



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

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Kroupa

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

BRNO 2022

Klíčová slova

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

Keywords

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

Místo uložení práce

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2

616 69 Brno

© Jiří Kroupa, 2022

ISBN 80-214-XXX

ISSN 1213-419

OBSAH

1. ÚVOD.....	5
1.1 Digitální dvojčce.....	5
2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	6
3. SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE.....	7
3.1 Systém podstatných a nepodstatných veličin u digitálního dvojčete	7
3.2 Digitální dvojčce v čase	8
3.3 Digitální dvojčce v prostoru	9
3.3.1 Digitální dvojčce.....	10
3.3.2 Technická soustava	12
3.3.3 Uživatel	12
3.3.4 Okolí	12
3.3.5 Uložiště	12
3.4 Metodika návrhu digitálního dvojčete	13
3.1 Dílčí závěr dizertační práce	13
4. APLIKACE METODIKY PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE VÝROBNÍ BUŇKY UVSSR CELL NA VYBRANÉ PRVKY	19
4.1 Identifikace technické soustavy	19
4.1.1 Vazba TS3	19
4.1.2 Vazba TS4	20
4.1.3 Vazba TS1	20
4.1.4 Vazba TS2	20
4.2 Návrh digitálního dvojčete pro predikci chyby přesnosti najetí do polohy způsobenou změnou teplot	21
4.2.1 Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete.....	22
4.2.2 Modul M1	23
4.2.3 Modul M2	23
4.2.4 Modul M3	23
4.2.5 Modul M4	24
4.3 Propojení technické soustavy a digitálního dvojčete	24
4.3.1 Vazba V1	24
4.4 Struktura kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell	25
5. PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE	25
5.1 Pedagogický přínos práce	25
5.2 Vědecký přínos práce	26
5.3 Praktický přínos práce	26
6. ZÁVĚR.....	27
7. LITERATURA	29
8. ŽIVOTOPIS.....	30

1. 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.

1.1 DIGITÁLNÍ DVOJČE

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“ [1].

„Digitální dvojče je integrovaná multifyzikální, vícerozměrná, stochastická simulace využívající matematickofyzikálních modelů za účelem predikování stavů a životnosti fyzického zařízení.“ [2].

„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“ [3].

„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“ [4].

„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“ [5].

„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“ [6].

„Digitální dvojče je virtuální dynamická reprezentace fyzického systému, která je s tímto systémem propojená po celou jeho životního cyklu pomocí obousměrné datové komunikace.“ [7]

Z jednotlivých definicí 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 sestávající 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.

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 [8]. 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.

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. SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

Jak vyplývá z kap. 1.1, 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. 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.

3.1 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. 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.

3.2 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. Jednotlivé fáze životního cyklu digitálního dvojčete nemusí přímo odpovídat fázím životního cyklu 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.

