aby neměly negativní dopad na technickou soustavu.

4.3.5 Uložiště

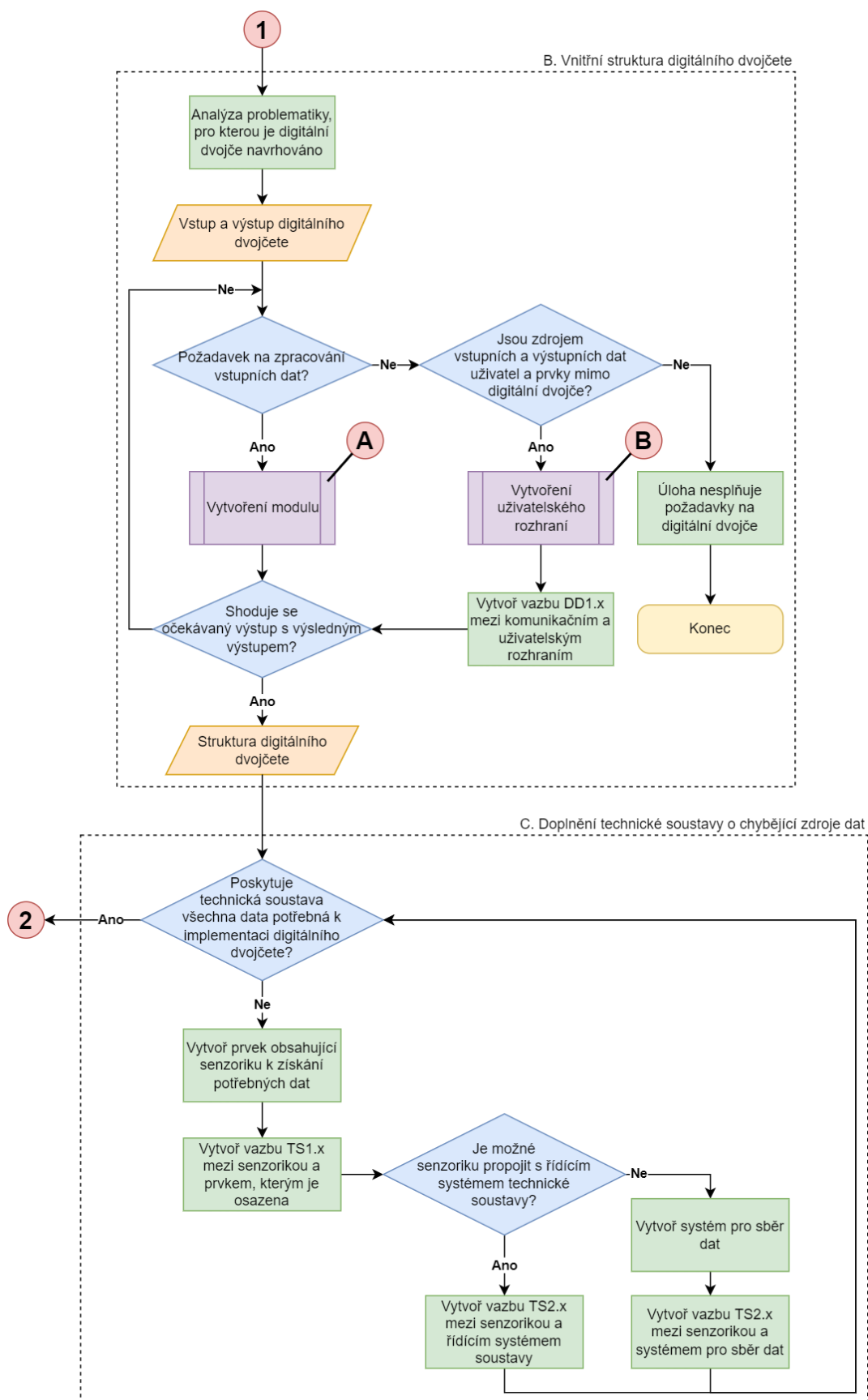
Za určitých situací vyžaduje digitální dvojče ke svému chodu kromě online dat z technické soustavy také data historická nebo jinak související data s technickou soustavou či řešenou problematikou. V rámci vazby na kyber-fyzikální systém technické soustavy lze definovat dva prvky systému sloužící jako uložisko dat, a to interní a externí. Podstatným rozdílem těchto dvou prvků je jejich zapouzdření v rámci kyber-fyzikálního systému. Interní uložisko je přímou součástí kyber-fyzikálního systému a s ostatními prvky je propojeno pomocí lokální sítě zavedené v rámci systému. Z toho vyplývá, že do takového uložiska mají přístup pouze prvky nacházející se uvnitř kyber-fyzikálního systému, kterými jsou technická soustava (V4) a digitální dvojče (V3). Externí datové uložisko se nachází vně kyber-fyzikálního systému a je dostupné prostřednictvím globální sítě (V5). Interní a externí uložisko mohou být v rámci systému využita dvěma způsoby. Implementace těchto uložisk je podmíněna řešenou problematikou digitálního dvojčete a zvolenými technologiemi. Interní uložisko odpovídá implementaci vlastní datové infrastruktury, zatímco externí uložisko představuje technologie založené na cloud computingu. K zajištění zálohování při výpadku spojení je možné využít obě uložiska, kdy jsou data z kyber-fyzikálního systému ukládány v rámci interního uložiska, které je synchronizováno (V6) s externím uložiskem. Při výpadku připojení pak nedochází ke ztrátě dat z důvodu nedostupnosti externího uložiska.

4.4 Metodika návrhu digitálního dvojčete

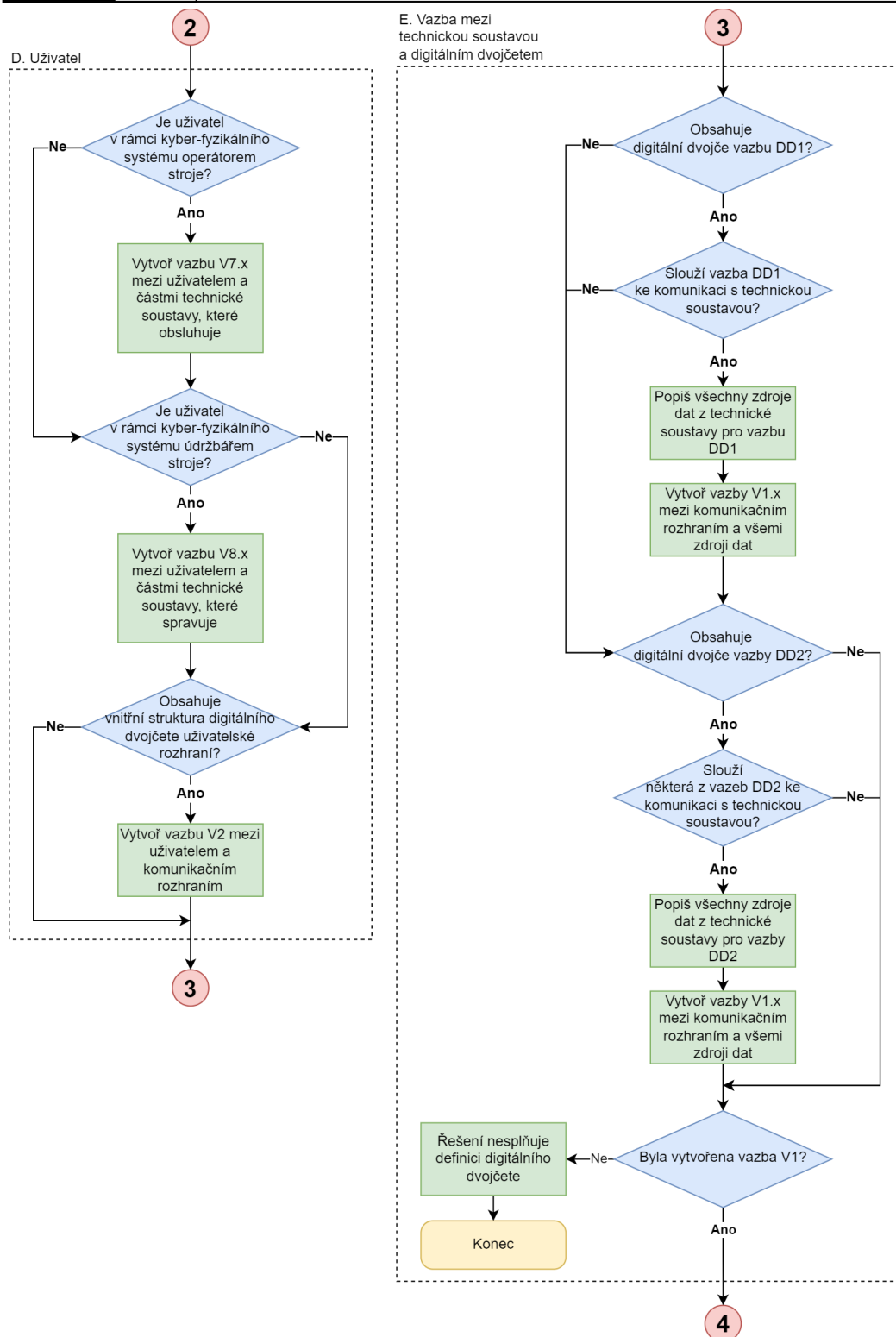
Na základě systémového rozboru prvků kyber-fyzikálního systému byla vytvořena metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému. Výstupem metodiky je kompletní struktura kyber-fyzikálního systému se všemi prvky a vazbami, pomocí které je možné digitální dvojče implementovat. Metodika je popsána pomocí vývojových diagramů znázorněných na Obr. 9 - Obr. 14.



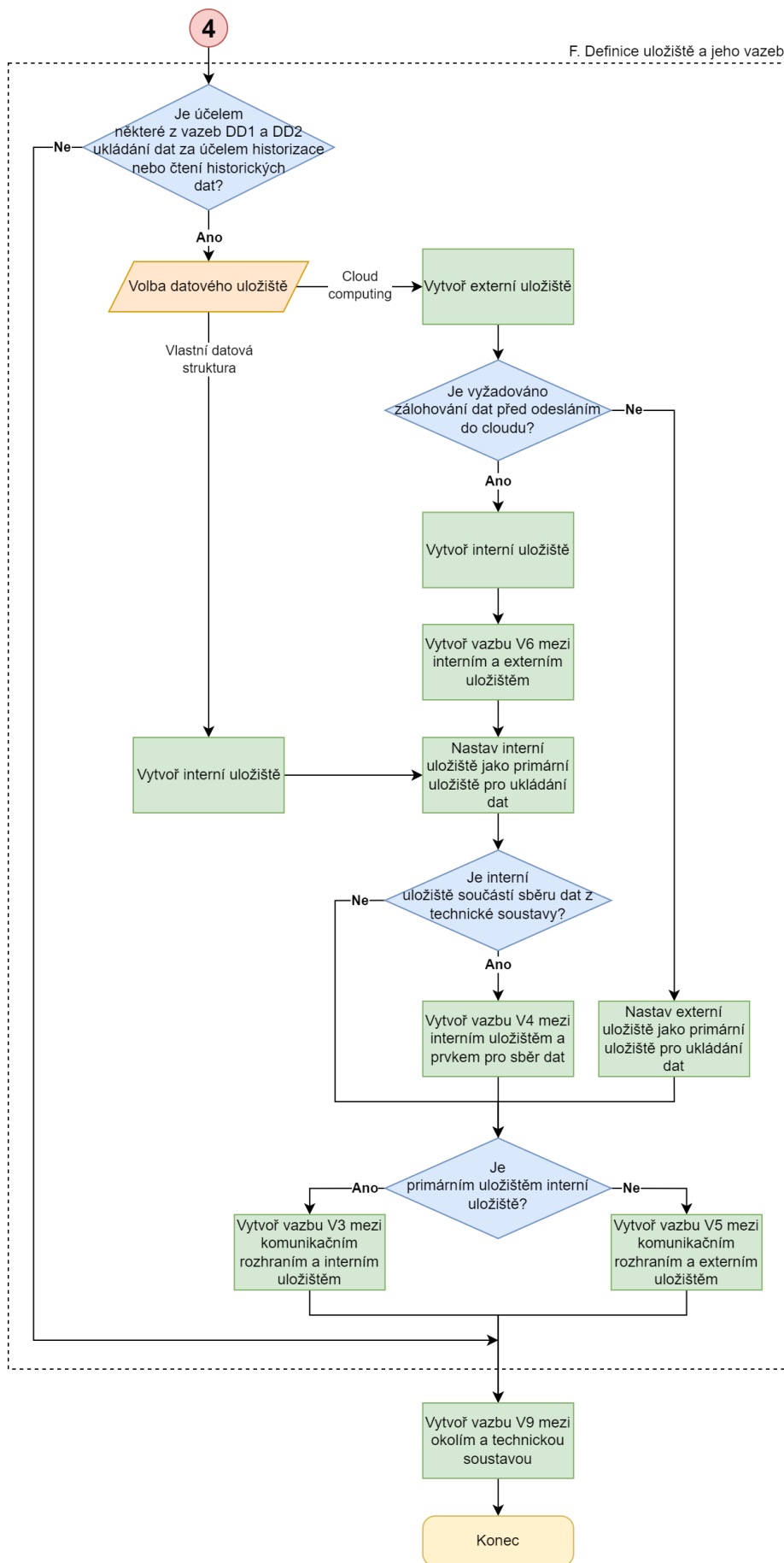
Obr. 9 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část A



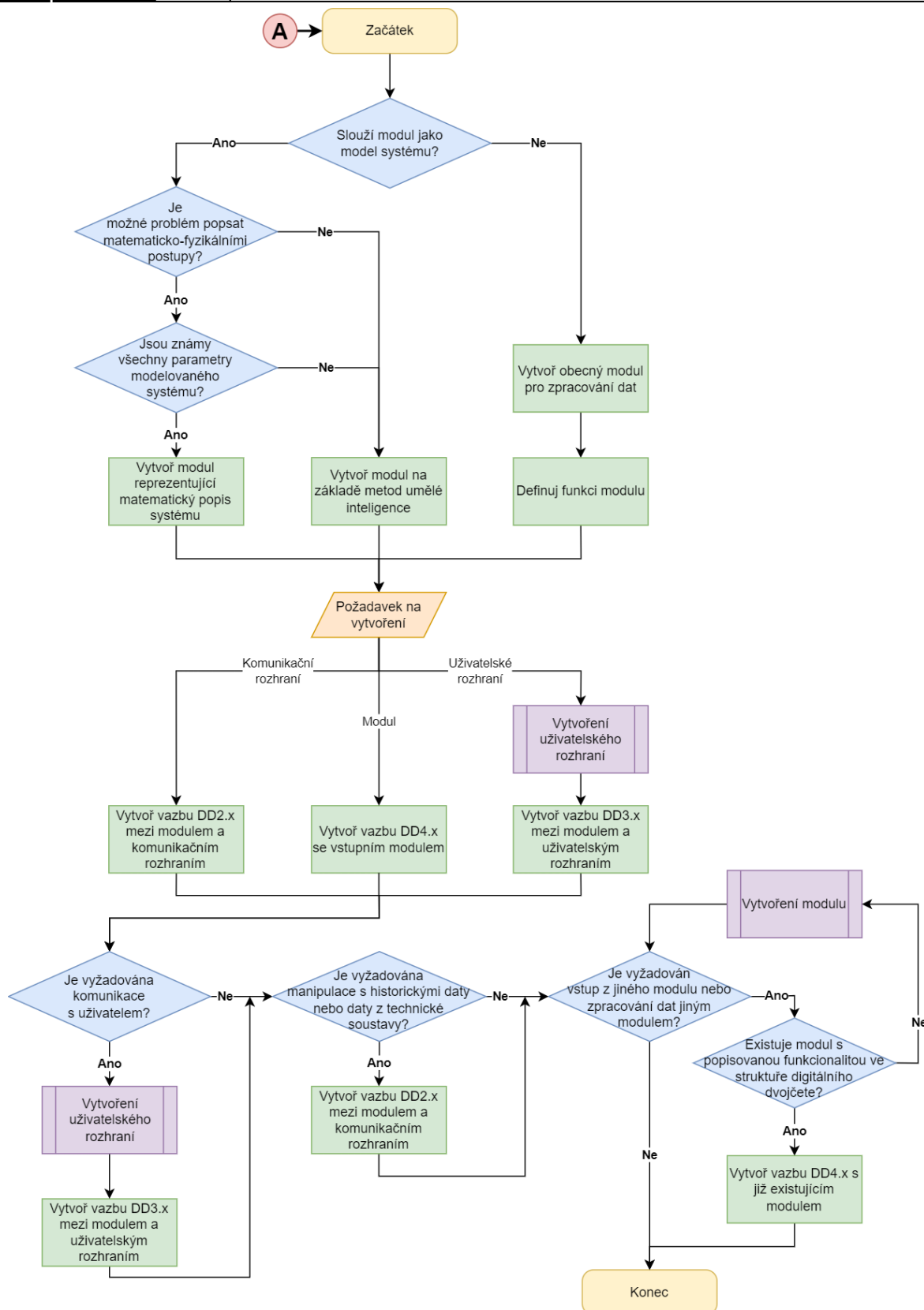
Obr. 10 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část B



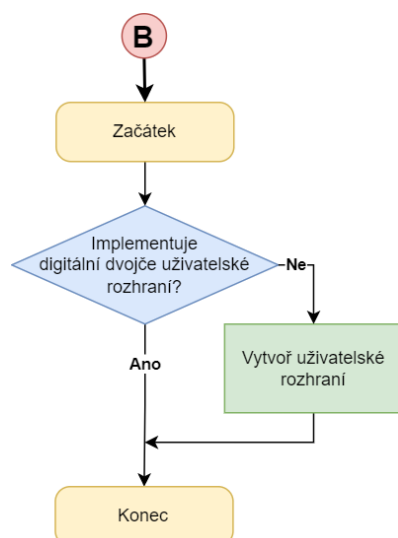
Obr. 11 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část C



Obr. 12 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část D



Obr. 13 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému –subprogram „Vytvoření modulu“



Obr. 14 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – subprogram „Kontrola uživatelského rozhraní“

4.5 Dílčí závěr dizertační práce

Kyber-fyzikální systém je v této práci chápán jako framework a koncept digitálního dvojčete jako jeho aplikace. V terminologii kyber-fyzikálních systému jsou stanoveny dva subsystémy, a to fyzický svět a kyberprostor. Fyzický svět obsahuje hmotné prvky, které tvoří v ucelené podobě technickou soustavu. Vzhledem k zaměření dizertační práce představuje technická soustava ve fyzickém světě obráběcí stroj. Kyberprostor pak obsahuje nehmotné prvky tvořené daty, analytickými metodami, matematickými modely, aplikacemi pro vizualizaci apod. Jednotlivé prvky z obou subsystémů jsou navzájem propojeny za účelem předávání informací a řízení. Digitální dvojče zapadá do tohoto systému jako prvek kyberprostoru reprezentující technickou soustavu.

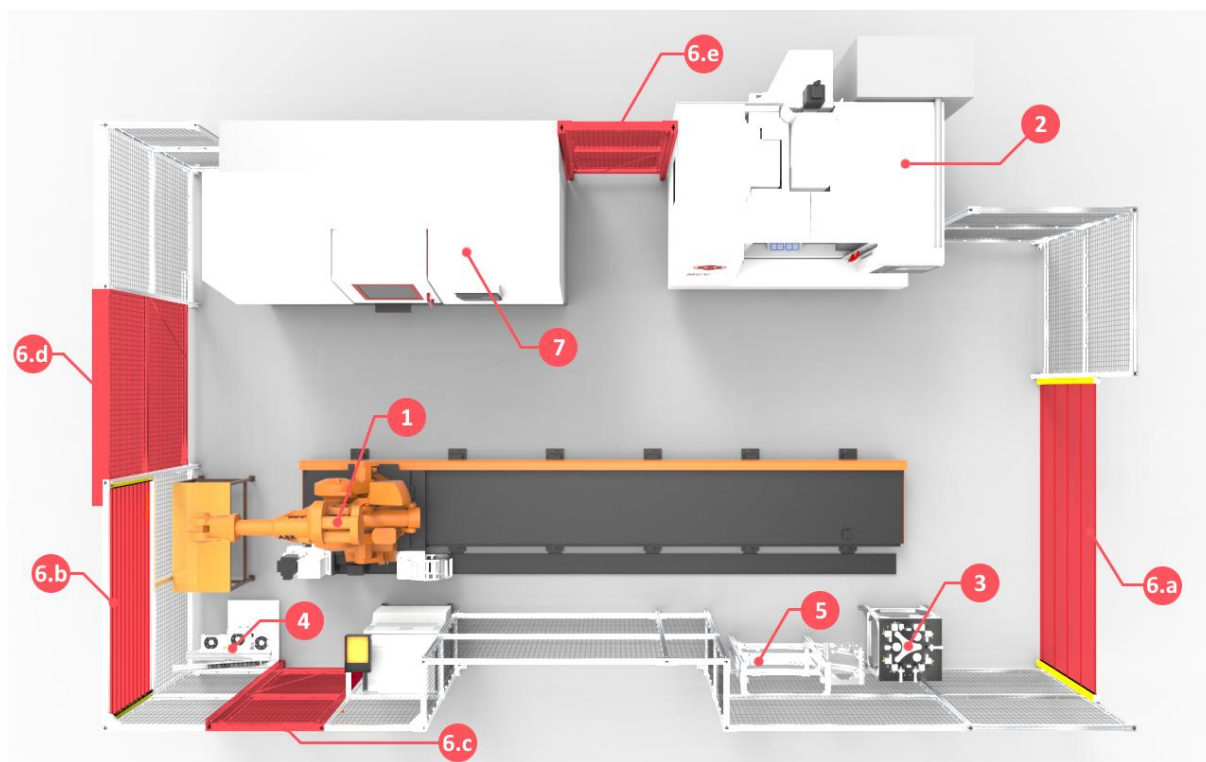
Návrh digitálního dvojčete je velice komplexní proces, během kterého je nutné definovat mnoho aspektů, na základě kterých je dvojče realizováno. Vzhledem ke komplexitě problematiky se návrh digitálního dvojčete liší pro každou technickou soustavu. Z tohoto důvodu byly definovány dvě podstatné veličiny systému digitálního dvojčete, kterými jsou prostor a čas. S pomocí systémového přístupu pak byla s ohledem na podstatné systémové veličiny stanovena definice digitálního dvojčete popisující jednotlivé prvky a vazby. Uvedená definice byla rozšířena o metodiku pro návrh digitálního dvojčete obráběcího stroje, která slouží uživateli jako opora při návrhu digitálního dvojčete a následně při jeho implementaci.

5. APLIKACE METODIKY PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE VÝROBNÍ BUŇKY UVSSR CELL

V této kapitole je navržena struktura digitálního dvojčete pro výrobní buňku UVSSR Cell. Návrh se řídí metodikou z kap. 4.4. Přestože byla metodika vytvořena pro návrh digitálního dvojčete obráběcího stroje, je její použití obecné a je ji tedy možné aplikovat také na výrobní systém jako celek. V rámci implementace metodiky jsou vytyčeny tři problémy, pro které bude navržena struktura digitálního dvojčete. Těmi jsou monitorování stavu, predikce chyby přesnosti najetí do polohy pro obráběcí centrum MCV754 Quick vlivem změny teplot a podpora uživatele při obsluze technické soustavy.

5.1 Identifikace technické soustavy

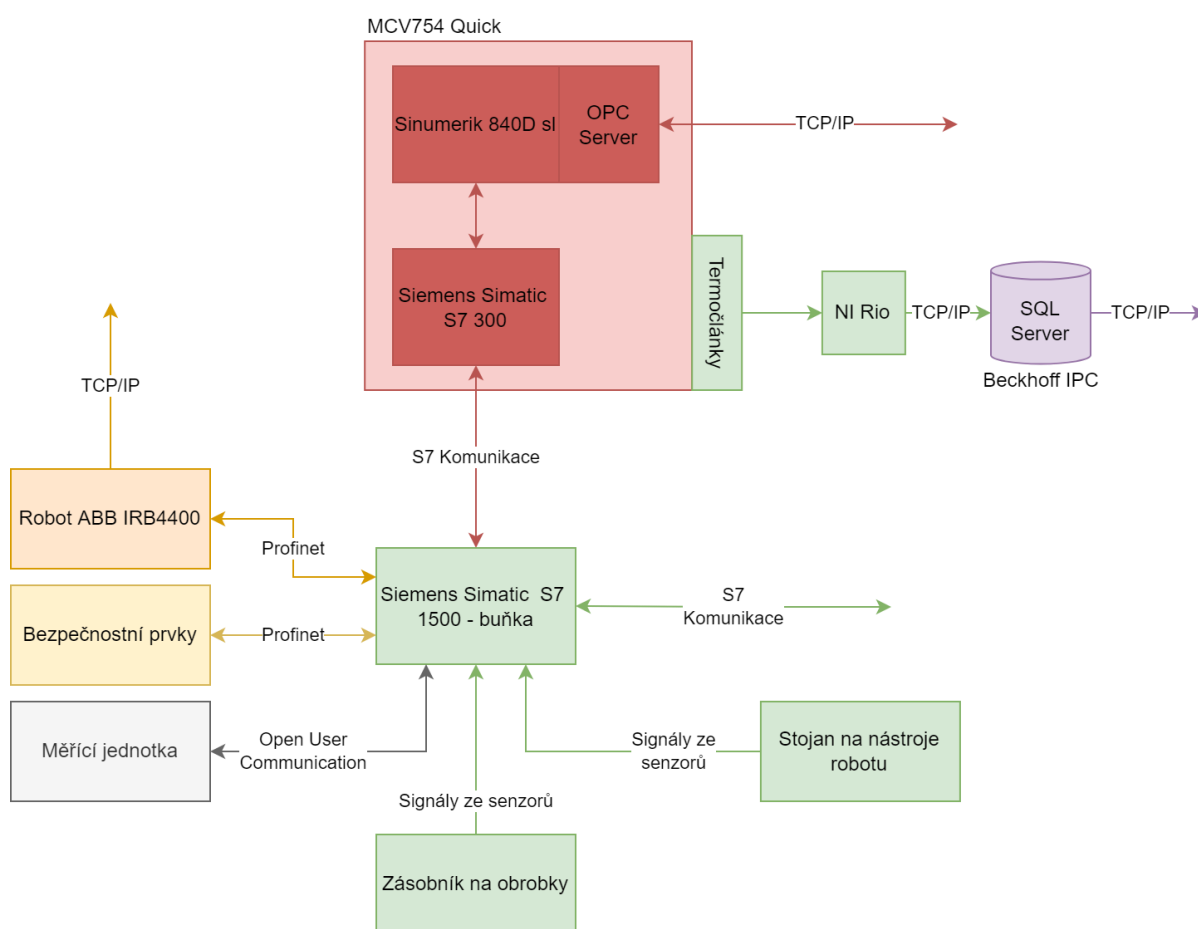
V souladu s vytvořenou metodikou je nejprve nutné identifikovat technickou soustavu a popsat všechny vazby mezi jednotlivými prvky soustavy. Technickou soustavou, pro kterou je digitální dvojčete navrženo, je výrobní buňka UVSSR Cell. Jedná se o automatizované robotizované pracoviště s robotem a obráběcím strojem. Na základě rozložení výrobní buňky na Obr. 15 je možné popsat všechny prvky tvořící technickou soustavu.



Obr. 15: Rozložení výrobní buňky UVSSR Cell

Základ buňky tvoří robot ABB IRB 4400 (1) a obráběcí centrum KOVOSTVIT MAS MCV754 Quick (2). V obou případech se jedná o prvky, na které je možné pohlížet jako na soustavu obsahující řídicí systém, mechanickou strukturu, senzoriku a uživatelské rozhraní. Obráběcí centrum je pak navíc osazeno externí senzorikou a systémem pro sběr dat. Stejně jako je možné popsat soustavu robota, lze popsat také měřicí stanici (3) sloužící k měření odchylek

obrobků na základě porovnání naměřených hodnot s etalonem. Protože se jedná o automatizované pracoviště, je v rámci buňky umístěn stojan na nástroje robotu (4) a zásobník na obrobky (5). Jedná se o prvky, které je možné popsat jako soustavu, tvořenou mechanickou strukturou a senzorikou. Zabezpečení buňky je realizováno pomocí bezpečnostních prvků ABB Jokab Safety (6). Konkrétně se jedná o dvě optické závory (6.a, 6.b) a tři zámky dveří (6.c, 6.d, 6.e). Celé řešení bezpečnosti lze považovat za soustavu obsahující řídicí systém, mechanickou strukturu a senzoriku. Dle Obr. 15 obsahuje výrobní buňka ještě jeden obráběcí stroj. Jedná se o CNC soustruh KOVOSTVIT MAS SPM 16 (7). Ačkoliv se tento soustruh nachází fyzicky uvnitř buňky, není součástí automatizovaného robotizovaného pracoviště. Z tohoto důvodu není tento stroj po zbytek práce uvažován jako prvek kyber-fyzikálního systému výrobní buňky. Kromě výše uvedených prvků obsahuje výrobní buňka řídicí systém a uživatelské rozhraní. Technologické schéma propojení jednotlivých prvků výrobní buňky je zobrazeno na Obr. 16.



Obr. 16 Technologické schéma výrobní buňky UVSSR Cell popisující komunikaci mezi jednotlivými zařízeními

Na základě identifikace prvků soustavy, technologického schématu a použití metodiky, konkrétně části *A. Struktura technické soustavy* (Obr. 9) je pak možné definovat vazby mezi jednotlivými prvky následujícím způsobem.

5.1.1 Vazba TS3

Mezi identifikované prvky technické soustavy řízené pomocí řídicího systému technické soustavy patří:

- Obráběcí centrum MCV754 Quick – řídicí systém výrobní buňky (TS3.a);

- Robot ABB IRB440 – řídicí systém výrobní buňky (TS3.b);
- Bezpečnostní prvky – řídicí systém výrobní buňky (TS3.c);
- Měřicí stanice – řídicí systém výrobní buňky (TS3.d).

Všechny tyto vazby jsou obousměrné, kdy je výstupem řídicího systému výrobní buňky instrukce pro řízený prvek, a naopak vstupem jsou stavy řízeného prvku.

5.1.2 Vazba TS4

Mezi identifikovanými prvky technické soustavy se nachází pouze jedno uživatelské rozhraní pro interakci s řídicím systémem technické soustavy, a tím je uživatelské rozhraní výrobní buňky. Jedná se o obousměrnou vazbu, protože kromě informací o stavech, které uživatel z řídicího systému dostává, je možné výrobní buňku skrze toto rozhraní také řídit.

5.1.3 Vazba TS1

Mezi identifikovanými prvky technické soustavy se nachází tři prvky představující senzoriku. Těmito prvky jsou:

- Zásobník na obrobky;
- Stojan na nástroje robotu;
- Termočlánky – MCV754 Quick (TS1).

Na zásobník na obrobky a stojan na nástroje robotu je možné pohlížet jako na soustavu tvořenou mechanickou strukturou a senzorikou. Vazbu TS1 by tedy bylo možné aplikovat uvnitř takovéto soustavy mezi těmito dvěma prvky. Z pohledu popisu výrobní buňky je vnitřní struktura těchto dvou soustav nepodstatná, proto jsou v rámci technické soustavy reprezentovány pouze jako prvky bez vazby TS1. Termočlánky slouží k měření teplot na obráběcím centru v jeho okolí, proto je možné mezi ním a prvkem MCV754 Quick vytvořit vazbu TS1. Vazba je z principu jednosměrná.

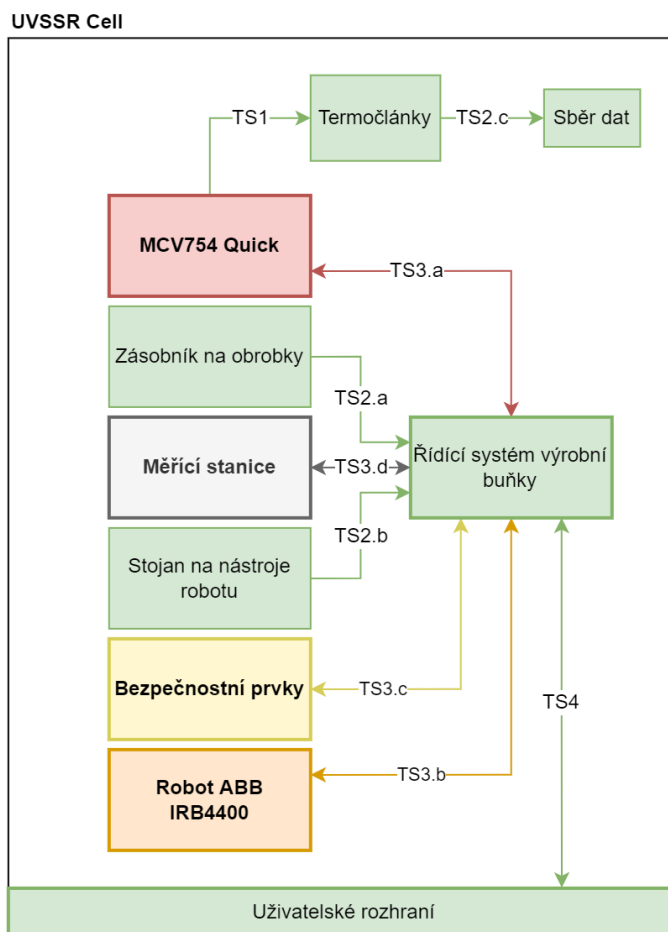
5.1.4 Vazba TS2

V kap. 5.1.3 byly stanoveny tři prvky představující senzoriku. U zásobníku na obrobky a stojanu na nástroje robotu jsou signály zpracovávány přímo řídicím systémem výrobní buňky. V případě termočlánků se jedná o externí senzoriku, jejíž signály jsou zpracovávány systémem pro sběr dat. Vazby je tedy možné definovat následovně:

- Zásobník na obrobky – řídicí systém výrobní buňky (TS2.a);
- Stojan na nástroje robotu – řídicí systém výrobní buňky (TS2.b);
- Termočlánky – sběr dat (TS2.c).

5.1.5 Struktura technické soustavy

Na základě aplikace navržené metodiky v části A. *Struktura technické soustavy* byly definovány všechny prvky technické soustavy a jednotlivé vazby mezi nimi. Výsledkem je struktura technické soustavy zobrazená na Obr. 17.



Obr. 17 Struktura technické soustavy popisující všechny její prvky a vazby

5.2 Návrh digitálního dvojčete pro monitorování stavu

Informace o provozních datech a stavech jednotlivých prvků technické soustavy umožňují uživateli činit rozhodnutí o provozuschopnosti technické soustavy, kvalitě výroby, popřípadě umožňují detekovat neobvyklé chování, které může signalizovat vznikající poruchy. Zprostředkování informací o stavu by mělo být pro uživatele srozumitelné a intuitivní do takové míry, aby se dokázal dostatečně rychle zorientovat ve vizualizovaných datech.

5.2.1 Zdroj dat v rámci technické soustavy

Technická soustava jako celek produkuje velký objem dat. Tyto data jsou tvořena provozními stavy a parametry jednotlivých zařízení v rámci technické soustavy. V následující kapitole jsou uvedeny všechny zdroje dat v technické soustavě.

- MCV 754 Quick – obráběcí centrum poskytuje dva zdroje dat. Prvním z nich je řídicí systém stroje, v tomto případě se jedná o Sinumerik 840D sl. Z řídicího systému je možné vyčíst širokou škálu informací o provozních stavech a strojních parametrech. Druhým zdrojem dat je externí sensorika stroje tvořená termočlánky rozmístěnými v prostoru stroje a jeho okolí. Naměřené teploty jsou sbírány pomocí systému pro sběr dat a ukládány do databáze.
- Robot ABB IRB4400 – robot poskytuje přístup do řídicího systému, ze kterého lze vyčítat provozní informace o jednotlivých osách a stavech robotu.

- Bezpečnostní prvky – jsou tvořeny dvěma světelnými závory Orion a třemi dveřmi se zámky Knox dávající informace o tom, jestli je či není prvek zajištěn.
- Zásobník na obrobky – zásobník s šesti pozicemi pro obrobky. Poskytuje informace o obsazenosti jednotlivých pozic. Na základě indukčních snímačů detekuje přítomnost obrobku v dané pozici.
- Měřicí stanice – porovnává rozměry obrobené součásti s etalonem na základě použití osmi dotykových senzorů typu LVDT. Z měřicí stanice lze vyčítat takto naměřené hodnoty společně se stavem, ve kterém se stanice nachází.
- Stojan na nástroje robotu – stojan se třemi pozicemi pro odložení nástrojů robotu. Všechny pozice jsou osazeny indukčními snímači, tudíž je možné sledovat jejich obsazenost.

Propojení jednotlivých zařízení a tok dat je znázorněn na obrázku Obr. 16. Technická soustava poskytuje čtyři přístupové body pro vyčítání dat. Centrálním bodem celé technické soustavy je PLC Siemens Simatic S7 1500. Toto PLC monitoruje stav všech zařízení v rámci technické soustavy a také tato zařízení řídí. Pro přístup k datům tohoto PLC je k dispozici rozhraní komunikující na základě S7 komunikace. Pomocí něj je možné vyčítat téměř všechna provozní data technické soustavy. Výjimku tvoří část dat z robotu a obráběcího centra, která nelze vzhledem k technologickým omezením vyčítat prostřednictvím řídicího systému výrobní buňky. Příkladem je vyčítání natočení jednotlivých os robotu, které je ale možné získat z řídicího systému robotu na základě SDK od firmy ABB, využívající komunikaci pomocí protokolů TCP/IP. Stejně tak všechny strojní parametry obráběcího centra jsou přístupné pouze z řídicího systému Sinumerik 840D sl. Tato data lze vyčítat skrze PLC obráběcího centra, ale k tomu je nutný přístup k programu tohoto PLC. Ten k dispozici není, proto je za účelem vyčítání těchto dat vytvořen OPC UA server umožňující přístup ke všem datům v rámci řídicího systému Sinumerik 840D sl. Posledním přístupovým bodem je IPC Beckhoff s databází, ve které jsou historizovány teploty ze stroje a jeho okolí, naměřené pomocí externí senzoriky.

5.2.2 Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete

V předchozí kapitole byly popsány všechny zdroje dat v technické soustavě. Před samotným návrhem je nutné určit, která data budou tvořit vstup a jaký bude výstup digitálního dvojčete. Ne všechna data, která jsou technickou soustavou generována, je nutné pro účely monitorování vyčítat. Příkladem jsou data z obráběcího centra. Řídicí systém poskytuje velké množství parametrů, které ale nejsou pro uživatele z hlediska obsluhy stroje relevantní. Data zvolená pro účely monitorování jsou shrnuta v Tab. 2. Tato data tedy budou tvořit vstup do digitálního dvojčete. Z výčtu jsou patrné čtyři zdroje dat, přičemž tři jsou prvky technické soustavy a jeden zdroj je reprezentován interním uložištěm, kterým je IPC Beckhoff. Výstupem digitálního dvojčete jsou stejná data zobrazená uživateli za účelem vzdáleného monitorování a také monitorování stavu přímo u stroje.

Tab. 2 Výčet parametrů a stavů představující vstup do digitálního dvojčete

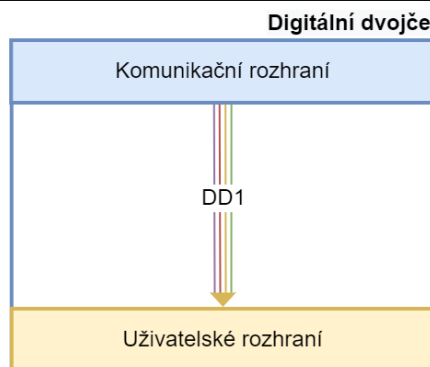
Zařízení	Data	Zdroj dat
MCV754 Quick	Teploty	IPC Beckhoff
	Polohy os (X, Z, Z)	OPC UA server
	Stav dveří	Siemens Simatic S7 1500
	Stav magnetického upínače	
	Stav (stroj obrábí, obrábění dokončeno)	
Robot ABB IRB4400	Polohy os (osy robota A1-6 a osa pojezdu)	Robot ABB IRB4400
	Stavové signály robotu (35 logických signálů)	Siemens Simatic S7 1500
	Aktuální nástroj	
Bezpečnostní prvky	Celkový stav celého bezpečnostního systému	Siemens Simatic S7 1500
	Zámky dveří (signály ze tří zámků Knox)	
	Stav závor (dva signály ze dvou závor Orion)	
	Stav tlaku	
Zásobník na obrobky	Stav pozic 1-6	Siemens Simatic S7 1500
Měřicí stanice	Naměřené hodnoty (snímač 1-8)	Siemens Simatic S7 1500
	Stav stanice (měření dokončeno, příprava dokončena, stanice se připravuje, stanice měří)	
Stojan na nástroje robotu	Přítomnost nástrojů (tři pozice pro chapadlo Schunk, chapadlo SMC a vakuovou přísavku)	Siemens Simatic S7 1500
	Stav zásobníku na kostky	

5.2.3 Vazba DD1

Vzhledem k charakteru úlohy, kterou je monitorování stavu se nepředpokládá žádné zapracování vstupních dat. Cílem je pouze zprostředkovat data z technické soustavy uživateli za pomoci vhodné vizualizační metody. To vede na implementaci uživatelského rozhraní a na jeho propojení s komunikačním rozhraním, poskytujícím vstupní data za pomoci vazby DD1. Výsledkem je tedy výstup v podobě vizualizace vstupních dat prostřednictvím uživatelského rozhraní za účelem zprostředkování informací o technické soustavě.

5.2.4 Struktura digitálního dvojčete pro monitorování stavu technické soustavy

Na základě aplikace metodiky, části B. *Vnitřní struktura digitálního dvojčete* byly definovány všechny prvky a vazby digitálního dvojčete k problematice řešení monitorování stavu. Výsledné schéma je zobrazeno na Obr. 18.

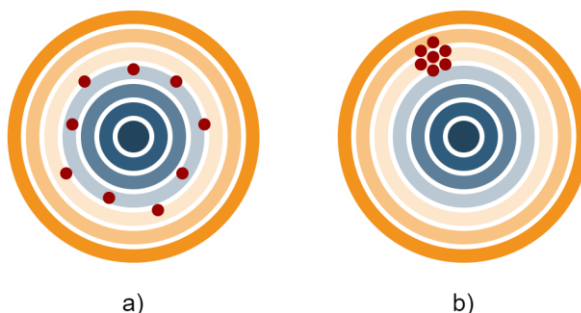


Obr. 18 Vnitřní struktura digitálního dvojčete pro monitorování stavu technické soustavy

5.3 Návrh digitálního dvojčete pro predikci chyby přesnosti najetí do polohy způsobenou změnou teplot

Na přesnost obráběcích strojů jsou v dnešní době kladeny vysoké požadavky. Podle normy ČSN ISO 5725 je obecný termín „přesnost“ definován jako míra odchylek měření od referenční hodnoty, kterou je možné vyjádřit pomocí pravdivosti a preciznosti (Obr. 19).

- Pravdivost – udává těsnost shody mezi střední hodnotou velkého počtu zkoušek a referenční hodnotou
- Preciznost – vyjadřuje těsnost shody mezi jednotlivými výsledky měření



Obr. 19 Pravdivost a Preciznost, a) vysoká pravdivost a nízká preciznost, b) nízká pravdivost a vysoká preciznost

Přesnost obrábění je pak možné definovat jako stupeň shody obrobene součásti s rozměrovými a geometrickými požadavky na součást kladenou [69]. Víceosé obráběcí stroje podléhají různým zdrojům chyb, jež jsou odpovědné za odchylky mezi trajektorií nástroje a obrobkem. Florussen definoval čtyři faktory, které se hlavní měrou podílí na celkové výrobní přesnosti obráběcích stroj [70]:

- Geometrické chyby v systému os.
- Konečná tuhost strukturálních smyček při statickém zatížení.
- Působení teplot.
- Dynamické chování stroje.

Z pohledu vyhodnocení přesnosti obráběcích strojů je možné uvažovat tři typy přesnosti, a to přesnost geometrickou, pracovní a výrobní. Ná vaznost jednotlivých přesností je zobrazena na Obr. 20.