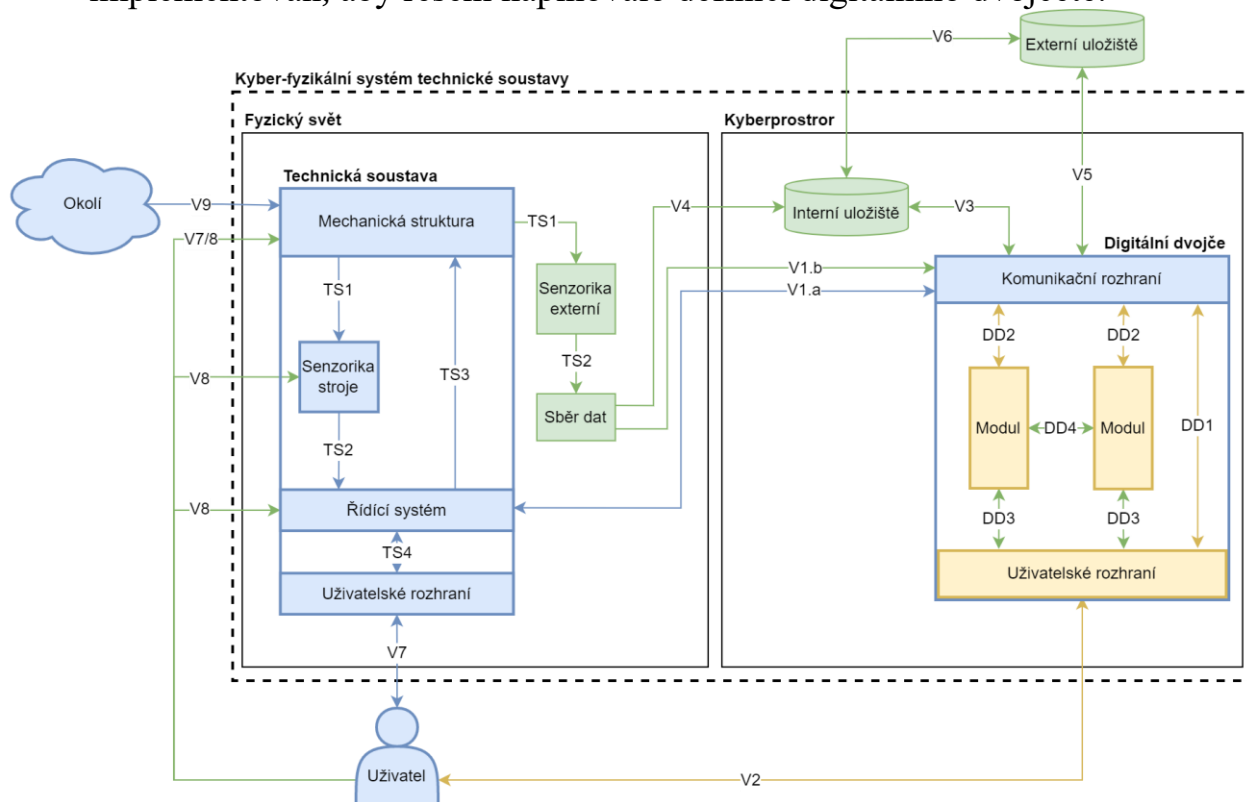
3.3 DIGITÁLNÍ DVOJČE V PROSTORU

Na Schématu kyber-fyzikálního systému technické soustavy na Obr. 1 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 naplňovalo 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. 1 Implementace digitálního dvojčete v rámci kyber-fyzikálním systému

3.3.1 Digitální dvojče

Subsystem 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. Zpracování agregovaných dat z technické soustavy 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.

Komunikační rozhraní

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 slouží jako zdroj dat pro digitální dvojče. Pro přehlednost je vhodné vazbu V1 rozdělit podle jednotlivých zdrojů dat. Rozdělení vazby je patrné z obrázku Obr. 1. Dále může být komunikační rozhraní použito pro

přenos dat mezi digitálním dvojčetem a interním (V3), popřípadě externím (V5) uložištěm dat.

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.

K tomu, aby bylo možné modul začlenit do struktury digitálního dvojčete, je nutné definovat jeho vazby na ostatní prvky v subsystému. Podle prvku, se kterým je modul propojen, je možné vazby rozdělit na:

- **Vazba DD2** – propojení modulu a komunikačního rozhraní umožňující přistupovat prostřednictvím komunikačního rozhraní k prvkům nacházejícím se mimo digitální dvojče. Vazba může být obousměrná.
- **Vazba DD3** – propojení modulu a uživatelského rozhraní sloužící k interakci modulu a uživatele prostřednictvím uživatelského rozhraní. Tato interakce může být obousměrná.
- **Vazba DD4** – propojení modulů mezi sebou umožňující vytvářet modulární strukturu digitálního dvojčete.

Uživatelské rozhraní

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 modulů digitálního dvojčete pomocí vazby DD3, parametrizaci technické soustavy pomocí vazby DD1 a ovládání uživatelského rozhraní.

Výstupem uživatelského rozhraní je vizualizace dat, které je možné podle jejich zdroje rozdělit na výstupní data modulů (prostřednictvím vazby DD3), data vně digitálního dvojčete (prostřednictvím vazby DD1) a na informace z uživatelského rozhraní.

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 kterými jsou zobrazovací panely, virtuální reality a rozšířená realita.