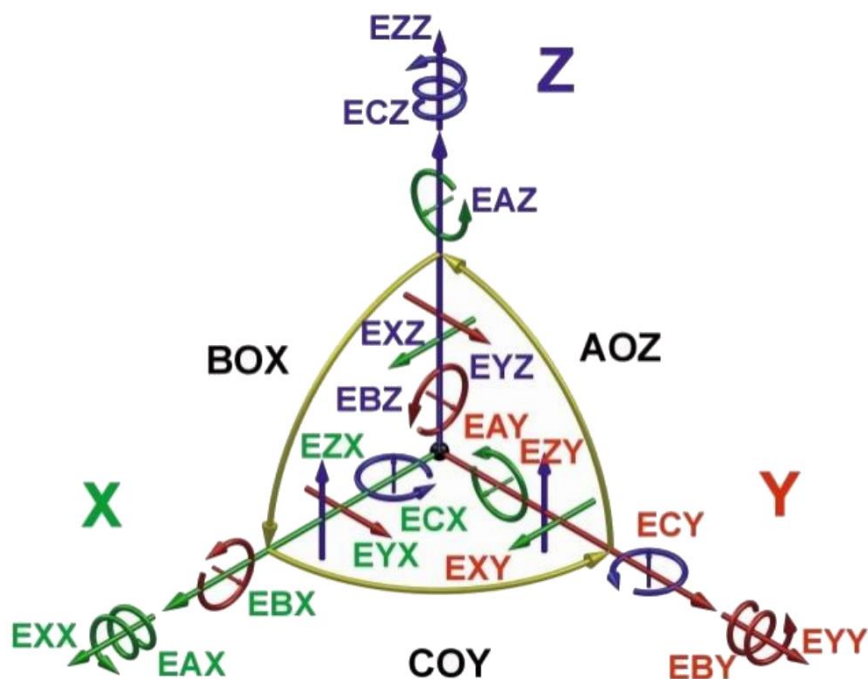
Geometrická přesnost	Pracovní přesnost	Výrobní přesnost
- Struktura obráběcího stroje - Kvalita dílů - Kvalita montáže	- Přesnost polohy nástroje vůči zkušebnímu obrobku - Deformace od řezných sil - Změna teplot způsobená provozem stroje - Řezné podmínky	- Působení okolního prostředí - Obsluha stroje - Technologie výroby - Měření - Obráběná součást - Tuhost soustavy

Obr. 20 Návaznost přesností obráběcích strojů a hlavní vlivy způsobující nepřesnost

5.3.1 Geometrická přesnost

Geometrická přesnost je dána strukturou obráběcích strojů, která udává přesnost tvarů, vzájemné polohy a pohybu funkčních částí ovlivňující pracovní přesnost stroje. Samotná geometrická přesnost a její měření je definované normami ČSN ISO 230. Základy jejího měření stanovil Dr. Schlesinger [71].

Průběh zkoušek definuje norma ČSN ISO 230-1, a to jako zkoušky prováděné bez zatížení nebo za dokončovací podmínky obrábění. Stroj musí být vhodně ustaven, tzn. na vhodném nepoddajném základu ve vodorovné poloze a uveden do teplotně ustáleného stavu.



Obr. 21 Znázornění geometrických chyb tříosého obráběcího stroje [72]

Každý pohyb strojní osy je popsán 6 stupni volnosti, tři pro translaci a tři pro rotaci. Pro každou osu je tedy možné definovat 6 chyb, kterými jsou chyba přesnosti najetí do polohy, dvě chyby přímosti, a tři úhlové chyby. U tříosého obráběcího stroje je nutné dále uvažovat další tři chyby kolmosti mezi jednotlivými osami. Z toho plyne, že je tříosý obráběcí stroj popsán 21 geometrickými chybami. Grafické znázornění chyb zobrazené na Obr. 21 je tvořeno chybami přesnosti najetí do polohy (E_{XX} , E_{YY} , E_{ZZ}), chybami přímostí (E_{XY} , E_{XZ} , E_{YX} , E_{YZ} , E_{ZX} , E_{ZY}), úhlovými chybami (E_{AX} , E_{BX} , E_{CX} , E_{AY} , E_{BY} , E_{CY} , E_{AZ} , E_{BZ} , E_{CZ}) a chybami kolmosti (A_{OZ} , B_{OX} , C_{OY}). Geometrická přesnost stroje není stálá, ale naopak proměnná v čase. Vliv na změnu geometrické přesnosti má zejména opotřebení jednotlivých částí obráběcího stroje.

5.3.2 Pracovní přesnost

Jedná se o vlastnost obráběcího stroje popisující jeho přesnost na základě testovacího obrobku či série. Při testování jsou nastaveny podmínky odpovídající budoucí reálné sériové výrobě [73]. Na pracovní přesnosti stroje se podílí zejména [74]:

- Geometrická přesnost stroje.
- Přesnost polohy nástroje vůči obrobku.
- Odolnost stroje vůči pružným deformacím vzniklým působením řezných sil.
- Tepelná stabilita stroje a jeho schopnost odolávat teplotním dilatacím.
- Řezné podmínky.

Typickými zdroji nepřesností jsou kinematické chyby, termo-mechanické chyby, statická a dynamická zátěž. Pracovní přesnost je také dána technologickými podmínkami.

5.3.3 Výrobní přesnost

Výrobní přesnost je charakteristika obráběcího stroje popisující přesnost stroje posuzovanou z dlouhodobého hlediska v průběhu sériové výroby za působení podmínek okolního prostředí. Na výrobní přesnost má zásadní vliv pracovní přesnost stroje spolu se všemi vlivy působící na proces obrábění. Mezi tyto vlivy patří [68]:

- Vliv okolního prostředí (teplota, tlak, vlhkost).
- Obsluha stroje.
- Technologie výroby.
- Měření.
- Obráběná součást.
- Tuhost soustavy stroj-nástroj-obrodek.

5.3.4 Vliv teploty na přesnost obráběcího stroje

Jedním ze základních faktorů, který má vliv na výrobní přesnost obráběcích strojů, jsou dilatace částí stroje vlivem působení změny teplot. Podle Bryana má vliv teplot v průběhu obrábění 40-70% podíl na celkové výrobní chybě stroje, přičemž deformace způsobené vlivem teplotních změn v mnoha případech přesahují deformace od statických sil [75]. Zdroje tepla mohou být vnitřní a vnější. Vnitřní zdroje tepla vznikají důsledkem provozu samotného obráběcího stroje. Jde jednak o teplo vytvářené řezným procesem a dále pak o teplo generované mechanickými částmi obráběcího stroje jako jsou servopohony, čerpadla, vedení os, spojky, převody, hydraulické oleje a ložiska. Oproti tomu vnějšími zdroji tepla jsou myšleny všechny vlivy okolí. Zejména se jedná o teplotu okolního prostředí a náhlé teplotní změny způsobené slunečním zářením či větráním.

Pro udržení stanovené přesnosti obrábění je potřeba, aby byl obráběcí stroj teplotně stabilizovaný. V reálných pracovních podmínkách při často se měnících zakázkách a při výrobě malých sérií ovšem nelze tohoto stavu dosáhnout. Ať už vlivem proměnlivého zatížení stroje během procesu obrábění nebo působením externích teplotních zdrojů na stroj samotný, dochází ke změně teplot jednotlivých částí obráběcího stroje jako jsou kuličkové šrouby, lineární snímače, či rám stroje. To má za následek dilataci výše uvedených částí stroje, což vede ke vzniku polohové odchylky a tím změně výrobní přesnosti.

5.3.5 Současné metody kompenzace teplotních chyb

Diagnostika teplotních chyb není jednoduchá vzhledem k jejich charakteru, kdy se teplotní chyby mění rychle v čase. Z tohoto důvodu lze teplotní chyby výrazně snížit, nikoli však plně kompenzovat. Na řešení problematiky kompenzace teplotních chyb strojů lze pohlížet dvěma způsoby, pasivně jejím vyloučením nebo aktivně její kompenzací.

5.3.5.1 Konstrukce

Teplotní chyby stroje je možné výrazně potlačit už ve fázi návrhu a konstrukce, pokud je stroj navrhován s ohledem na znalosti vzniku a šíření tepla. Jeden z možných přístupů spočívá v odstranění zdrojů tepla a tím zabránění vzniku tepla v obráběcím stroji. Příkladem tohoto přístupu může být umístění motoru vřetene mimo obráběcí stroj a jeho tepelné odizolování od okolního prostředí. I v tomto případě ale není možné kompletně odstranit všechny zdroje tepla jako jsou kuličkové šrouby, spojky apod.

Další metodou je zachování symetrie konstrukce. To nemá přímý vliv na vyloučení termoelastických deformací, nicméně, pokud je stroj konstruován ze symetricky strukturálních částí, pak je možné snáze predikovat výslednou chybu. Tato skutečnost vychází z předpokladu, že při takto navrženém stroji budou symetrické i termoelastické deformace a chyba se tudíž bude šířit jedním směrem, a ne do všech směrů.

V neposlední řadě je možné výrazně redukovat termoelastické deformace použitím vhodných teplotně stabilních materiálů s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti pro konstrukci strukturálních částí stroje. Mezi tyto materiály patří polymerbeton, kompozitní materiály vyztužené vlákny, invar, kámen nebo keramika.

5.3.5.2 Řízení

Spočívá v řízení toku tepla pomocí vytvoření rovnoměrného tepelného pole, které bude ovlivňovat všechny části obráběcího stroje stejným způsobem. K tomuto účelu je využíváno chlazení a ohřívání jednotlivých částí stroje. Jedná se nicméně o složité a nákladné řešení, které je vhodné použít v případě, že jsou ostatní způsoby potlačení termoelastických deformací neefektivní [76].

5.3.5.3 Kompenzace

V případě, že není možné upravit konstrukční návrh stroje nebo i přes využití všech konstrukčních řešení stroj nesplňuje požadovanou přesnost, je nutné přistoupit ke kompenzaci vzniklé chyby. Ke kompenzaci se také často přistupuje jako k alternativě k chlazení nebo ohřevu stroje, a to z důvodu nižších nákladů [77]. Principem kompenzace je úprava polohování jednotlivých os na základě provedených měření. Moderní řídicí systémy obráběcích strojů za tímto účelem poskytují možnost nahrání kompenzačních tabulek, na základě kterých dokáže systém upravit skutečnou polohu nástroje v prostoru tak, aby se chyba eliminovala. Z pohledu typu naměřených dat lze považovat kompenzaci na přímou a nepřímou. Přímá kompenzace využívá geometrická data, zatímco nepřímá kompenzace pracuje s veličinami, které vedou ke vzniku geometrických chyb (v tomto případě teplot), podle kterých je pak stroj kompenzován.

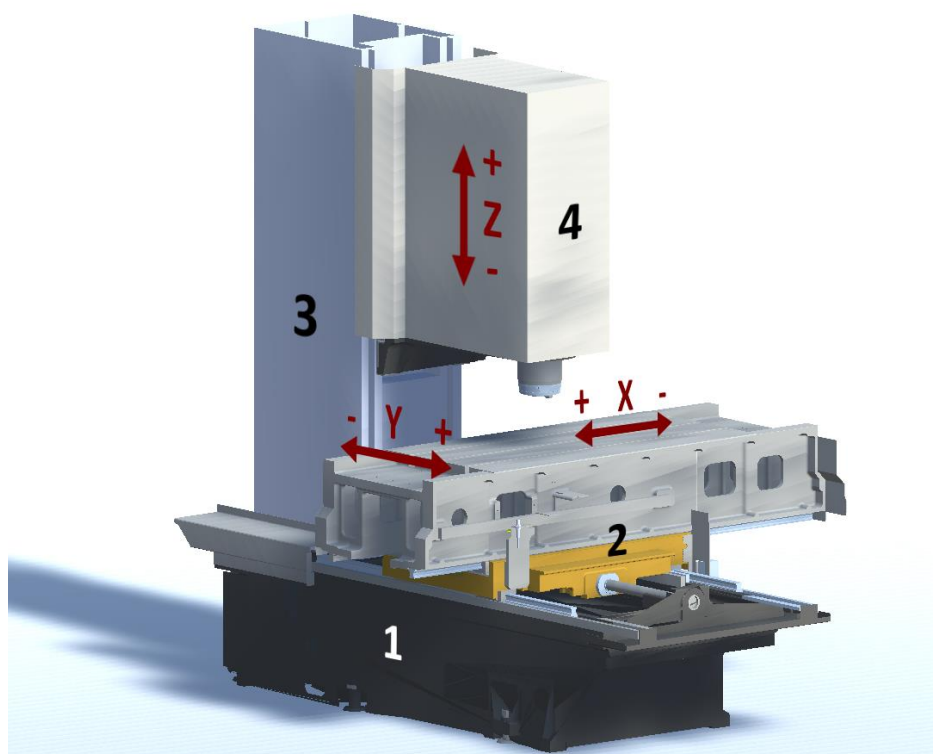
V rámci přímé kompenzace jsou chyby přesnosti najetí do polohy měřeny nejčastěji pomocí laser interferometru. Výhodou této metody je velice přesná kompenzace, jelikož jsou přesně stanoveny odchylky po celé délce osy. Nevýhodou je ovšem nákladnost měření, do které se značně promítá nutnost odstavit stroj od výroby. Měření je také časově náročné vzhledem

k nutnosti správně ustavit měřicí optiku a dále k nutnosti temperování stroje na provozní teplotu. Z tohoto pohledu se jedná o velice přesnou a však neefektivní metodu kompenzace.

Nepřímou kompenzací je naproti tomu možné provádět kontinuálně vzhledem k tomu, že samotné měření neovlivňuje výrobní proces. Kvalita této kompenzace je ovšem do značné míry závislá na kvalitě modelu, který je zodpovědný za odhad geometrických chyb. Mezi nejpoužívanější metody patří metoda konečných prvků, regresní analýza, metody umělé inteligence, fuzzy logika nebo přenosové funkce [78], [79], [80], [81]. Vstupem do tohoto modelu jsou naměřená data, v případě kompenzace termoelastických chyb jsou to teploty kompenzované součásti. Pro kompenzaci přesnosti polohování je ideální umístit teplotní snímače co nejblíže lineárnímu snímači [82]. Úkolem modelu je tyto data vyhodnotit a na jejich základě určit nepřesnost, kterou je nutné kompenzovat [77].

5.3.6 Identifikace soustavy

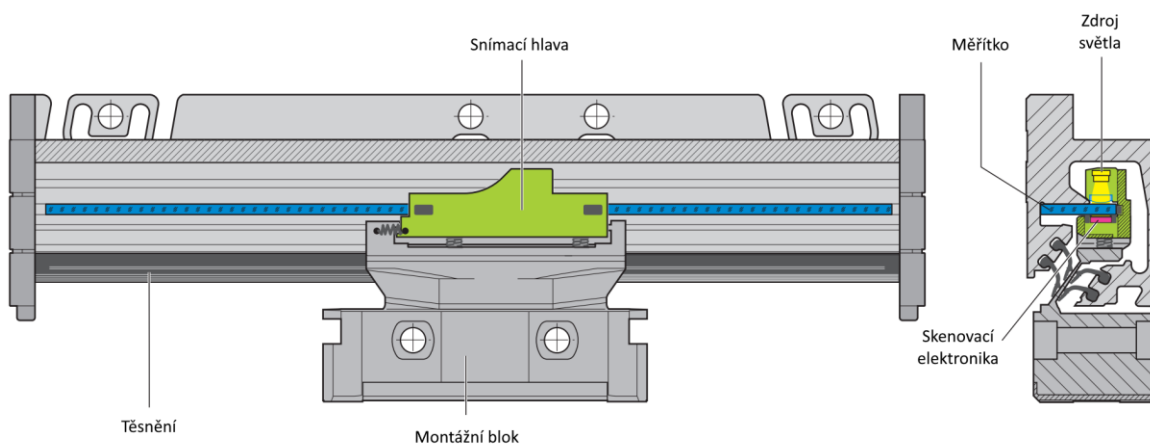
Predikce chyby přesnosti najetí do polohy je řešena pro obráběcí centrum MCV754 Quick od společnosti Kovosvit MAS. Jedná se o tříosou stolovou frézku s automatickým výměníkem nástrojů (Obr. 22). Stroj je součástí výrobní buňky UVSSR Cell a nachází se v dílně ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. Jedná se o vytápěnou, ale neklimatizovanou halu. Teplota v hale se v rámci roku pohybuje mezi 18°C a 28°C. Teplotu ale značně ovlivňují další náhodné jevy jako je průvan z otevřených vrat, provoz jiných strojů apod. Základními částmi frézky jsou lože, křížový stůl, stojan a vřeteník. Stroj je postaven na nosném rámu ve tvaru C s křížovým stolem. Z pohledu kinematiky je pohyb osy Z zajištěn vřeteníkem a pohyb v osách X a Y pracovním stolem, přičemž všechny pohyby jsou realizovány lineárně. O pohyb křížového stolu se starají dva motory. Pohon osy X je připevněn v levé části pod stolem a pohon osy Y se nachází ve stojanu.



Obr. 22 Znárodnění kinematiky soustavy včetně jednotlivých funkčních částí stroje. 1 - Lože, 2 - křížový stůl, 3 - stojan, 4 - vřeteník

K tomu, aby byl stroj schopný určit aktuální pozici ve které se nachází, je nutné zavést zpětnou polohovou vazbu do řídicího systému. Za tímto účelem je potřeba odměřovat polohu jednotlivých os stroje. V terminologii obráběcích strojů rozlišujeme odměřování přímé a nepřímé. U nepřímého odměřování je získávána poloha pomocí rotačních snímačů polohy, které jsou připevněny na konec kuličkového šroubu nebo přímo odměřováním z pohonů. Na základě parametru kuličkového šroubu a signálu z rotačního enkodéru je možné dopočítat polohu osy. Oproti tomu je u přímého odměřování snímána skutečná poloha obráběcího stroje za pomoci lineárních enkodérů. Lineární enkodér je připevněn na pohybující část stroje, zatímco jezdec je připevněn k pevné části. Poloha je vyhodnocována na základě polohy jezdce v rámci lineárního enkodéru.

K vyhodnocení polohy jsou využívány principy indukčnosti, magnetismu, fotoelektrických jevů nebo laseru. Z konstrukčního hlediska si jsou jednotlivé typy snímačů velmi podobné. Stěžejními konstrukčními prvky jsou měřítko a jezdec se snímací hlavou. Pro účely odměřování u obráběcích strojů jsou používány zapouzdřené lineární snímače z důvodu zamezení přístupu třísek, prachu či kapalin k měřítku. Měřítka je v tomto případě přilepeno k pouzdru snímače a vnitřní část jezdce se snímací hlavou je chráněna pomocí pružného těsnění. K tomu, aby se zamezilo vniku nečistot dovnitř enkodéru okolo pružného těsnění, je vnitřní prostor enkodéru udržován stále natlakovaný pomocí přivedeného vzduchu. Lineární snímače jsou montovány na stroj tak, že je pravítko spojeno s pohyblivou částí a jezdec je upevněn k pevné části stroje. Na Obr. 23 je znázorněna konstrukce lineárního snímače Heidenhain využívající k vyhodnocení polohy fotoelektrický jev.

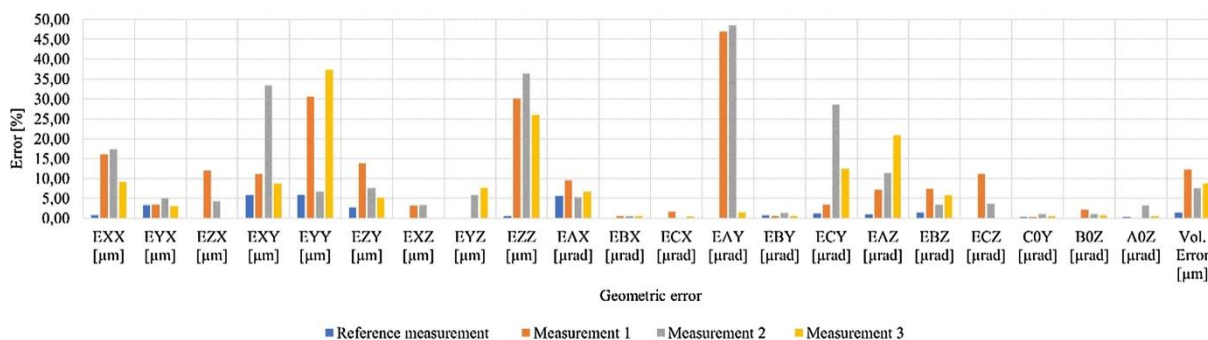


Obr. 23 Konstrukce lineárního snímače Heidenhain [83]

Snímače polohy jsou součástí elektromechanické posuvové soustavy a snímaná poloha slouží jako zpětná vazba, na základě které je řízeno polohování nástroje vůči obrobku. Vlivem změny teploty dochází ke vzniku termoelastické deformace lineárního snímače, která se ve výsledku projevuje chybou přesnosti najetí do polohy. Charakteristika chyby přesnosti najetí do polohy je taková, že chyba polohování roste se vzdáleností od počátku souřadného systému osy. Čím vyšší je teplota tím strmější je pak směrnice této charakteristiky.

Lineární enkodéry jsou vzhledem k podléhajícím termoelastickým deformacím jedním ze signifikantních zdrojů celkové chyby přesnosti najetí do polohy. Vliv změny teploty na chybu přesnosti najetí do polohy ve svém výzkumu popisuje Holub [82]. Na Obr. 24 je znázorněna chyba přesnosti najetí do polohy (EXX, EYY, EZZ), která se pohybuje v rozmezí 10-35% v závislosti na změně teploty naměřené na lineárních snímačích mezi odstaveným

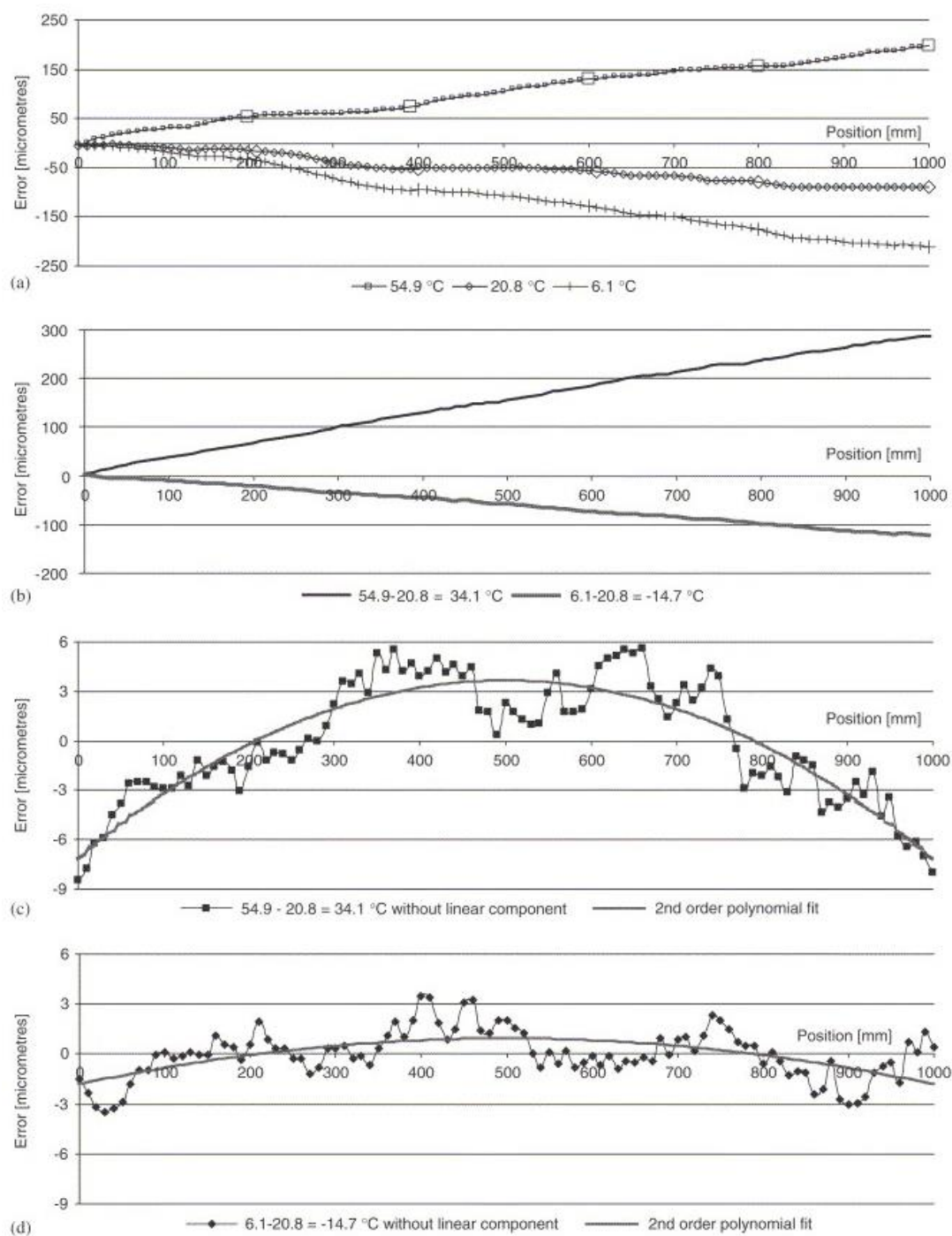
strojem s vypnutými osami a pohony a temperovaným strojem vlivem aktivních pohonů a os. Teplotní rozdíl na lineárních snímačích mezi odstaveným a temperovaným strojem v rámci měření činil zhruba 4°C.



Obr. 24 Procentní změny geometrických chyb vlivem změny teploty [82]

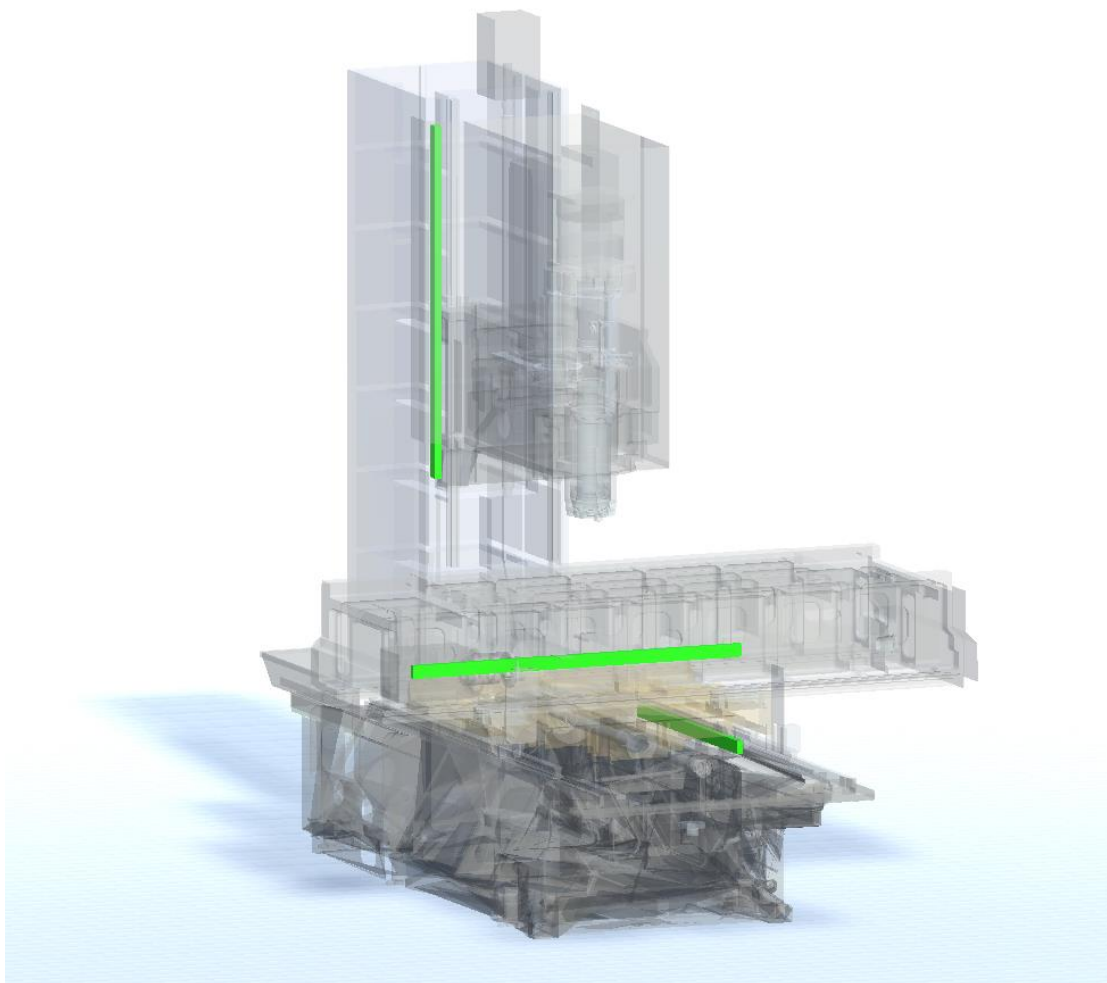
Z pohledu teplotní odezvy je nutné na lineární snímače pohlížet jako na soustavu pouzdro-adhezivum-měřítka. Každý prvek této soustavy má jiný koeficient teplotní roztažnosti. Mezi nejpoužívanější lineární snímače v oblasti odměřování os obráběcích strojů patří zapouzdřené fotoelektrické snímače. Typické materiály využívané při konstrukci těchto snímačů jsou hliník pro výrobu pouzdra a dále sklo, sklokeramika či nerezová ocel používané k výrobě měřítka. Obě části jsou navzájem spojeny pomocí oboustranné lepicí pásky, silikonu, polyuretanu apod. Jak uvedl Alexandre, vlivem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti dochází při změně teplot k vzájemnému působení jednotlivých materiálů vůči sobě navzájem [84]. Materiál s vyšším koeficientem teplotní roztažnosti bude vyvolávat pnutí v materiálu s nižším koeficientem a naopak. Toto chování společně s působením adhezivní vrstvy má za následek vznik nelinearity. Z tohoto důvodu je teplotní kompenzace řešená pomocí lineárních metod nevhodná a je nutno k problému přistupovat jako k řešení nelineární úlohy. Na Obr. 25 je znázorněno nelineární chování přesnosti polohování při změně teploty lineárního snímače. Po vyloučení geometrických nepřesností způsobených montáží pravítka a následnou transformací souřadného systému tak, aby osa x byla shodná s regresní přímkou, je patrná nelinearita soustavy.

Dalším problémem, se kterým je nutné se vypořádat, je koeficient teplotní roztažnosti použitého adheziva. Výrobci lineárních snímačů standardně specifikují materiál pouzdra a měřítka, nicméně neznámou zůstává použité adhezivum, které se podílí na vzniku nelinearity celé soustavy. Volba adheziva ovlivňuje mimo jiné také reálný koeficient teplotní roztažnosti celé soustavy [85]. Analýzou geometrických a teplotních chyb se ve svém výzkumu zabýval také Gurauskis. Ten uvádí, že dynamické teplotní procesy, které vznikají v důsledku použití různých materiálů a samotné geometrii snímače, vyžadují sofistikované a vysoce přesné modely [86]. Ty je ale možné sestavit pouze pokud jsou k dispozici kompletní a detailní informace o modelovaném systému. Takovýto model není univerzální, protože je nutné zohlednit jak použité materiály, tak způsob uchycení pravítka ke stroji.



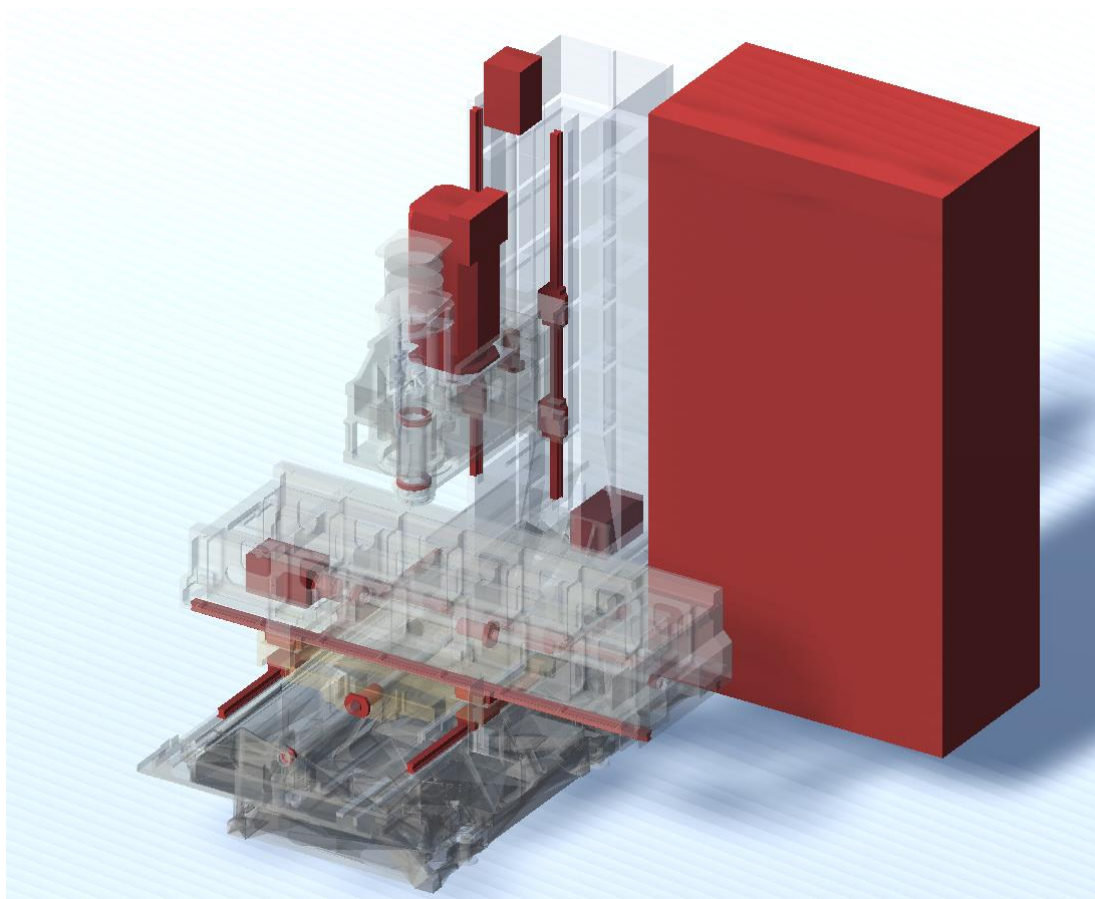
Obr. 25 a) Polohová přesnost lineárního snímače při teplotách 54.9°C, 20.8°C a 6.1°C. b) Přesnost po odečtení hodnot naměřených při 20.8°C z důvodu vyloučení chyby způsobené montáží snímače. c) Přesnost pro 54.9°C-20.8°C po odečtení přímky aproximující daný průběh. d) Přesnost pro 6.1°C-20.8°C po odečtení přímky aproximující daný průběh [84]

Obráběcí centrum MCV754 Quick je vybaveno lineárními enkodéry Heidenhain. Umístění jednotlivých enkodérů v rámci obráběcího centra je patrné na Obr. 26.



Obr. 26 Umístění lineárních enkodérů v rámci obráběcího centra MCV754 Quick

I přesto, že se lineární enkodéry podílí zásadním způsobem na chybě najetí do polohy, nejedná se o jedinou funkční část stroje, která má na tuto chybu vliv. Stejně jako enkodéry podléhá termoelastickým deformacím také stůl, který je zahříván od pohonu osy X a dále přímo od tepla generovaného procesem obrábění. Mezi nejvýznamnější vnitřní teplotní vlivy u MCV754 Quick patří motory jednotlivých strojních os, motor vřetene a teplo od rozvaděče a také teplot vzniklé procesem obrábění. Mezi méně významné, ale stále se podepisující zdroje tepla na přesnost stroje, patří lineární vedení, matice a ložiska. Všechny vnitřní zdroje tepla jsou vyznačeny na Obr. 27.



Obr. 27 Zdroje vnitřního tepla na obráběcím centru MCV754 Quick

Situace je to složitější že kromě výše popsaných vnitřních zdrojů tepla působí na funkční části také nepředvídatelné signifikantní vnější zdroje z okolí, kdy některé z nich nelze dostatečně přesně měřit. Jako příklad je možné uvést průvan kolem stroje, který bude ochlazovat funkční části, nicméně jeho měření je prakticky nemožné.

5.3.7 Syntéza

Okolní vlivy působící na funkční části obráběcího stroje jsou nepředvídatelného charakteru a jejich projevy zejména skrze teplotní vlivy na funkční části obráběcího stroje mají za následek nepřesnosti obrábění. Situace je o to komplikovanější, že s vnějšími zdroji tepla působí i vnitřní zdroje tepla stroje jako je teplo od motoru, teplo od obráběcího procesu, chladicí emulze a podobně. Pro řešení kompenzace takové soustavy se nabízí tři řešení.

První spočívá v konstrukčním zásahu do stroje s cílem izolovat vnitřní zdroje tepla mimo prostor obráběcího centra společně s umístěním celého centra do klimatizované buňky ve které se bude udržovat konstantní teplota. Tímto způsobem je možné kompletně eliminovat vliv vnějších zdrojů tepla a částečně také vnitřní zdroje. Nicméně i tak nelze eliminovat například teplo vznikající během obrábění. Nevýhodou toho řešení je cenová náročnost a problematický zásah do konstrukce již existujícího stroje.

Druhým možným řešením je temperování stroje na stanovenou teplotu pomocí ohřevu či chlazení. Pomocí této metody je možné udržovat jednotlivé funkční části v daném teplotním rozsahu, na kterém je stroj kompenzován pro přesné obrábění. Jedná se nicméně o složité a také finančně nákladné řešení, protože pro udržení požadované teploty je nutné teplotu chladicího média vhodně regulovat.

Posledním řešením zůstává využití přímé či nepřímé teplotní kompenzace stroje. Při porovnání obou metod je přesnější přímá kompenzace, protože jsou kompenzovány naměřené odchylky. Nevýhodou je nemožnost kontinuálního sledování nepřesnosti na stroji, protože je nutné měřit při odstavené výrobě. Oproti tomu nepřímé metody kompenzace je možné využívat kontinuálně během pracovního cyklu stroje, protože odchylky jsou stanoveny nepřímo prostřednictvím závislé veličiny. Značnou nevýhodou je pak přesnost kompenzace, která se odvíjí od použitého matematického modelu soustavy. V případě použité technické soustavy se jedná o komplikovaný model s velkým množstvím neznámých parametrů, jako jsou použité adhezivum v lineárním enkodérech, způsob uchycení měřítka lineárního snímače, celkové chování soustavy stůl-obal enkodéru-měřítka či působení vnějších teplotních vlivů. Z tohoto důvodu je problém těžko popsitelný běžným analytickým způsobem. Zároveň se jedná o komplexní model, který není možné simulovat v reálném čase pomocí numerických metod jako je metoda konečných prvků.

Výsledkem výše uvedeného je, že není možné tradičními metodami zjistit projevy těchto teplotních změn na přesnost výsledného obrobku v reálném čase v průběhu obráběcího procesu. Z těchto důvodů bylo pro kompenzace uvedených jevů rozhodnuto o použití metod strojového učení s cílem minimalizovat chyby obrábění. Jedná se o metody, kde je model vytvářen na základě dat získaných sledováním soustavy. Pro řešení popisovaného problému je zvolena metoda učení s učitelem za použití modelu neuronové sítě.

Použití neuronových sítí s sebou ale přináší několik problémů. Schopnost neuronové sítě predikovat chyby přesnosti najetí do polohy je silně závislá na množině trénovacích dat. Vysokou přesnost predikce lze s velkou pravděpodobností očekávat, pokud vstupní data leží uvnitř intervalu vymezeného trénovací množinou. V opačném případě hrozí, že predikce bude nepřesná. Jedním z faktorů, který má velký vliv na sledovanou chybu, je teplota okolí, jež je ve velké míře ovlivněna venkovní teplotou. Pouze pro teplotu okolí pak platí, že aby množina trénovacích dat pokryla celý interval, musela by obsahovat data minimálně z průběhu celého roku. Teplota okolí není ovšem jediným faktorem podílejícím se na vzniku chyby přesnosti najetí do polohy, proto může být získání takové množiny časově náročnější. Řešením je zavedení průběžné aktualizace vah neuronové sítě za pomoci nově získaných dat. V takovém případě je již vytrénovaná neuronová síť průběžně doučována pomocí nově nasbíraných dat.

Vzhledem k tomu, že je spolehlivost neuronových sítí přímo závislá na kvalitě množiny trénovacích dat a natrénovaná síť je z pohledu vývojáře černá skříňka, vyvstává otázka ohledně bezpečnosti při snaze o automatizaci celého procesu kompenzace stroje. V takovém případě může nastat situace, kdy vlivem špatné predikce neuronové sítě může dojít ke zhoršení přesnosti stroje a tím produkci neshodných kusů, nebo v horším případě k poškození nástroje či přímo stroje. Otázce odpovědnosti za způsobenou škodu umělou inteligencí se podrobně věnuje Štědroň a Kolaříková [87], [88]. Automatizace tohoto procesu tedy není z pohledu bezpečnosti žádoucí. Jako vhodné řešení se jeví o výstupu neuronové sítě informovat obsluhu stroje, která na jeho základě může rozhodnout o zásahu do procesu obrábění. Digitální dvojče by tedy mělo splňovat následující požadavky:

1. Neuronová síť pro predikci chyby přesnosti najetí do polohy.
2. Aktualizace vah neuronové sítě.
3. Potvrzení predikované chyby přesnosti najetí do polohy uživatelem.
4. Sestavení kompenzační tabulky.

5.3.8 Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete

Při návrhu je postupováno pomocí vytvořené metodiky konkrétně části *B. Vnitřní struktura digitálního dvojčete* (Obr. 10), podle které je nutné před samotným návrhem definovat vstupy a výstupy. Úkolem digitálního dvojčete je predikce chyby přesnosti najetí do polohy pomocí neuronové sítě, která bude sloužit ke kompenzaci a tím zpřesnění výroby. Vstupem takové neuronové sítě jsou teploty z obráběcího centra a jeho okolí a výstupem pak vizualizace chyby přesnosti najetí do polohy a kompenzační tabulka. Vizualizace je vyžadována jak vzdáleně, tak přímo v prostoru technické soustavy. Pro získání požadovaných výstupů digitálního dvojčete je nutné vstupní teploty nejprve zpracovat, což vede dle metodiky k vytvoření modulu.

5.3.9 Modul M1

Vytvořen na základě požadavku na zpracování vstupních dat definovaných v kap. 5.3.8. Při návrhu modulu je postupováno pomocí metodiky na vytvoření modulu (Obr. 13). Modul reprezentuje model teplotního chování stroje. Problematiku je možné popsat matematicko-fyzikálními postupy, nicméně nejsou známy všechny parametry modelovaného systému, proto je funkcionality modulu postavena na prvcích umělé inteligence, konkrétně neuronových sítích. Účelem neuronové sítě je predikovat chybu přesnosti najetí do polohy na základě aktuálních teplot.

5.3.9.1 Vazba DD2

Jednosměrná vazba DD2.a mezi modulem M1 a komunikačním rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na přenos dat z interního uložště. Vstupem do modulu jsou teploty naměřené na stroji a v jeho okolí.

5.3.9.2 Vazba DD3

Jednosměrná vazba DD3.a mezi modulem M1 a uživatelským rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na komunikaci s uživatelem. Prostřednictvím této vazby je uživatel informován o aktuálně predikované chybě přesnosti najetí do polohy.

5.3.10 Modul M2

Vytvořen na základě požadavku modulu M1 na aktualizaci vah neuronové sítě. Jedná se o obecný modul pro zpracování dat, jehož funkcí je načtení aktuálního modelu neuronové sítě, aplikace procesu učení za použití množiny trénovacích dat poskytnutých uživatelem a následné uložení nového modelu neuronové sítě a jeho odeslání do modulu M1.

5.3.10.1 Vazba DD4

Jednosměrná vazba DD4.a mezi modulem M1 a M2 vytvořena na základě požadavku modulu M1. Slouží k přenosu aktualizovaného modelu neuronové sítě do modulu M1.

5.3.10.2 Vazba DD3

Jednosměrná vazba DD3.b mezi modulem M2 a uživatelským rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na komunikaci s uživatelem. Prostřednictvím této vazby je do modulu M2 přenášena množina trénovacích dat.

5.3.10.3 Vazba DD2

Obousměrná vazba DD2.b mezi modulem M2 a komunikačním rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na výměnu dat mezi modulem a interním uložštěm. Vstupem do modulu je aktuální model neuronové sítě, výstupem je pak aktualizovaný model neuronové sítě.

5.3.11 Modul M3

Vytvořen v souvislosti s požadavkem modulu M1 na ověření jeho predikce. Jedná se o obecný modul zpracovávající data z modulu M1 a od uživatele. Jeho účelem je informovat uživatele o překročení požadované přesnosti stroje na základě predikovaných chyb přesnosti najetí do polohy z modulu M1 a limitu stanoveného uživatelem a dále umožnit uživateli rozhodnout o správnosti predikovaných chyb. Modul tedy plní funkci rozhodovacího mechanismu na základě uživatelského vstupu.