3.3.2 Technická soustava

Prvek 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, sensorikou stroje, řídicím systémem a uživatelským rozhraním. Subsystém technické soustavy tvoří fyzickou předlohu pro digitální dvojče a je tedy nezbytnou součástí konceptu digitálního dvojčete. Dále může být technická soustava rozšířena o externí sensoriku 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.

3.3.3 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 působí (V7) na technickou soustavu činnostmi, kterými jsou, příprava pracovního procesu seřazením funkce stroje, upínání obrobků a nastavování programů popřípadě parametrů. Servisní technik má za účelem monitorování stavu a odstraňování závad 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.

3.3.4 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 tepla, vibrací a nečistot [9]. Vliv okolí na technickou soustavu je v rámci jejího životního cyklu proměnlivý. Technická soustava je vždy ovlivněna okolními vlivy, z principu tedy není možné tento prvek eliminovat.

3.3.5 Uložiště

Za určitých situací může digitální dvojče ke svému chodu vyžadovat historizaci dat. V rámci vazby na kyber-fyzikální systém technické soustavy lze definovat dva prvky systému sloužící jako uložisko dat, a to interní a externí. Interní uložisko (vlastní datová infrastruktura) je přímou součástí kyber-fyzikálního systému a s ostatními prvky je

propojeno pomocí lokální sítě, zavedené v rámci systému. Proto k němu mají přístup pouze prvky, nacházející se uvnitř kyber-fyzikálního systému, kterými jsou technická soustava (V4) a digitální dvojče (V3). Externí uložště (cloud computing) se nachází vně kyber-fyzikálního systému a je dostupné prostřednictvím globální sítě (V5). K zajištění zálohování při výpadku spojení, je možné využít obě uložště. Data z kyber-fyzikálního systému jsou v takovém případě ukládány v rámci interního uložště, které je synchronizováno (V6) s externím uložštěm.

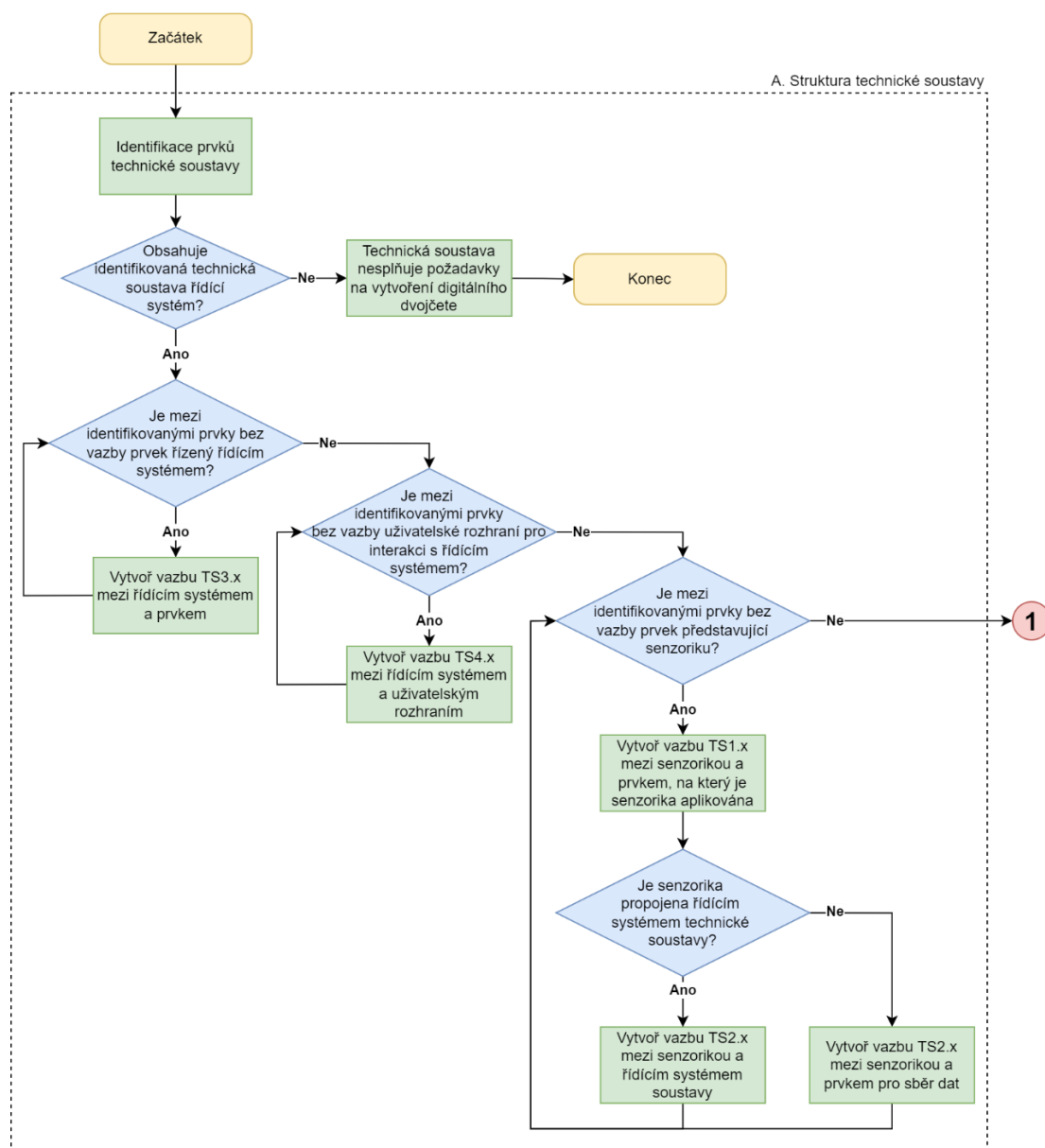
3.4 METODIKA NÁVRHU DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