5.3.11.1 Vazba DD4

Jednosměrná vazba DD4.b mezi moduly M1 a M3 vytvořena na základě požadavku modulu M1. Slouží k přenosu predikované chyby přesnosti najetí do polohy z modulu M1 do modulu M3.

5.3.11.2 Vazba DD3

Obousměrná vazba DD3.c mezi modulem M3 a uživatelským rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na komunikaci s uživatelem. Vstupem do modulu je potvrzení validnosti predikce neuronové sítě, výstupem je pak upozornění uživatele na překročení stanovené přesnosti.

5.3.12 Modul M4

Vytvořen na základě požadavku modulu M3 na zpracování jeho výstupu. Jedná se obecný modul, jehož funkcí je sestavení kompenzační tabulky ke kompenzaci chyb přesnosti najetí do polohy. Tabulka je vytvořena na základě ověřené predikce z modulu M3.

5.3.12.1 Vazba DD4

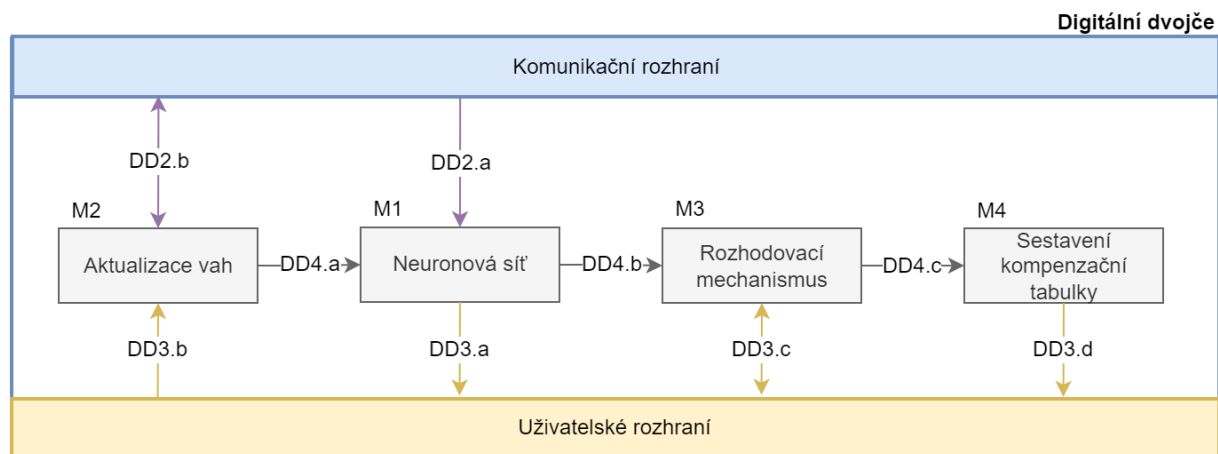
Jednosměrná vazba DD4.c mezi moduly M3 a M4 vytvořena na základě požadavku modulu M3. Slouží k přenosu uživatelem ověřené predikce chyby přesnosti najetí do polohy z modulu M3 do modulu M4.

5.3.12.2 Vazba DD3

Jednosměrná vazba DD3.d mezi modulem M4 a uživatelským rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na komunikaci s uživatelem. Prostřednictvím této vazby je uživateli předávána kompenzační tabulka.

5.3.13 Struktura digitálního dvojčete pro predikce chyby přesnosti najetí do polohy obráběcího centra na základě změny teplot

Na základě aplikace metodiky, části B. *Vnitřní struktura digitálního dvojčete* byly definovány všechny jeho prvky a vazby potřebné k řešení predikce chyby přesnosti najetí do polohy. Výsledné schéma je zobrazeno na Obr. 28.



Obr. 28 Vnitřní struktura digitálního dvojčete pro řešení predikce chyby přesnosti najetí do polohy

5.4 Návrh digitálního dvojčete pro podporu uživatele při obsluze technické soustavy

Se vzrůstající vypslostí výrobních strojů rostou také požadavky na odborné znalosti obsluhy. Takto kvalifikovaných odborníků je ale nedostatek, což vede ke zvyšujícím se finančním nákladům na jejich udržení. Stejně tak zaškolení nové obsluhy je náročné na čas i finance. Jedním z řešení je využití digitálního dvojčete coby prostředku pro podporu operátora technické soustavy při její obsluze.

Řešení této problematiky je možné rozdělit na dva podproblémy, které lze charakterizovat dvěma otázkami:

1. Kdy (na základě čeho) informovat uživatele o potřebě vykonat činnost?
2. Jak předat uživateli informaci o potřebě vykonat činnost a způsobu, jak ji vykonat?

5.4.1 Podpora uživatele při obsluze výrobní buňky UVSSR Cell

Výrobní buňka obsahuje několik prvků, u kterých je možné aplikovat podporu uživatele při obsluze. Pro účely tohoto digitálního dvojčete je vybrána problematika bezpečnostních prvků. K tomu, aby bylo možné výrobní buňku spustit, je nutné, aby byly všechny bezpečnostní prvky ve stavu „zabezpečeno“. Bezpečnostní prvky popsane v kap. 5.1. lze rozdělit na zámky Knox (prvky 6.c, 6.d a 6.e na Obr. 15) a světelné závory Orion (prvky 6.a a 6.b na Obr. 15). Zabezpečení zámků probíhá uzavřením dveří, zajištěním kliky a uzamčením zámku. Zabezpečení závor pak spočívá v jejich aktivaci. Stav jednotlivých prvků je možné vyčítat z řídicího systému výrobní buňky. Cílem je provést uživatele jednotlivými kroky, které vedou k zabezpečení jednotlivých bezpečnostních prvků tak, aby byl uživatel schopen uvést výrobní buňku do stavu, ve kterém je možné její spuštění. Požadavkem na technologii zobrazení je zejména schopnost zobrazit jednotlivé kroky vedoucí k zabezpečení buňky přímo na pracovišti na reálné technické soustavě. Z tohoto pohledu je výběr technologie omezen pouze na technologii rozšířené reality. V rámci analýzy problému je nutné odpovědět na otázky položené výše.

1. Informace s postupem vedoucím k zabezpečení jednotlivých prvků by měla být zobrazena, jakmile dojde k porušení bezpečnosti prvku. Tuto informaci je možné získat z řídicího systému výrobní buňky. Současně je nutné myslet na přehlednost zobrazení. Z tohoto pohledu je vhodné postup vizualizovat pouze v případě, kdy se

uživatel nachází v blízkosti daného prvku. Postup pro zajištění prvku je tedy zobrazen pouze za předpokladu, že došlo u prvku k porušení bezpečnosti a zároveň pokud se uživatel nachází poblíž tohoto prvku.

2. Požadavkem je předání informací uživateli co nejnázorněji. Nejlepší způsob pro dosažení této podmínky je vizualizovat uživateli jednotlivé kroky vedoucí k zabezpečení prvků pomocí animací znázorňujících jednotlivé kroky na reálné části technické soustavy skrze rozšířenou realitu.

5.4.2 Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete pro podporu uživatele při obsluze technické soustavy

Vstupem do digitálního dvojčete jsou stavy bezpečnostních prvků vyčítané z řídicího systému technické soustavy a dále poloha uživatele vůči technické soustavě. Výstupem digitálního dvojčete je pak vizualizace jednotlivých kroků, které je nutné vykonat pro uvedení technické soustavy do zabezpečeného stavu.

5.4.3 Modul M5

Vytvořen na základě požadavku na zpracování vstupních dat definovaných v kap. 5.4.2. Při návrhu modulu je postupováno pomocí metodiky na vytvoření modulu (Obr. 13). Jedná se o obecný modul pro zpracování dat, jehož funkcí je rozhodovat o tom, které kroky se mají uživateli zobrazovat.

5.4.3.1 Vazba DD2

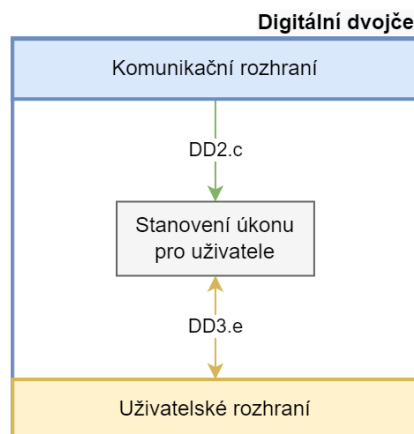
Jednosměrná vazba DD2.c mezi modulem M5 a komunikačním rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na přenos dat z řídicího systému technické soustavy. Vstupem do modulu jsou stavy bezpečnostních prvků.

5.4.3.2 Vazba DD3

Obousměrná vazba DD3.e mezi modulem M5 a uživatelským rozhraním vytvořená na základě požadavku modulu na komunikaci s uživatelem. Vstupem do modulu je poloha uživatele v prostoru vůči reálné technické soustavě a výstupem je pak vizualizace posloupnosti kroků nutných k vykonání pro zabezpečení daného bezpečnostního prvku.

5.4.4 Struktura digitálního dvojčete pro podporu uživatele při obsluze technické soustavy

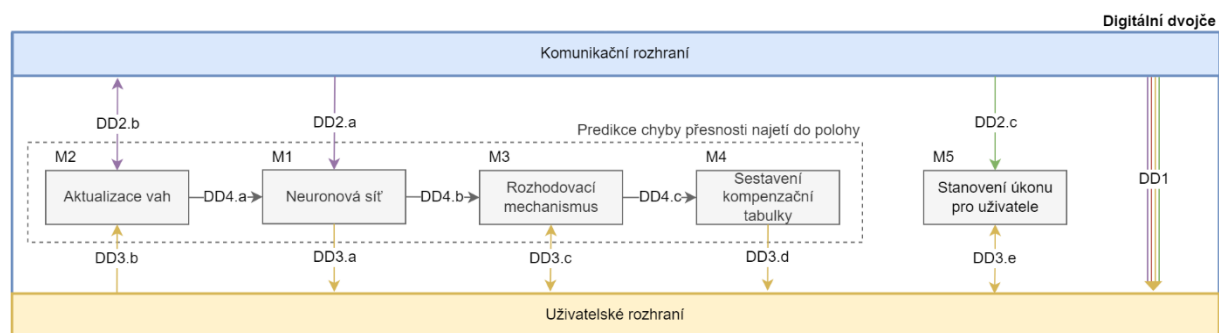
Na základě aplikace metodiky, části B. *Vnitřní struktura digitálního dvojčete* byly definovány všechny jeho prvky a vazby potřebné k řešení predikce chyby přesnosti najetí do polohy. Výsledné schéma je zobrazeno na Obr. 29.



Obr. 29 Vnitřní struktura digitálního dvojčete pro podporu uživatele při obsluze technické soustavy

5.5 Digitální dvojče výrobní buňky UVSSR Cell

V kapitolách 5.2, 5.3 a 5.4 byly navrženy dílčí struktury digitálních dvojčat na základě metodiky, části B. Vnitřní struktura digitálního dvojčete pro problematiku. Tyto dílčí součásti lze sloučit do jednoho celku za vzniku digitálního dvojčete výrobní buňky UVSSR Cell. Kompletní struktura je zobrazena na Obr. 30.



Obr. 30 Kompletní struktura digitálního dvojčete výrobní buňky UVSSR Cell

5.6 Uživatel

Technická soustava poskytuje všechna potřebná data, proto není nutné její doplnění podle metodiky, části C. Doplnění technické soustavy o chybějící zdroje dat a je možné přímo definovat vazby uživatele podle metodiky v části D. Uživatel.

5.6.1 Vazba V7

Uživatel plní funkci operátora technické soustavy, to zahrnuje interakci jak se samotnou technickou soustavou, tak s jejími jednotlivými prvky. Na základě toho je možné definovat následující vazby:

- V7.a – obousměrná vazba s obráběcím centrem MCV754 Quick.
- V7.b – jednosměrná vazba s bezpečnostními prvky.
- V7.c – obousměrná vazba s robotem ABB IRB4400.
- V7.d – obousměrná vazba s uživatelským rozhraním technické soustavy.

5.6.2 Vazba V2

Struktura digitálního dvojčete obsahuje uživatelské rozhraní. Na základě vnitřních vazeb digitálního dvojčete DD3 je možné určit že vazba V2 bude obousměrná.

5.7 Propojení technické soustavy a digitálního dvojčete

Propojení těchto dvou prvků v kyber-fyzikálním systému je možné určit pomocí metodiky, konkrétně části *E. Vazba mezi technickou soustavou a digitálním dvojčetem*.

5.7.1 Vazba V1

Digitální dvojče implementuje vazbu DD1. Tato vazba slouží mimo jiné k přenosu dat z technické soustavy k uživateli. Konkrétně se jedná o data z obráběcího centra, řídicího systému technické soustavy a robotu. Proto je možné definovat následující vazby:

- V1.a – jednosměrná vazba pro přenos dat z obráběcího centra MCV754 Quick do digitálního dvojčete.
- V1.b – jednosměrná vazba pro přenos dat z řídicího systému technické soustavy do digitálního dvojčete.
- V1.c – jednosměrná vazba pro přenos dat z robotu ABB IRB4400 do digitálního dvojčete.

Digitální dvojče obsahuje také vazby DD2, nicméně nejsou využívány pro přenos dat s technickou soustavou.

5.8 Uložiště

Implementace uložště a jeho vazby s prvky kyber-fyzikálního systému jsou popsány pomocí metodiky v části *F. Definice uložště a jeho vazeb*. Digitální dvojče vyžaduje na základě definovaných vnitřních vazeb DD1 a DD2 komunikaci s uložštěm za účelem čtení průběhu teplot na obráběcím centru a jeho okolí a verzování modelu neuronové sítě. V případě kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell je využita vlastní datová infrastruktura, tudíž se jedná o interní uložště.

5.8.1 Vazba V4

Protože interní uložště slouží mimo jiné také pro ukládání dat z externí senzoriky pro měření teploty, je nutné implementovat vazbu V4 mezi interním uložštěm a technickou soustavou, konkrétně prvkem pro sběr dat externí senzoriky. Jedná se o jednosměrnou vazbu do uložště.

5.8.2 Vazba V3

Komunikace s digitálním dvojčetem je založena na čtení teplot a načítání a ukládání modelů neuronové sítě. Z tohoto důvodu je nutné implementovat obousměrnou vazbu V3 mezi interním uložštěm a komunikačním rozhraním digitálního dvojčete.

5.9 Okolí

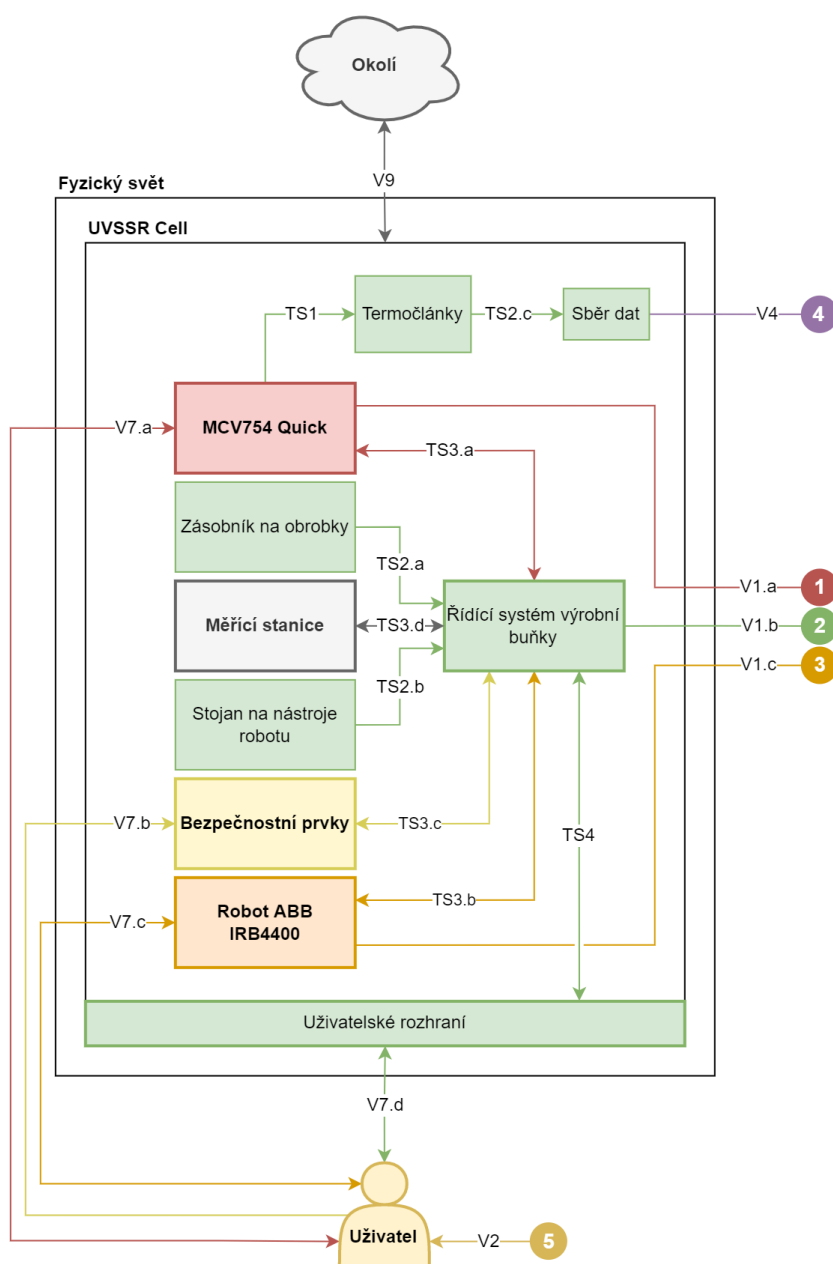
Na technickou soustavu ve fyzickém světě působí různé vlivy okolí, které se projevují zejména na přesnosti a kvalitě obrábění obráběcího centra MCV754 Quick.

5.9.1 Vazba V9

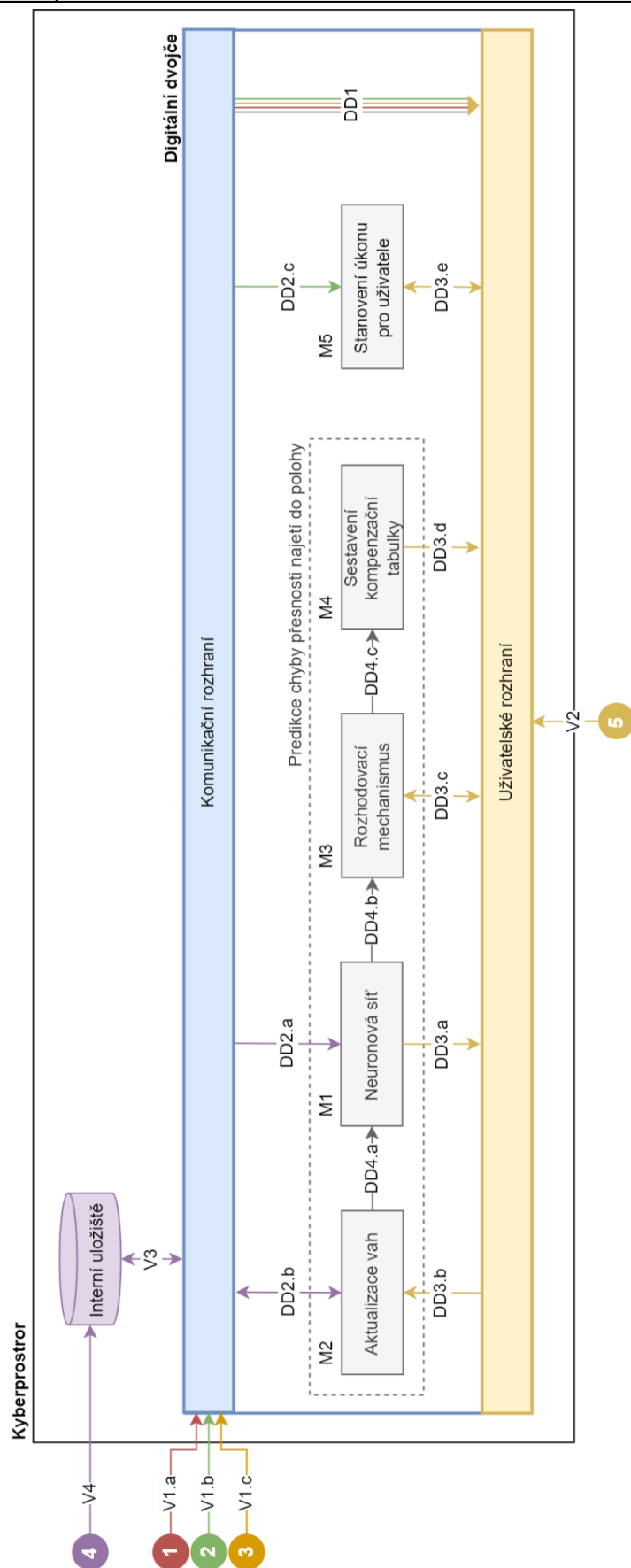
V rámci řešené problematiky je omezen vliv prostředí pouze na působení tepla na technickou soustavu, konkrétně na obráběcí centrum MCV754 Quick, které se vlivem termoelastických deformací projevuje na přesnosti obrábění. Působení okolí na obráběcí centrum je reprezentováno vazbou V9.

5.10 Struktura kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell

Výsledkem aplikace navržené metodiky je kompletní popis kyber-fyzikálního systému pro navrhovanou technickou soustavu. Tento popis definuje všechny prvky a vazby potřebné k implementaci digitálního dvojčete a jeho propojení s technickou soustavou. Na základě popisu je možné vytvořit schéma kyber-fyzikálního systému. Část fyzického světa je znázorněna na Obr. 31, část kyberprostoru na Obr. 32.



Obr. 31 Schéma kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell – Část A „Fyzický svět“



Obr. 32 Schéma kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell – Část B „Kyberprostor“

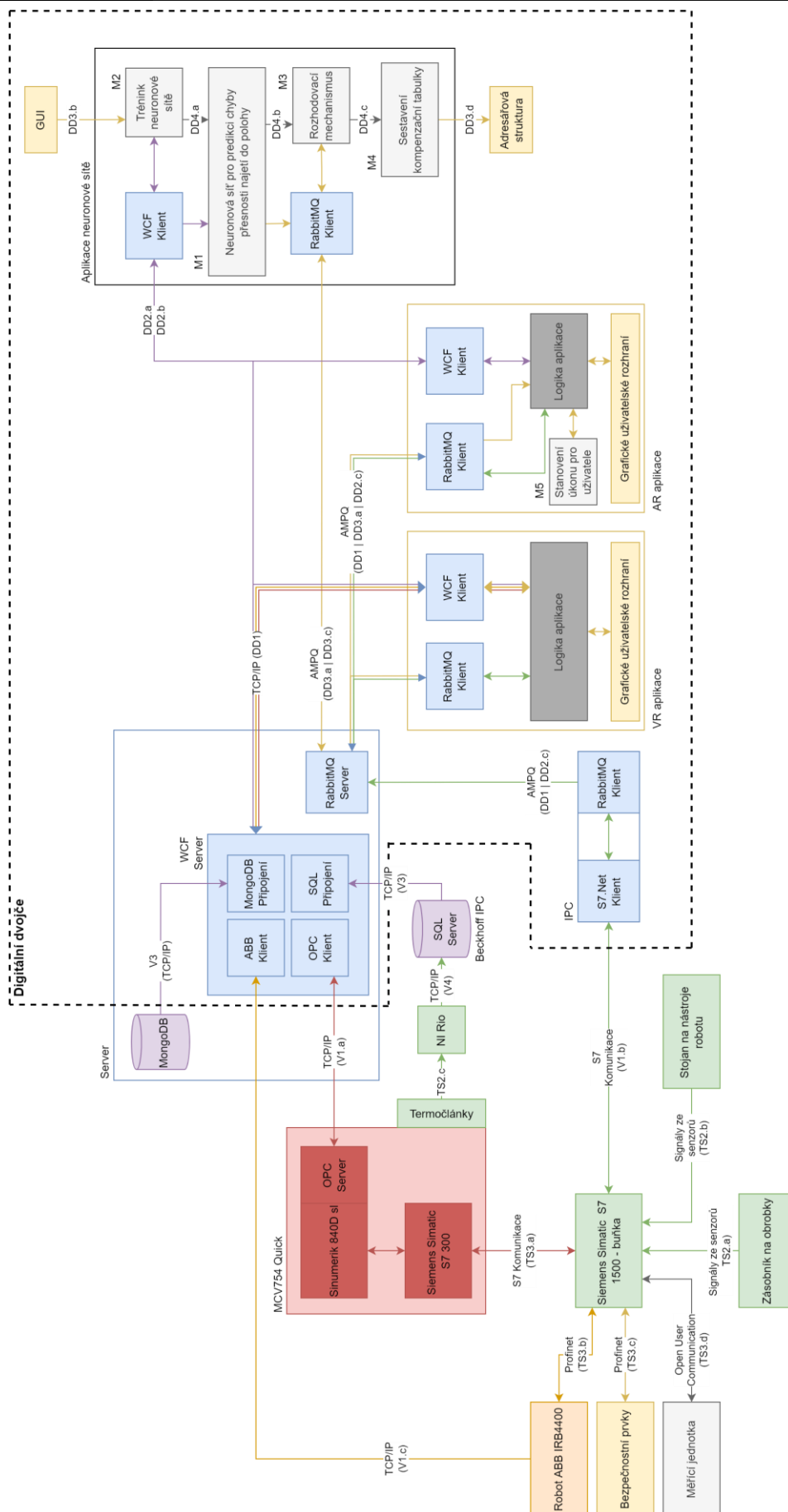
6. IMPLEMENTACE DIGITÁLNÍHO DVOJČETE VÝROBNÍ BUŇKY UVSSR CELL

V této kapitole je implementováno digitální dvojče výrobní buňky UVSSR Cell na základě návrhu z kap. 5. Vzhledem ke komplexnosti celého řešení nejsou popsány implementace jednotlivých částí kyber-fyzikálního systému zcela do detailu, ale je nastíněno pouze technologické řešení problému. Podrobný popis implementace není ani cílem této dizertační práce. Účelem následující kapitoly je spíše demonstrovat funkčnost sestavené metodiky z kap. 4.4 na reálném příkladu. Technologické schéma výrobní buňky UVSSR Cell znázorňující implementaci navrženého kyber-fyzikálního systému podle vytvořené metodiky je znázorněno na Obr. 33. Jedná se o schéma popisující jednotlivé technologie použité pro sběr dat ze zařízení, distribuci dat v rámci kyber-fyzikálního systému a použité protokoly. Pro snadnější orientaci mezi tímto technologickým schématem a výstupem metodiky (Obr. 31 a Obr. 32) je zachováno stejné barevné značení a u jednotlivých vazeb je kromě použitých technologií také uvedeno, o kterou vazbu se v rámci navrženého kyber-fyzikálního systému jedná.

6.1 Technická soustava

Digitální dvojče bylo vyvinuto pro výrobní buňku, nacházející se na základě popsaného životního cyklu v kap. 4.2 ve fázi zralosti. To znamená, že se jedná o plně implementovanou výrobní buňku. Při zahájení návrhu digitálního dvojčete tedy byly jednotlivé prvky včetně osazené senzoriky pro sběr teplot z obráběcího centra MCV754 Quick a jeho okolí implementovány a plně v provozu.

Z hlediska implementace digitálního dvojčete a jeho propojení s technickou soustavou je možné za klíčové označit čtyři prvky technické soustavy, kterými jsou OPC server, řídicí systém robotu ABB IRB4400, řídicí systém buňky a IPC Bechhoff. Tyto prvky umožňují implementovat rozhraní pro komunikaci a výměnu dat s prvky vně technické soustavy.



Obr. 33 Technologické schéma kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell

6.2 Digitální dvojče

Realizace digitálního dvojčete obnáší implementaci jeho celé vnitřní struktury (Obr. 33) tzn. komunikačního rozhraní, uživatelského rozhraní a v neposlední řadě všech jeho modulů. Následující kapitola si klade za cíl tuto implementaci popsat.

6.2.1 Komunikační rozhraní

Jedná se o důležitý prvek zajišťující konektivitu všech vnitřních prvků digitálního dvojčete a zároveň obsahující technologie pro komunikaci s technickou soustavou a interním uložištěm. Pro implementaci komunikačního rozhraní byly zvoleny technologie Windows Communication Foundation (WCF) a RabbitMQ. Zatímco technologie WCF je založena na principu Server-klient, technologie RabbitMQ je založena na principu producer-consumer. Pro každou technologii byl nakonfigurován server.

V rámci realizace WCF serveru bylo naprogramováno API popisující metody, pomocí nichž se mohou WCF klienti dotazovat serveru na data. V těchto metodách jsou využity čtyři služby, které se nachází uvnitř WCF serveru sloužící pro komunikaci s technickou soustavou, popřípadě databází. Tyto služby jsou popsány v kap. 6.3.

Zatímco pro vyčítání dat z technické soustavy byl realizován WCF server, pro zajištění komunikace mezi jednotlivými prvky digitálního dvojčete byl implementován RabbitMQ server. Na základě něj jsou vytvořeny fronty, díky kterým si mohou jednotliví klienti přeposílat požadovaná data.

Všechny prvky, které potřebují komunikovat se serverem za účelem výměny dat, nebo mezi sebou pak musí implementovat WCF a RabbitMQ klienta. Na Obr. 33 je možné vidět tyto klienty implementované ve VR a AR aplikaci, aplikaci neuronové sítě a v rámci IPC, kde klient slouží k odesílání dat z řídicího systému výrobní buňky.

6.2.2 Uživatelské rozhraní

V kap. 5 byly definovány tři oblasti, pro které bylo digitální dvojče výrobní buňky navrženo. Pro monitorování stavu technické soustavy a pro zobrazení predikovaných chyb přesnosti najetí do polohy je požadováno zobrazování příslušných dat jak vzdáleně, tak v rámci technické soustavy přímo na pracovišti. Problematika podpory uživatele při obsluze technické soustavy je pak z definice problému omezena pouze na vizualizaci v rámci pracoviště.

Vzhledem k tomu, že je plánováno zobrazovat prostorová data jako jsou například polohy os jednotlivých strojů, polohy teplotních snímačů v rámci obráběcího centra nebo vektorové pole chyb přesnosti najetí do polohy, vzniká požadavek na 3D zobrazení těchto dat. Pro výše uvedené požadavky byla jako nejvhodnější technologie zvolena virtuální realita pro vzdálené monitorování a rozšířená realita pro vizualizaci dat přímo na pracovišti.

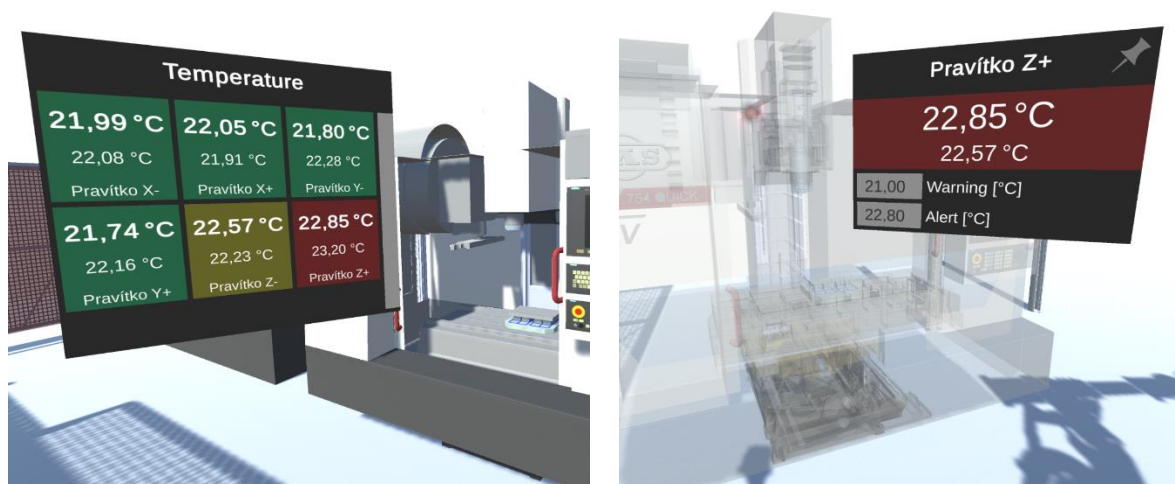
V rámci uživatelského rozhraní tedy byly vytvořeny dvě aplikace. Aplikace virtuální reality je založená na technologii Oculus Quest 2 s implementací funkcionality monitorování stavu a vizualizace predikovaných chyb přesnosti najetí do polohy. Aplikace rozšířené reality je pak vytvořena pro brýle Microsoft HoloLens 2 a slouží pro monitorování stavu, vizualizaci predikce chyby přesnosti najetí do polohy a podporu uživatele při obsluze technické soustavy. Obě aplikace jsou vytvořeny ve vývojovém prostředí Unity. Ačkoliv se front-end obou aplikací díky použitým technologiím značně liší, back-end je téměř totožný. V obou případech aplikace obsahují WCF a RabbitMQ klienty pro připojení k serveru za účelem výměny dat. Popis vývoje obou aplikací je nad rámec této dizertační práce. V rámci jejich implementace ale bylo nutné

vytvořit prvky virtuálního prostředí, grafické uživatelské rozhraní (menu, informační návěští atd.), logiku aplikace a vyřešit distribuci dat.

V následujících podkapitolách jsou prezentovány metody vizualizace dat pro monitorování stavu, predikci chyby přesnosti najetí do polohy a podporu uživatele při obsluze technické soustavy.

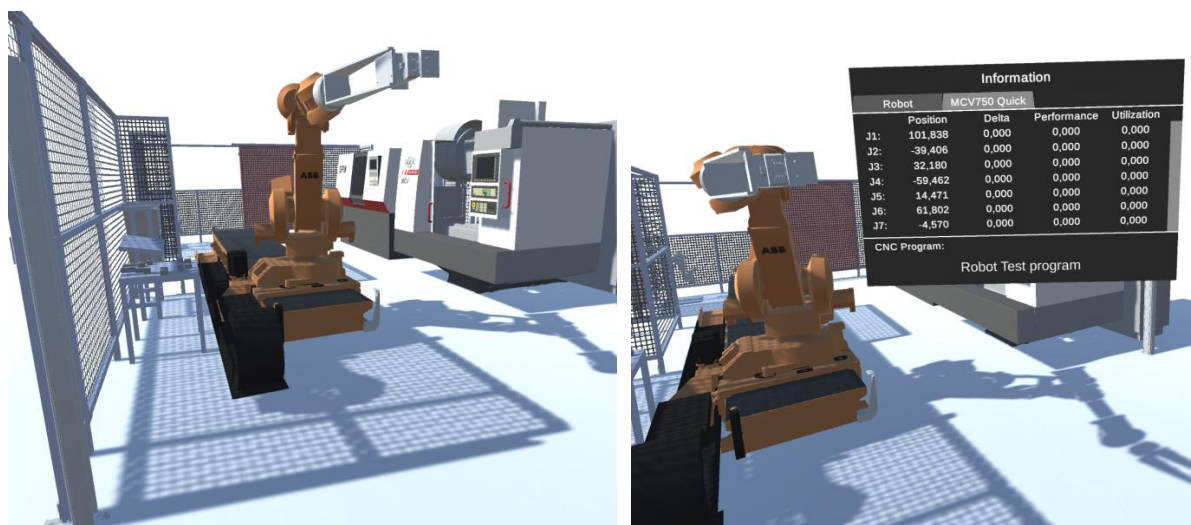
6.2.2.1 Monitorování stavu

Aktuální teploty jsou zobrazeny v celkovém přehledu. Každá teplota je reprezentována dlaždicí s aktuální hodnotou a popisem. Barva dlaždice je závislá na aktuální hodnotě teploty a na nastavení limitů pro varování a výstrahu. V případě překročení limitu varování přechází barva ze zelené na žlutou a v případě dalšího růstu teploty a překročení limitu výstrahy na červenou. Pro každou teplotu je dále možné zobrazit fyzické umístění snímače a nastavit individuální limity varování a výstrahy. Popsaný způsob vizualizace je zobrazen na Obr. 34.



Obr. 34 Vizualizace teplot v prostředí virtuální reality

Aktuální hodnoty natočení, popřípadě posuvu jednotlivých strojních os jsou uživateli vizualizovány dvěma způsoby. Prvním způsobem je pozicování 3D modelu stroje na základě vyčtených hodnot. To znamená, že je uživatel schopný v reálném čase sledovat pohyby reálného stroje pomocí 3D modelu ve virtuální realitě. Druhým způsobem je zobrazení přesné hodnoty poloh či natočení jednotlivých os v tabulkovém přehledu (Obr. 35).



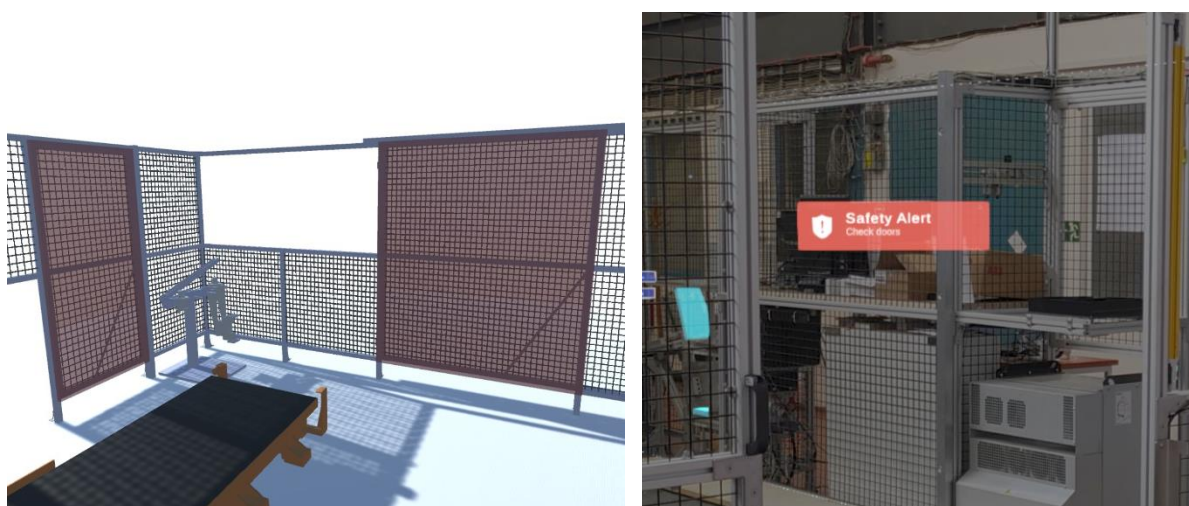
Obr. 35 Vizualizace natočení a poloh strojních os strojů v rámci výrobní buňky

Stavy robotu a obráběcího centra jsou vizualizovány pomocí přehledové tabulky a pomocí piktogramů umístěných u příslušných prvků. Příkladem takových piktogramů jsou stavy dveří (otevřeno/zavřeno) a stav magnetického upínače znázorněný na Obr. 36.



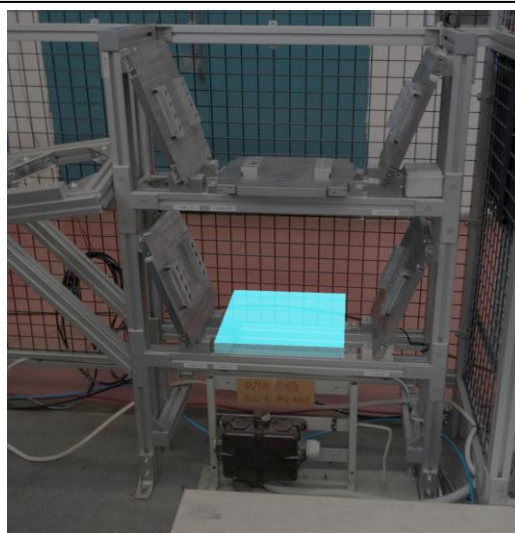
Obr. 36 Vizualizace stavů robotu a obráběcího centra v rozšířené realitě

V případě, že je porušena bezpečnost, je signalizace bezpečnostních prvků ve virtuální realitě řešena vyznačením konkrétního bezpečnostního prvku červenou barvou. V rozšířené realitě je uživatel informován prostřednictvím informačního návěstí v místě bezpečnostního prvku (Obr. 37).



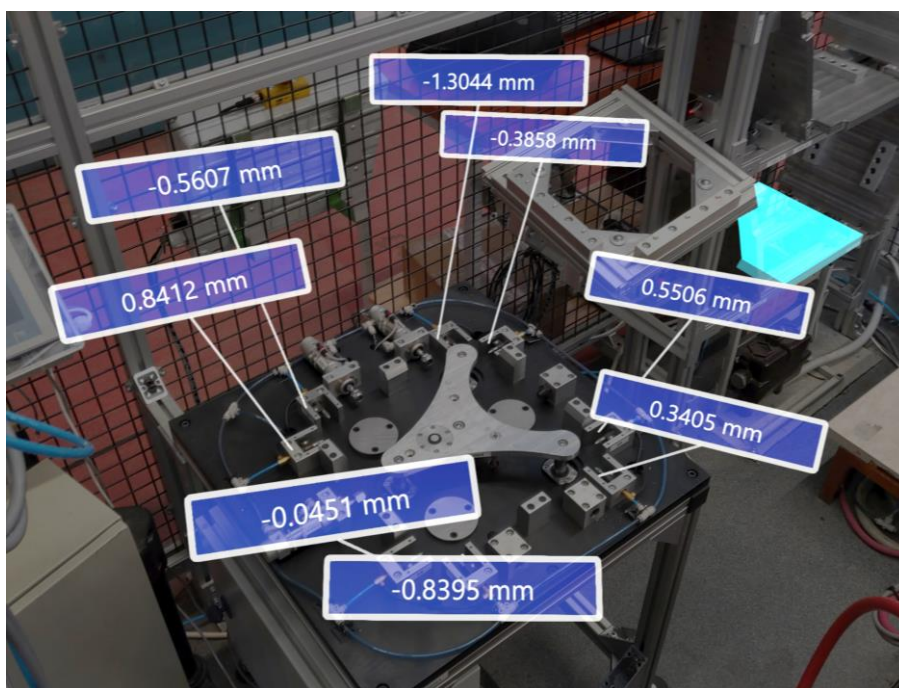
Obr. 37 Vizualizace bezpečnostních prvků ve virtuální a rozšířené realitě

Z pohledu zásobníku obrobků a stojanu na nástroje jsou v případě virtuální reality zobrazeny jen ty obrobky či nástroje, které se zrovna nachází v zásobníku či stojanu. Pro rozšířenou realitu byl naopak zvolen obrácený přístup, tzn. součást je zobrazena pouze v případě, že ve skutečnosti chybí (Obr. 38).



Obr. 38 Srovnání vizualizace obsazenosti zásobníku na obrobky mezi technologií virtuální a rozšířené reality

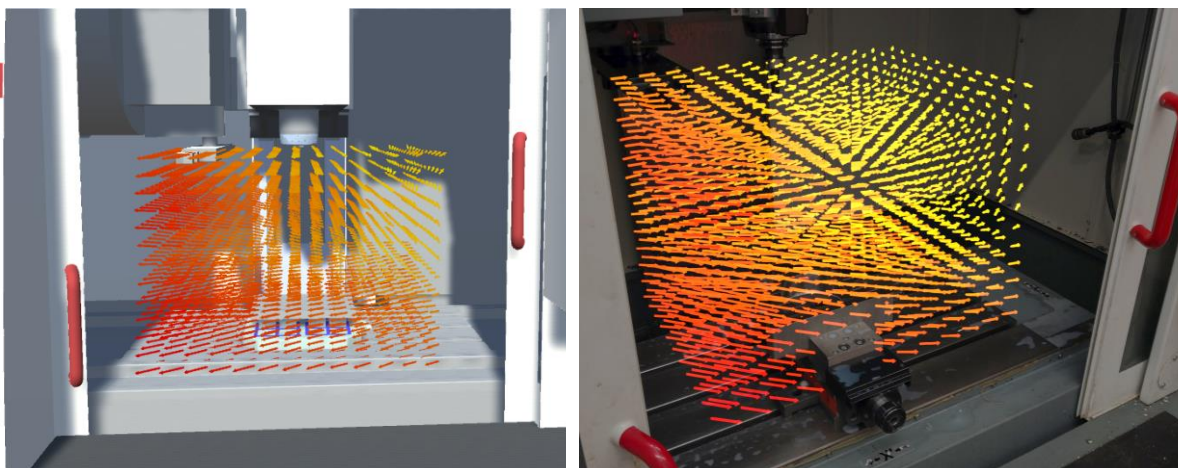
Naměřené hodnoty z měřicí stanice jsou vizualizovány pomocí návěstí umístěných nad senzory (Obr. 39). Jednotlivá návěstí se přizpůsobují poloze uživatele v prostoru tak, aby byla naměřená data pro uživatele vždy viditelná.