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. 2 - Obr. 7.

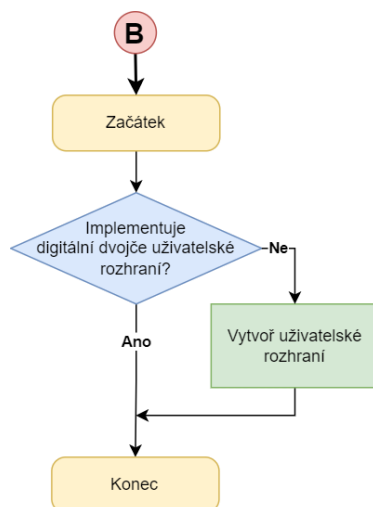
3.1 DÍLČÍ ZÁVĚR DIZERTAČNÍ PRÁCE

Kyber-fyzikální systém je v této práci chápán jako framework a koncept digitálního dvojčete jako jeho aplikace. V terminologii kyber-fyzikálního 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.

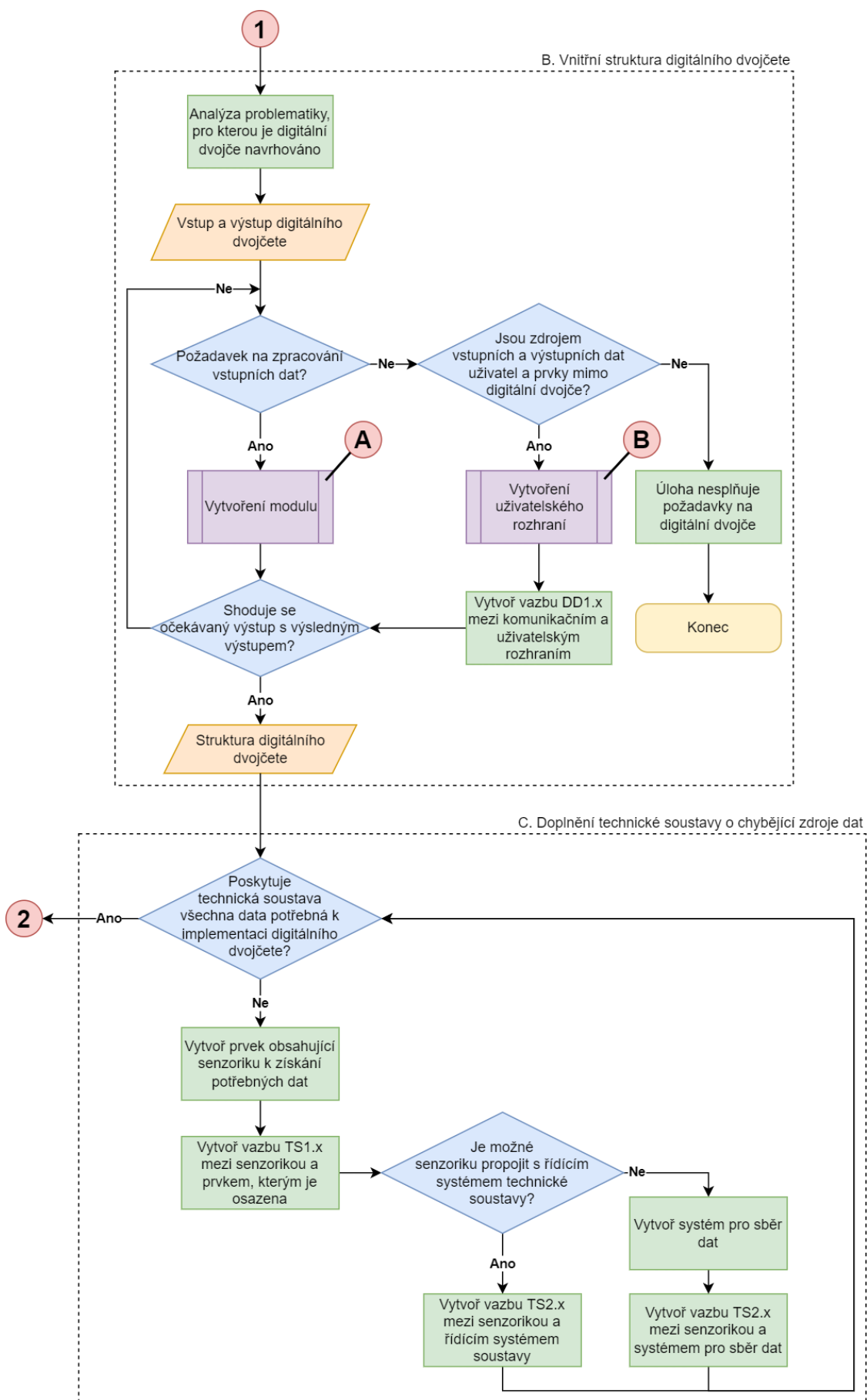
Návrh digitálního dvojčete je velice komplexní proces, během kterého je nutné definovat mnoho aspektů, na základě kterých je dvojče realizováno. Vzhledem ke komplexitě problematiky se návrh digitálního dvojčete liší pro každou technickou soustavu. Z tohoto důvodu byly definovány dvě podstatné veličiny 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.



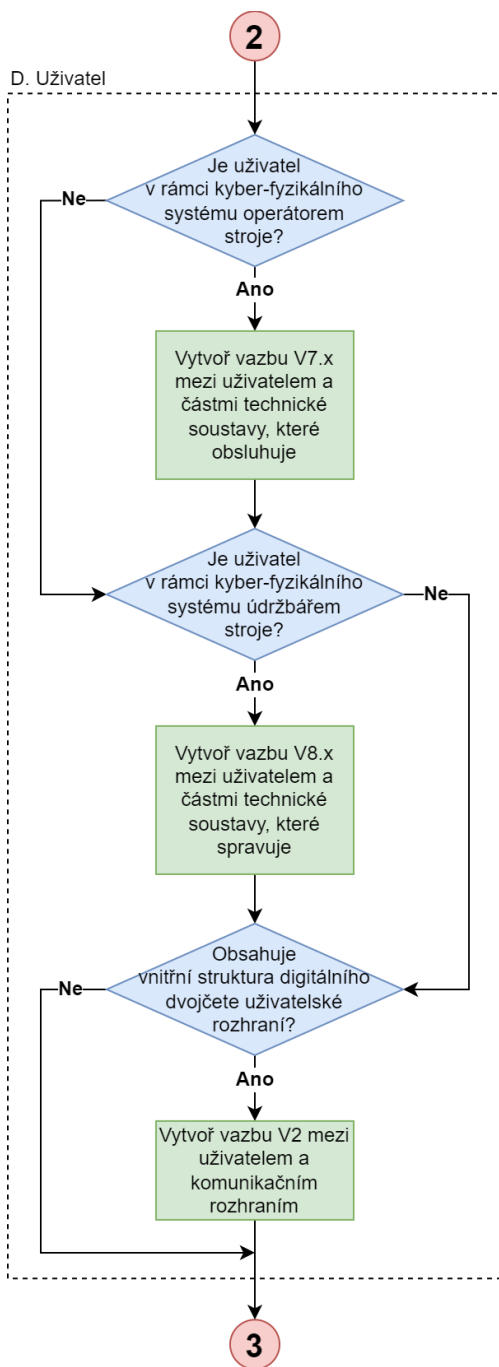
Obr. 2 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část A