Obr. 39 Vizualizace naměřených hodnot pomocí měřicí stanice v rozšířené realitě

6.2.2.2 Predikce chyby přesnosti najetí do polohy

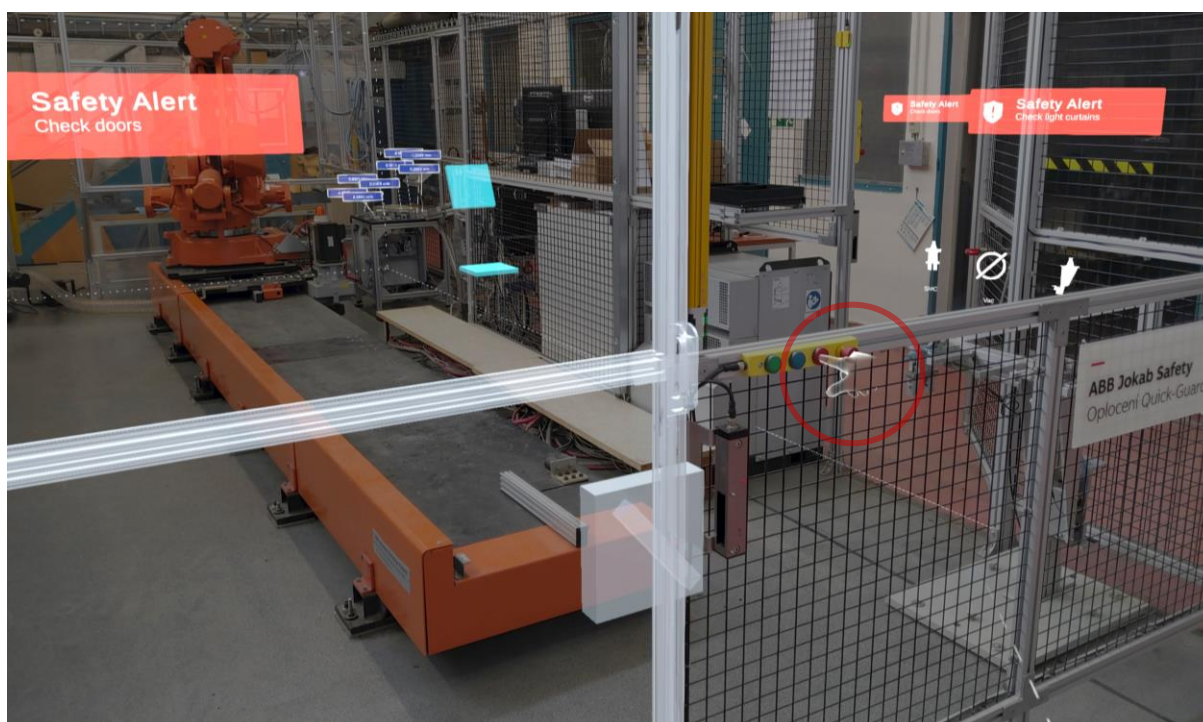
Chyby přesnosti najetí do polohy získávané z neuronové sítě jsou vizualizovány pomocí vektorového pole v obráběcím prostoru stroje. Každý vektor znázorňuje směr a velikost predikované chyby. Na základě velikosti chyby je pak každému vektoru přiřazena barva na stupnici od žluté (nejmenší odchylka) po červenou (největší odchylka).



Obr. 40 Vizualizace vektorového pole chyb přesnosti najetí do polohy ve virtuální a rozšířené realitě

6.2.2.3 Podpora uživatele při obsluze

Při porušení jakéhokoli bezpečnostního prvku je o této skutečnosti uživatel neprodleně informován pomocí informačního návěstí v místě bezpečnostního prvku. Poté, co se uživatel přesune fyzicky v rámci výrobní buňky do prostoru nezabezpečeného prvku, je uživateli přímo na technické soustavě znázorněn postup, jakým je možné prvek zabezpečit. Jedná se o animaci, která je uživateli přehrávána tak dlouho, dokud prvek nezabezpečí nebo neopustí jeho prostor. Na obrázku Obr. 41 je zobrazen průběh animace pro zajištění bezpečnostního prvku.



Obr. 41 Ukázka části animace ukazující uživateli postup uzamčení zámku dveří. Animace se skládá z pohybu dveří, zajištění kliky a navedení uživatele ke zmáčknutí tlačítka pro zamčení zámku

6.2.3 Modul M1

Neuronová síť je implementována pomocí knihovny pro strojové učení a umělou inteligenci TensorFlow. Jedná se o rekurentní neuronovou síť typu LSTM predikující chyby přesnosti

najetí do polohy. Vstupem do neuronové sítě jsou teploty z obráběcího centra MCV754 Quick a jeho okolí. Výstupem je pak vektor chyb přesnosti najetí do polohy. Modul je distribuován pomocí mikroslužby v napsané v jazyce Python. Se sousedícími moduly pak komunikuje pomocí HTTP API. Přístup k teplotám obráběcího centra má neuronová síť skrze WCF klienta. Výsledky neuronové sítě jsou přeposlány dále frontou pomocí RabbitMQ klienta.

6.2.4 Modul M2

Modul představující mikroslužbu v jazyce Python sloužící k přeučení neuronové sítě. K tomu využívá stejně jako v předchozím případě knihovnu TensorFlow. Vstupy do modulu jsou množina trénovacích dat z uživatelského rozhraní tvořeného webovou aplikací, která je přenášena pomocí HTTP API a model neuronové sítě z databáze MongoDB přístupný pomocí WCF klienta. Výstupem je pak model neuronové sítě s aktualizovanými vahami, který je distribuován do neuronové sítě (modul M1) pomocí HTTP API a zároveň je uložen do MongoDB databáze.

6.2.5 Modul M3

Modul implementovaný jako mikroslužba v jazyce Python, kontrolující překročení stanovené meze chyby přesnosti najetí do polohy, získané z neuronové sítě pomocí HTTP API požadavku. Komunikace s uživatelem za účelem potvrzení je zprostředkována pomocí front na základě RabbitMQ klienta. Výstup modulu je pak opět zprostředkován pomocí HTTP API požadavku.

6.2.6 Modul M4

Realizovaný pomocí mikroslužby v jazyce Python. Skript obsahuje algoritmus pro sestavení kompenzační tabulky na základě predikovaných chyb přesnosti najetí do polohy. Data jsou získána z modulu M3 na základě HTTP API požadavku. Sestavená tabulka je pak jako textový soubor uložena v rámci lokálního úložiště.

6.2.7 Modul M5

Součástí aplikace pro rozšířenou realitu. Jedná se o soubor metod napsaných v jazyce C#, jehož úkolem je monitorování stavu bezpečnostních prvků a polohy uživatele vůči nim. Pokud některý z prvků není zabezpečený a současně se uživatel nachází uvnitř definovaného prostoru kolem tohoto prvku, je předán aplikační logice požadavek na spuštění animace s postupem zabezpečení daného prvku.

6.2.8 Vazby

Tato kapitola poskytuje ucelený přehled komunikačních protokolů, pomocí kterých jsou implementovány jednotlivé vazby uvnitř digitálního dvojčete.

- DD1 – přenos dat je realizován na základě protokolů TCP/IP a AMPQ;
- DD2 – přenos dat je realizován na základě protokolu TCP/IP;
- DD3.a/c – přenos dat je realizován pomocí protokolu AMPQ;
- DD3.b – přenos dat na základě aplikace HTTP API;
- DD3.d – zápis do souboru;
- DD4 – přenos dat na základě aplikace HTTP API.

6.3 Propojení technické soustavy a digitálního dvojčete

Na základě aplikace sestavené metodiky byly v návrhu digitálního dvojčete definovány tři prvky technické soustavy tvořící vazbu V1 s digitálním dvojčetem. Jedná se o obráběcí centrum MCV754 Quick, robot ABB IRB 4400 a řídicí systémem buňky. Za účelem propojení těchto prvků s komunikačním rozhraním digitálního dvojčete byly vytvořeny následující tři služby:

- OPC klient – C# služba umožňující připojení na OPC server obráběcího stroje MCV754 Quick, skrze který je možné vyčítat data z řídicího systému.
- ABB klient – C# služba využívající vývojové nástroje od firmy ABB díky kterým se je možné připojit k řídicímu systému robotu za účelem vyčítání dat.
- S7.Net klient – C# služba využívající knihovnu S7.Net. Tato knihovna poskytuje metody k navázání a udržení S7 komunikace s PLC Siemens, které tvoří řídicí systém výrobní buňky. Služba slouží k vyčítání dat z řídicího systému výrobní buňky.

Služby OPC a ABB klient jsou součástí WCF serveru, který je využívá ke komunikaci s výše uvedenými prvky technické soustavy. Služba S7.Net klient pak vyčítaná data z řídicího systému distribuuje prostřednictvím RabbitMQ klienta přes vytvořené fronty.

6.3.1 Vazba V1

Vzhledem k tomu, že všechny služby využívají rodinu protokolů TCP/IP, tak také všechny vazby tzv. V1.a, V1.b, V1.c využívají k přenosu dat protokol TCP/IP.

6.4 Uložiště

Kyber-fyzikální systém obsahuje interní uložisko tvořené dvěma databázovými systémy. Prvním systémem je SQL server, sloužící pro ukládání teplot získávaných pomocí externí senzoriky a sběru dat. Druhým databázovým systémem je pak MongoDB, který slouží k „verzování“ modelů neuronové které jsou vytvářeny pomocí modulu M2.

Na základě návrhu digitálního dvojčete je nutné implementovat vazbu V3. Toho je docíleno vytvořením dvou následujících služeb:

- SQL připojení – C# služba pro připojení a práci s daty z SQL databáze.
- MongoDB připojení – C# služba využívající knihovnu MongoDB.driver pro připojení a práci s daty z MongoDB databáze.

Tyto služby jsou součástí WCF serveru, který je využívá ke komunikaci s výše uvedenými prvky technické soustavy.

6.4.1 Vazba V3

Vzhledem k tomu že komunikace s databázovými systémy je založena na rodině protokolů TCP/IP, tak vazba V3 používá k přenosu dat právě tento protokol.

7. PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE

7.1 Pedagogický přínos práce

Technologie digitálních dvojčat, spolu s implementací virtuální a rozšířené reality, je dlouhodobě a pravidelně využívána pro popularizaci výuky realizované nejen v rámci aktivit Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, ale také aktivit pořádaných fakultou strojního inženýrství VUT v Brně (Noc vědců, veletrh Gaudeamus, den otevřených dveří FSI).

Získané znalosti a postupy jsou předávány studentům ve výuce předmětů GVR – Virtuální a rozšířená realita, FVY – Výrobní stroje a zařízení, 6SR – Stavba výrobních strojů a robotů a GV0-A Manufacturing Machines za účelem seznámení studentů s technologiemi Průmyslu 4.0. V rámci inovace výuky byl autor řešitelem projektu FV 17-28 zaměřeného na implementaci virtuální reality při návrhu výrobních strojů. Výstupy dizertační práce jsou také prezentovány doc. Ing., Dipl.-Ing. Michalem Holubem, Ph.D. v rámci jeho přednášek na STU MTF v Trnavě, TU Chemnitz a TU Wien, zaměřených na geometrickou a volumetrickou přesnost CNC obráběcích strojů.

7.2 Vědecký přínos práce

Vědecký přínos předložené práce spočívá ve standardizaci problematiky digitálního dvojčete, na jejímž základě je sestavena a ověřena metodika návrhu digitálního dvojčete. Jedná se o obecnou metodiku pro stanovení struktury digitálního dvojčete, tzn. definici všech jeho prvků a vazeb, které je nutné při vytváření digitálního dvojčete implementovat. Taková metodika nebyla doposud popsána.

Výsledky předložené práce jsou publikovány v odborných časopisech a prezentovány na odborných vědeckých konferencích (ISPR, Mechatronika, ESREL). Většina publikací je indexována v databázích SCOPUS a WOS.

Autor byl řešitelem projektu FAST/FSI-J-17-4566 Implementace virtuální reality v zobrazování výsledků měření, a dále spoluřešitelem projektů FSI-S-17-4477 Zvyšování technické vyspělosti výrobních strojů a zařízení. Kromě toho je v současné době spoluřešitelem projektů OP VVV DMS SVTPS Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství, TN01000071/02 Národní centrum kompetence Mechatroniky a chytrých technologií pro strojírenství – MESTEC, FW01010012 Výzkum a vývoj v oblasti zvyšování kvality výroby velkých obrobků – přesné a opakovatelné ustavení a měření obrobků a FSI-S-20-6335 Technologie pro digitální dvojče výrobních systémů. Na základě výstupu těchto projektů je také spoluautorem ověřené technologie a funkčního vzorku.

7.3 Praktický přínos práce

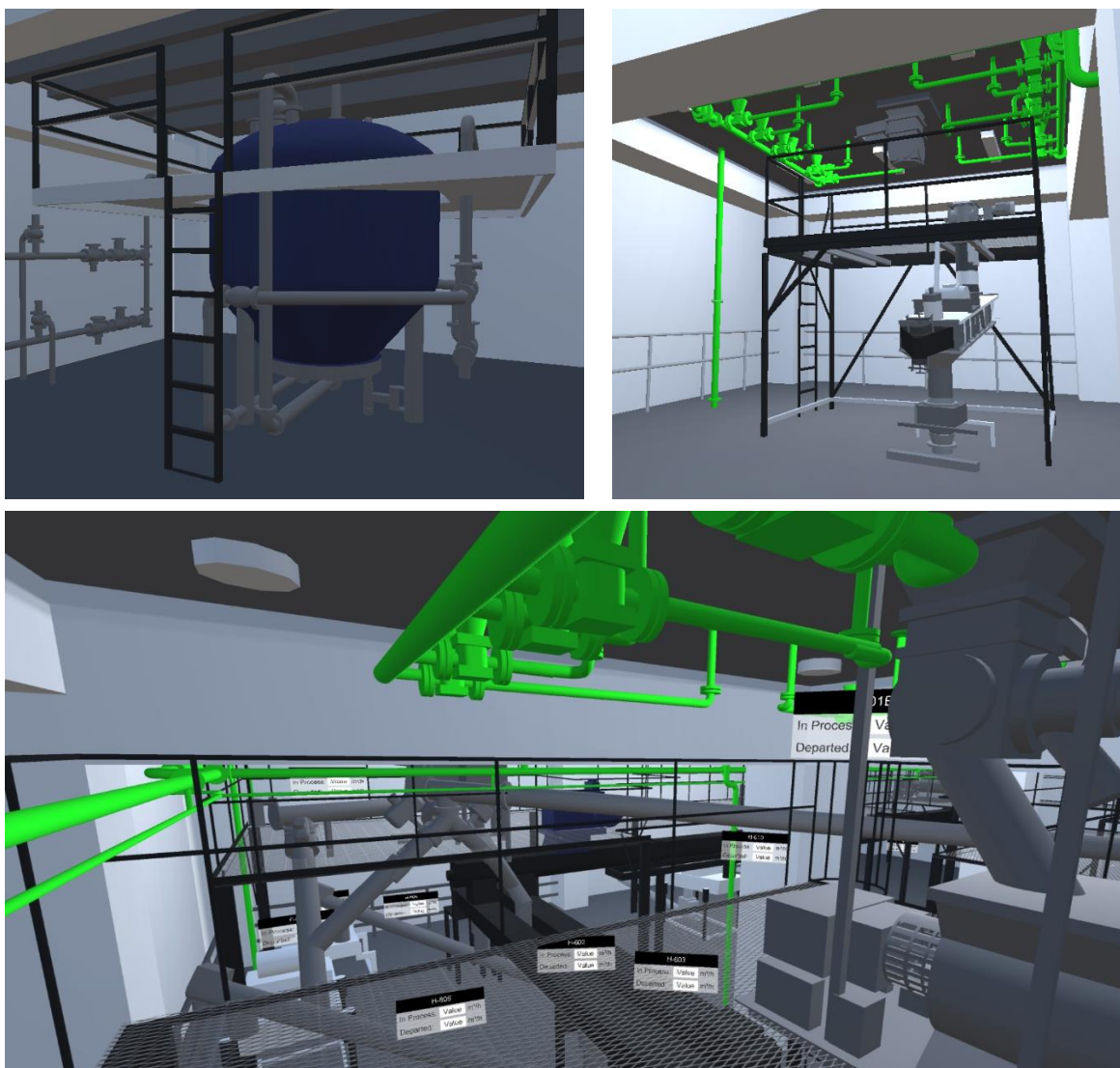
Praktický přínos práce leží v zavádění navržené metodiky návrhu a digitálního dvojčete do průmyslové praxe. Metodika byla a je úspěšně využívána při návrhu a implementaci digitálních dvojčat u průmyslových partnerů ať už z oblasti výroby CNC obráběcích strojů, uživatelů CNC obráběcích strojů tak zcela mimo oblast strojírenství v chemickém průmyslu. Jedná se zejména o firmy:

- Výrobce CNC obráběcích strojů: TOS Čelákovice – Slováké strojírny a. s., TOSHULIN a. s., FERMAT CZ s. r. o.

- Uživatele CNC obráběcích strojů: Slováké strojírny a. s.
- Chemický podnik: FOSFA a.s.



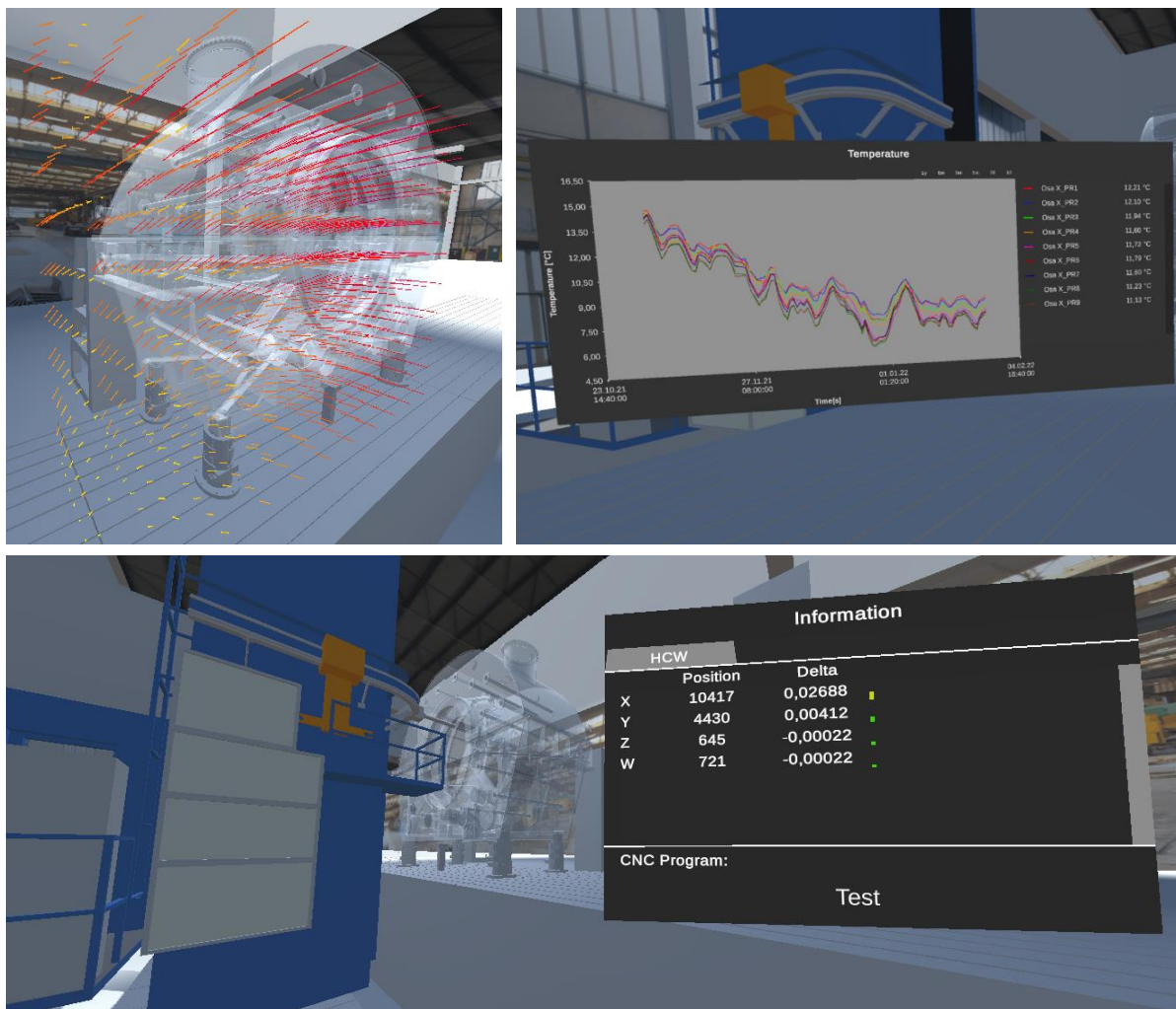
V rámci hospodářské soutěže SR132057007 bylo na základě sestavené metodiky navrženo a implementováno digitální dvojče expedice provozu Fosfáty (Obr. 42). Jedná se o digitální dvojče, jehož účelem je simulace produktivity expediční linky a kooperace uživatelů v rámci společného virtuálního prostoru. Pro vizualizaci byla použita technologie virtuální reality. V současnosti pokračují přípravy na další spolupráci s firmou FOSFA a.s. za účelem vytvoření digitálního dvojčete další části výroby.