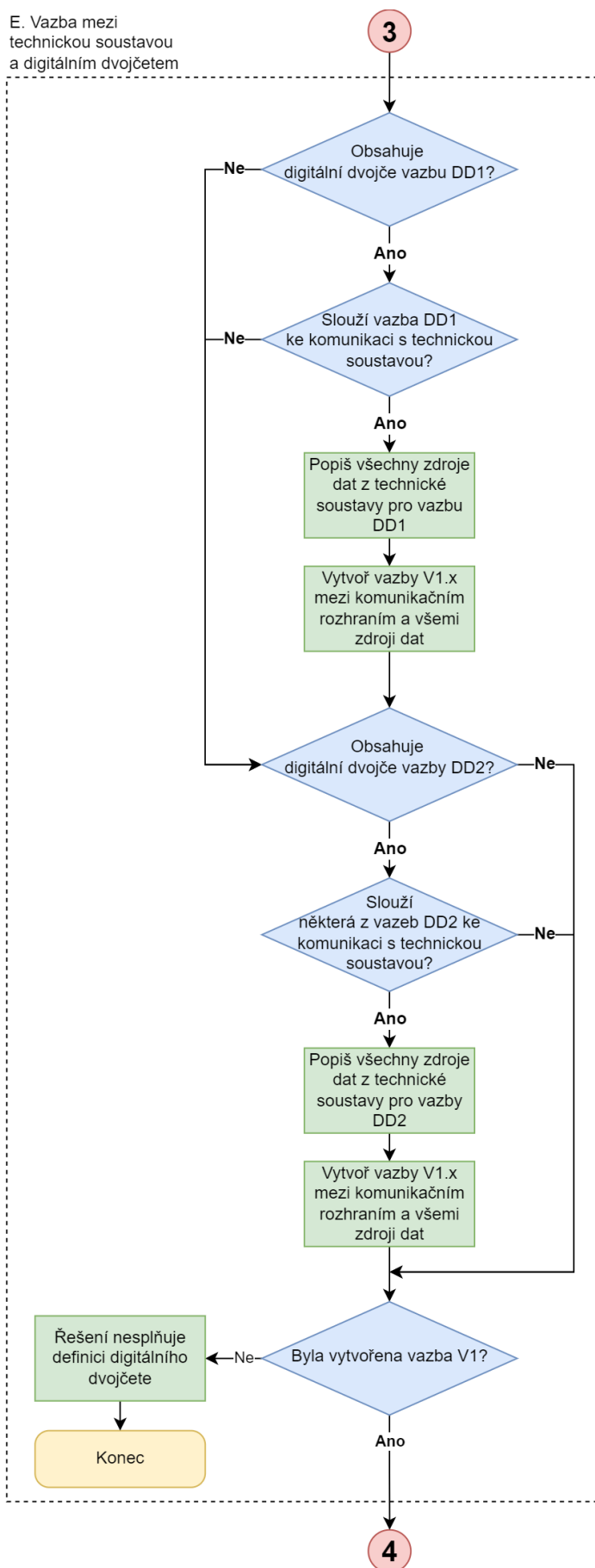
Obr. 3 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – subprogram „Kontrola uživatelského rozhraní“



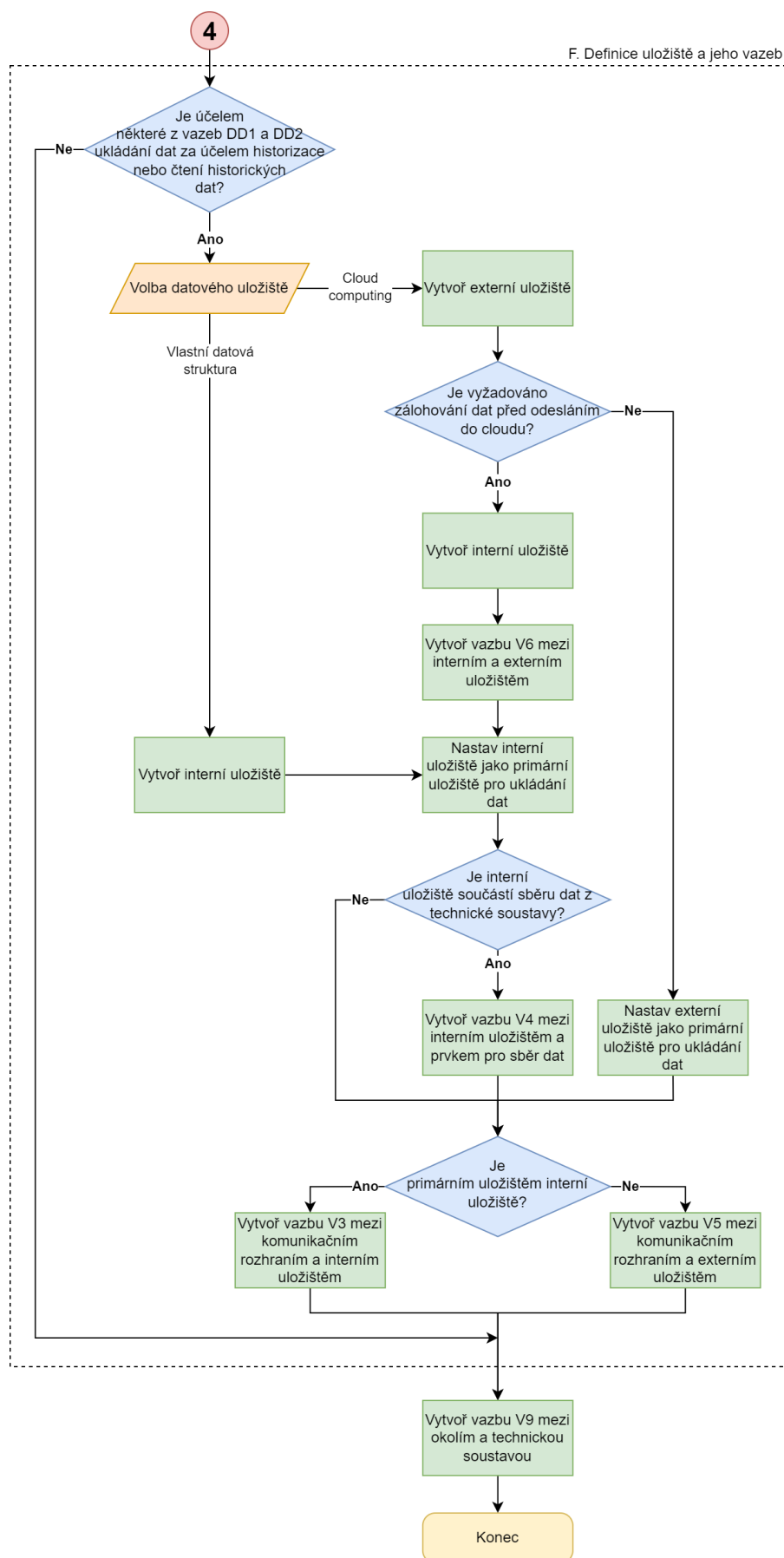
Obr. 4 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část B