Obr. 42 Digitální dvojče pro simulaci produktivity expedice provozu Fosfáty

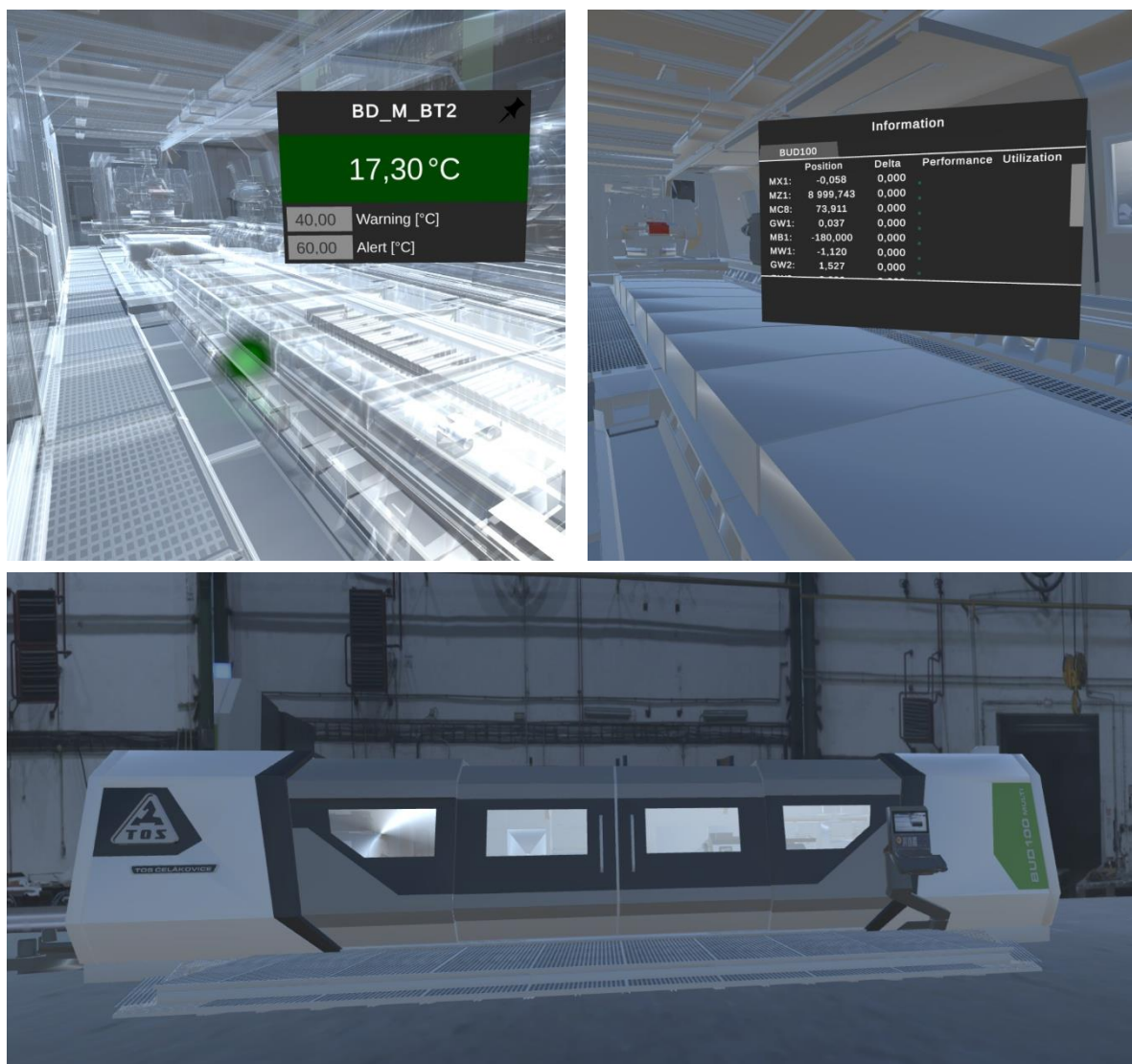
Navržená metodika byla také aplikována při řešení hospodářské soutěže SR13857154 s firmou Slováké strojírny a.s. Na základě sestavené metodiky bylo navrženo digitální dvojče horizontální vyvrtávačky HCW3 (Obr. 43) za účelem monitorování, teplot na stroji a v jeho okolí včetně procházení historie, poloh jednotlivých os stroje, vibrací stroje a volumetrických odchylek v obráběcím prostoru stroje. V rámci digitálního dvojčete je také zobrazena instruktáž

pozicování panenek. Pro účely vizualizace digitálního dvojčete byla využita technologie virtuální reality.



Obr. 43 Digitální dvojče horizontální vyvrtávačky HCW3 pro monitorování stavu stroje

V rámci řešení výzkumného projektu NCK MESTEC vznikl ve spolupráci s firmou TOS Čelákovice na základě sestavené metodiky digitální stín pro nově vyvinutou hrotovou brusku BUD 100 MULTI (Obr. 44). Tento digitální stín slouží k monitorování teplot na stroji a poloh jednotlivých os. Digitální stín je úspěšně využíván zejména pro prezentaci brusky novým zákazníkům. V současné době je pokračováno na vývoji s cílem vytvoření plného digitálního dvojčete.



Obr. 44 Digitální stín hrotové brusky BUD 100 MULTI pro monitorování stavu stroje

V současné době probíhá spolupráce s dalšími průmyslovými partnery z oblasti výrobních strojů FERMAT CZ, s.r.o. a TOS Hulín.

Výsledky této dizertační práce byly úspěšně prezentovány na dvou ročnících mezinárodního strojírenského veletrhu. V roce 2019 byl prezentován exponát „Digitální dvojče výrobní buňky – virtuální zprovoznění“ na němž se autor coby člen řešitelského týmu podílel návrhem a implementací digitálního dvojčete výrobní buňky popsané v kap. 5 a 6.

V roce 2021 byl firmou TOS Čelákovice prezentován exponát „Multifunkční hrotová bruska BUD 100/7000 MULTI“. Prezentace stroje na veletrhu byla zajištěna Vysokým učením technickým pomocí vytvořeného digitálního stínu popsaného výše.

V obou zmíněných případech byly exponáty oceněny zástupci průmyslové a akademické sféry zlatou medailí.



Obr. 45 Prezentace výsledků dizertační práce na MSV2019 a MSV2021

8. ZÁVĚR

Hlavním cílem této dizertační práce byl návrh digitálního dvojčete obráběcího stroje. Na základě provedené rešeršní části, týkající se aktuální a rychle se rozvíjející problematiky tvorby digitálního dvojčete a kyber-fyzikálních systémů, byla provedena analýza získaných poznatků a následně formulovány jednotlivé dílčí cíle dizertační práce. Přínosy této dizertační práce jsou rozděleny do tří částí.

První část představuje systémový přístup při návrhu digitálního dvojčete obecných technických soustav s přihlédnutím k jejich softwarově hardwarovým možnostem další implementace. Hlavním přínosem této části práce je systematická definice pojmu digitálního dvojčete a jeho hlavních součástí. Formulovaná definice digitálního dvojčete je rozšířena o navrženou metodiku návrhu digitálního dvojčete.

Druhá část práce obsahuje aplikaci navržené metodiky pro tvorbu digitálního dvojčete pro výrobní buňku UVSSR Cell, která se skládá ze soustavy robot – obráběcí stroj a měřicí stanice s cílem návrhu „nejširšího pojetí“ digitálního dvojčete, včetně integrace akce uživatele do celkového výrobního procesu. Plná integrace digitálního dvojčete na výrobní buňku představuje nástroj pro řešení tří hlavních technických problémů, kterými jsou monitorování stavu technické soustavy, predikce chyby přesnosti najetí do polohy způsobené změnou teplot a podpora uživatele při obsluze technické soustavy.

Třetí, poslední část představuje softwarovou a hardwarovou implementaci jednotlivých částí navrženého digitálního dvojčete včetně celého komunikačního řetězce. Součástí řešení je plná softwarová integrace tří stupňů komunikačního řetězce – stroj – edge computer – server. Jako komunikační rozhraní pro integraci uživatele do celého procesu bylo použito dvou forem tzv. virtuální reality, kterými jsou plná virtuální realita a rozšířená realita.

Navržená technologie byla ověřena dlouhodobým (více než půl roku) kontinuálním testem ve zmíněné výrobní buňce a byla také použita pro řešení technických problémů v průmyslové praxi – například v chemickém průmyslu, technologickém odvětví obráběcích strojů, v technologickém odvětví čerpací techniky apod. Průmyslové aplikace zmíněné technologie byly nasazeny jak již v existujících technologických celcích, tak také jako plně integrovaná součást nově vznikajícího výrobku. Budoucí vývoj zmíněné technologie je založen na poznatcích z praktických aplikací a nyní se zaměřuje na zlepšení uživatelské integrace do celého procesu včetně například zabezpečení technologických celků apod

LITERATURA

- [1] H. Lasi, P. Fettke, H. Kemper, T. Feld and M. Hoffmann, "Industry 4.0", *Business and Information Systems Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239-242, 2014.
- [2] "What is Industrie 4.0?", *Plattform Industrie 4.0*, 2019. [Online]. Available: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>. [Accessed: 2019-03-24].
- [3] "Industrie 4.0", *Federal Ministry for Economic Affairs and Energy*, 2019. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Dossier/industrie-40.html>. [Accessed: 2019-03-23].
- [4] K. Ashton, "That 'Internet of Things' Thing: In the real world, things matter more than ideas", *RFID Journal*, p. 1, 2009.
- [5] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey", *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787-2805, 2010.
- [6] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, 2015.
- [7] M. Bauer, N. Bui, J. De Loof, C. Magerkurth, A. Nettsträter, J. Stefa and J. Walewski, "IoT Reference Model", in *Enabling Things to Talk: Designing IoT solutions with the IoT architectural reference model*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 113-162.
- [8] P. Sethi and S. Sarangi, "Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, pp. 1-25, 2017.
- [9] I. Yaqoob, E. Ahmed, I. Hashem, A. Ahmed, A. Gani, M. Imran and M. Guizani, "Internet of Things Architecture: Recent Advances, Taxonomy, Requirements, and Open Challenges", *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 10-16, 2017.
- [10] J. Shi, J. Wan, H. Yan and H. Suo, "A survey of Cyber-Physical Systems", *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 1-6, 2011.
- [11] V. Gunes, T. Givargis and F. Vahid, "A Survey on Concepts, Applications, and Challenges in Cyber-Physical Systems", *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 8, no. 12, pp. 4242-4268, 2014.

- [12] J. Lee, B. Bagheri and H. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18-23, 2015.
- [13] M. Grieves and J. Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems", in *Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches*, 1 ed., New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 85-113.
- [14] E. Tuegel, A. Ingrassia, T. Eason and S. Spottswood, "Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin", *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2011, pp. 1-14, 2011.
- [15] E. Glaessgen and D. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles", *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference - 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference - 14th AIAA*, pp. -, 2012.
- [16] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo and K. Bettenhausen, "About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 567-572, 2015.
- [17] G. Schroeder, C. Steinmetz, C. Pereira and D. Espindola, "Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 30, pp. 12-17, 2016.
- [18] T. Uhlemann, C. Lehmann and R. Steinhilper, "The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0", *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 335-340, 2017.
- [19] Q. Qi and F. Tao, "Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3585-3593, 2018.
- [20] J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, C. Engel, K. Spreitzer and M. Zimmermann, "WHAT IS A DIGITAL TWIN? – DEFINITIONS AND INSIGHTS FROM AN INDUSTRIAL CASE STUDY IN TECHNICAL PRODUCT DEVELOPMENT", *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, vol. 1, pp. 757-766, 2020.
- [21] F. Tao, M. Zhang and A. Nee, "Background and Concept of Digital Twin", *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, pp. 3-28, 2019a.
- [22] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016-1022, 2018.
- [23] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang and F. Sui, "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, no. 9-12, pp. 3563-3576, 2018.

- [24] H. Zhang, Q. Liu, X. Chen, D. Zhang and J. Leng, "A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26901-26911, 2017.
- [25] J. Landahl, M. Panarotto, H. Johannesson, O. Isaksson and J. Lööf, *Towards adopting digital twins to support design reuse during platform concept development*. Linköping: NordDesign, 2018.
- [26] F. Tao and M. Zhang, "Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20418-20427, 2017.
- [27] G. Knapp, T. Mukherjee, J. Zuback, H. Wei, T. Palmer, A. De and T. DebRoy, "Building blocks for a digital twin of additive manufacturing", *Acta Materialia*, vol. 135, pp. 390-399, 2017.
- [28] J. Vachalek, L. Bartalsky, O. Rovny, D. Sismisova, M. Morhac and M. Loksik, "The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept", in *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, 2017, pp. 258-262.
- [29] J. Blata, *Metody technické diagnostiky: učební text předmětu "Technická diagnostika" ; Metody technické diagnostiky CV : návody do cvičení předmětu "Technická diagnostika"*, První. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [30] J. Ríos, J. Hernández, M. Oliva and F. Mas, "Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft", *Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems*, vol. 2, pp. 657-666, 2015.
- [31] M. Chen, S. Mao and Y. Liu, "Big Data: A Survey", *Mobile Networks and Applications*, vol. 19, no. 2, pp. 171-209, 2014.
- [32] J. Gantz and D. Reinsel, "Extracting Value from Chaos", 2011, pp. 1-12.
- [33] I. Hashem, I. Yaqoob, N. Anuar, S. Mokhtar, A. Gani and S. Ullah Khan, "The rise of "big data" on cloud computing: Review and open research issues", *Information Systems*, vol. 47, pp. 98-115, 2015.
- [34] S. Sagioglu and D. Sinanc, "Big data: A review", in *2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 2013, pp. 42-47.
- [35] Y. Cheng, K. Chen, H. Sun, Y. Zhang and F. Tao, "Data and knowledge mining with big data towards smart production", *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 9, pp. 1-13, 2018.
- [36] A. Gandomi and M. Haider, "Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics", *International Journal of Information Management*, vol. 35, no. 2, pp. 137-144, 2015.
- [37] H. Hassani, X. Huang and M. Ghodsi, "Big Data and Causality", *Annals of Data Science*, vol. 5, no. 2, pp. 133-156, 2018.

- [38] M. Trovati, "Reduced Topologically Real-World Networks", *International Journal of Distributed Systems and Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 13-27, 2015.
- [39] S. Maitra, T. Hossain, K. Hasib and F. Shishir, "Graph Theory for Dimensionality Reduction: A Case Study to Prognosticate Parkinson's", *2020 11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, pp. 0134-0140, 2020.
- [40] A. Nasif, Z. Othman and N. Sani, "The Deep Learning Solutions on Lossless Compression Methods for Alleviating Data Load on IoT Nodes in Smart Cities", *Sensors*, vol. 21, no. 12, 2021.
- [41] A. Moon, J. Kim, J. Zhang and S. Son, "Lossy compression on IoT big data by exploiting spatiotemporal correlation", *2017 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*, pp. 1-7, 2017.
- [42] M. ur Rehman, C. Liew, A. Abbas, P. Jayaraman, T. Wah and S. Khan, "Big Data Reduction Methods: A Survey", *Data Science and Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 265-284, 2016.
- [43] Y. Fu, H. Jiang and N. Xiao, "A Scalable Inline Cluster Deduplication Framework for Big Data Protection", *Middleware 2012*, pp. 354-373, 2012.
- [44] W. Xia, H. Jiang, D. Feng and Y. Hua, *SiLo: A Similarity-Locality based Near-Exact Deduplication Scheme with Low RAM Overhead and High Throughput*. Portland: USENIX Association, 2011.
- [45] T. Yang, H. Jiang, D. Feng, Z. Niu, K. Zhou and Y. Wan, "DEBAR: A scalable high-performance de-duplication storage system for backup and archiving", *2010 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing (IPDPS)*, pp. 1-12, 2010a.
- [46] T. Yang, D. Feng, Z. Niu and Y. Wan, "Scalable high performance de-duplication backup via hash join", *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, vol. 11, no. 5, pp. 315-327, 2010b.
- [47] S. Luo, G. Zhang, C. Wu, S. Khan and K. Li, "Boafft: Distributed Deduplication for Big Data Storage in the Cloud", *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 8, no. 4, pp. 1199-1211, 2020.
- [48] P. Jiang, J. Winkley, C. Zhao, R. Munnoch, G. Min and L. Yang, "An Intelligent Information Forwarder for Healthcare Big Data Systems With Distributed Wearable Sensors", *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 1147-1159, 2016.
- [49] A. Stateczny and M. Wlodarczyk-Sielicka, "Self-organizing Artificial Neural Networks into Hydrographic Big Data Reduction Process", *Rough Sets and Intelligent Systems Paradigms*, pp. 335-342, 2014.
- [50] E. Brewer, "Towards robust distributed systems (abstract)", *Proceedings of the nineteenth annual ACM symposium on Principles of distributed computing - PODC '00*, 2000.

- [51] P. Ghafoorpoor Yazdi, A. Azizi and M. Hashemipour, "An Empirical Investigation of the Relationship between Overall Equipment Efficiency (OEE) and Manufacturing Sustainability in Industry 4.0 with Time Study Approach", *Sustainability*, vol. 10, no. 9, pp. 1-28, 2018.
- [52] S. Dutta and A. Dutta, "A Review on the experimental study of Overall Equipment Effectiveness of various machines and its improvement strategies through TPM implementation", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 36, no. 5, pp. 224-232, 2016.
- [53] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee and B. Yin, "Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505-6519, 2018.
- [54] F. Shrouf, J. Ordieres and G. Miragliotta, "Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm", *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 697-701, 2014.
- [55] H. Kagermann, W. Wahlster and J. Helbig, "Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group". 2013.
- [56] A. Radziwon, A. Bilberg, M. Bogers and E. Madsen, "The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions", *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 1184-1190, 2014.
- [57] D. Spath, O. Ganschar, S. Gerlach, M. Hämmerle, T. Krause and S. Schlund, *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013.
- [58] V. Paelke, "Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment", *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1-4, 2014.
- [59] F. Tao, M. Zhang and A. Nee, "Digital Twin, Cyber–Physical System, and Internet of Things", *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, pp. 243-256, 2019b.
- [60] Z. Tůma, L. Kotek, J. Kroupa, P. Blecha and F. Bradáč, "Possibility of automated ergonomic evaluations in virtual reality environments", in *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*, 2020, pp. 4980-4984.
- [61] Z. Tůma, L. Kotek, J. Kroupa, P. Blecha and F. Bradáč, "Verification of HTC Vive deployment capabilities for ergonomic evaluations in virtual reality environments", *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World*, pp. 309-313, 2018.
- [62] J. Kroupa, Z. Tuma, J. Kovar and V. Singule, "VIRTUAL LABORATORY FOR STUDY OF CONSTRUCTION OF MACHINE TOOLS", *MM Science Journal*, vol. 2018, no. 04, pp. 2503-2506, 2018.

- [63] J. Vetiska, M. Holub, P. Blecha, F. Bradac, J. Brazina, V. Stanek, J. Kroupa and Z. Tuma, "Industry 4.0 in Educational Process", *Digital Conversion on the Way to Industry 4.0*, pp. 324-332, 2021.
- [64] J. Kroupa, E. Tumova, Z. Tuma, J. Kovar and V. Singule, "PROCESSING AND VISUALIZATION OF MICROCLIMATIC DATA BY USING VIRTUAL REALITY", *MM Science Journal*, vol. 12, no. 2018, pp. 2621-2624, 2018.
- [65] V. Stepanek, J. Brazina, M. Holub, J. Vetiska, J. Kovar, J. Kroupa and A. Jelinek, "Implementation of Industry 4.0 Elements in Industrial Metrology – Case Study", *Digitizing Production Systems*, pp. 296-308, 2022.
- [66] M. Holub, Z. Tuma, J. Kroupa, J. Kovar and P. Blecha, "Case Study of Digitization of the Production Cell", *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019*, pp. 253-262, 2020.
- [67] J. Kovář, K. Mouralová, F. Kšica, J. Kroupa, O. Andrš and Z. Hadaš, "Virtual reality in context of Industry 4.0: Proposed projects at Brno University of Technology", in *Proceedings of the 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika*, 2016, pp. 1-7.
- [68] T. Marek and J. Marek, *Mít sondu nestačí*. Brno: Renishaw s.r.o., 2017.
- [69] J. Jedrzejewski and W. Modrzycki, "Intelligent Supervision of Thermal Deformations in High Precision Machine Tools", *Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference*, pp. 457-462, 1997.
- [70] G. Florussen, F. Delbressine, R. Van De Molengraft and P. Schellekens, "Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements", *Measurement*, vol. 30, no. 4, pp. 241-255, 2001.
- [71] J. Marek, *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014.
- [72] M. Paweł and J. Jastrzębska, "Simplifications of the volumetric error model because of the structural loop of machine tools", *Archives of Mechanical Technology and Materials*, vol. 39, no. 1, pp. 11-15, 2019.
- [73] J. Marek, M. Holub, T. Marek and P. Blecha, "Geometric Accuracy, Volumetric Accuracy and Compensation of CNC Machine Tools", *Machine Tools [Working Title]*, 2020.
- [74] M. Holub, "Geometric Accuracy of Machine Tools", *Measurement in Machining and Tribology*, pp. 89-112, 2019.
- [75] J. Bryan, "International Status of Thermal Error Research", *CIRP Annals*, vol. 39, no. 2, pp. 645-656, 1990.
- [76] S. Mekid, *Introduction to Precision Machine Design and Error Assessment*, 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2008.

- [77] R. Ramesh, M. Mannan and A. Poo, "Error compensation in machine tools — a review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 9, pp. 1257-1284, 2000.
- [78] C. Wu, C. Tang, C. Chang and Y. Shiao, "Thermal error compensation method for machine center", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 5-8, pp. 681-689, 2012.
- [79] S. Appel and J. Wijker, "Structural Modelling for Thermoelastic Analysis", *Simulation of Thermoelastic Behaviour of Spacecraft Structures*, pp. 111-163, 2022.
- [80] Y. Chen, J. Chen and G. Xu, "A data-driven model for thermal error prediction considering thermoelasticity with gated recurrent unit attention", *Measurement*, vol. 184, 2021.
- [81] H. Yang and J. Ni, "Dynamic Modeling for Machine Tool Thermal Error Compensation", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 245-254, 2003.
- [82] M. Holub, O. Andrs, J. Kovar and J. Vetiska, "Effect of position of temperature sensors on the resulting volumetric accuracy of the machine tool", *Measurement*, vol. 2020, no. 150, pp. 1-8, 2020.
- [83] "Linear Encoders for Numerically Controlled Machine Tools", 2019. [Online]. Available: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/571470-2C_Linear_Encoders_For_Numerically_Controlled_Machine_Tools.pdf. [Accessed: 2021-03-18].
- [84] I. Alexandre and M. Artes, "Thermal non-linear behaviour in optical linear encoders", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 12-13, pp. 1319-1325, 2006.
- [85] I. Alexandre and M. Artes, "REAL THERMAL COEFFICIENT IN OPTICAL LINEAR ENCODERS", *Experimental Techniques*, vol. 28, no. 4, pp. 18-22, 2004.
- [86] D. Gurauskis, A. Kilikevičius, S. Borodinas and A. Kasparaitis, "Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 296, pp. 145-154, 2019.
- [87] B. Štědroň, *Právo a umělá inteligence*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2020.
- [88] L. Kolaříková and F. Horák, *Umělá inteligence & právo*. Praha: Wolters Kluwer, 2020.