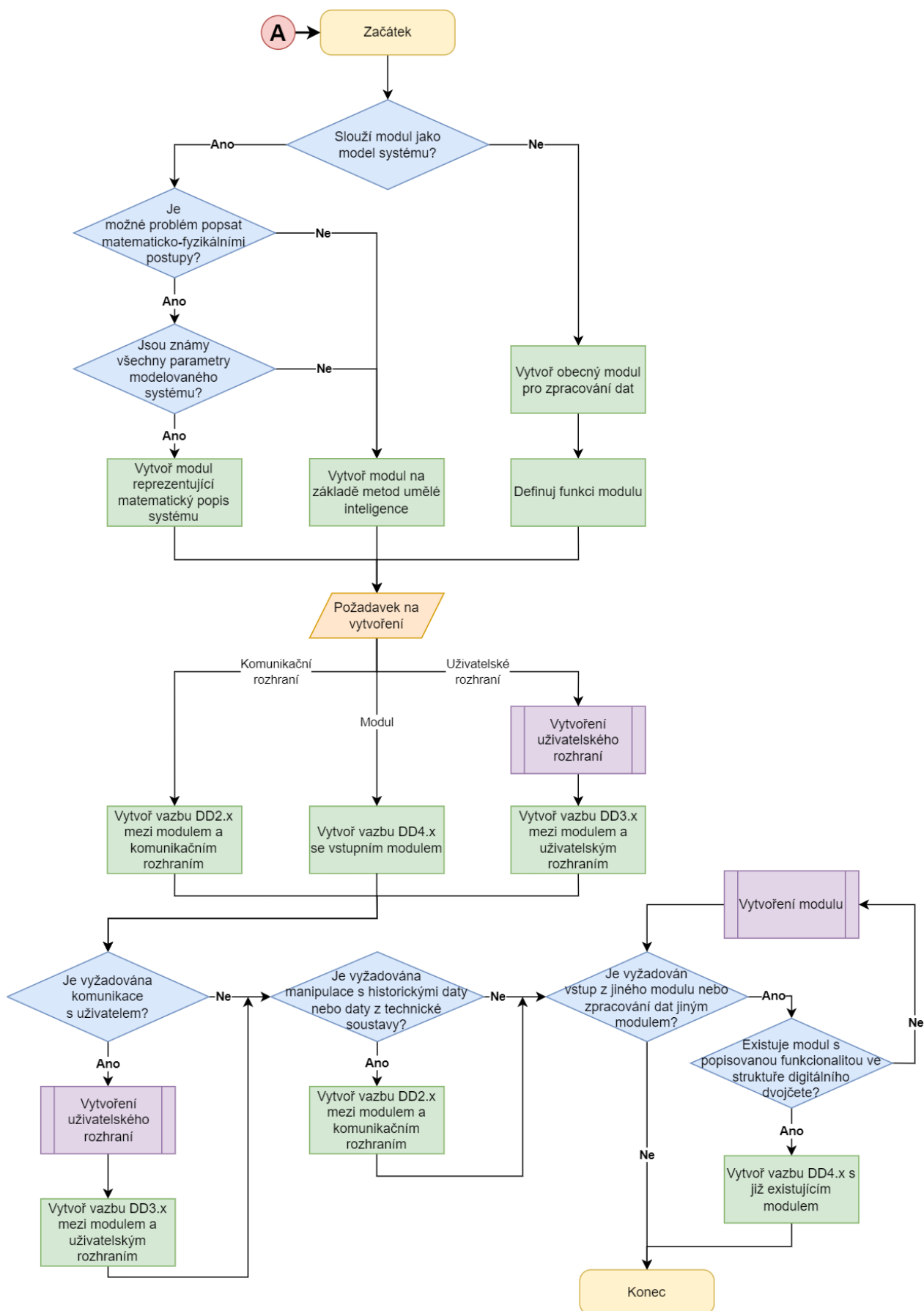
E. Vazba mezi technickou soustavou a digitálním dvojčetem



Obr. 5 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část C



Obr. 6 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – část D

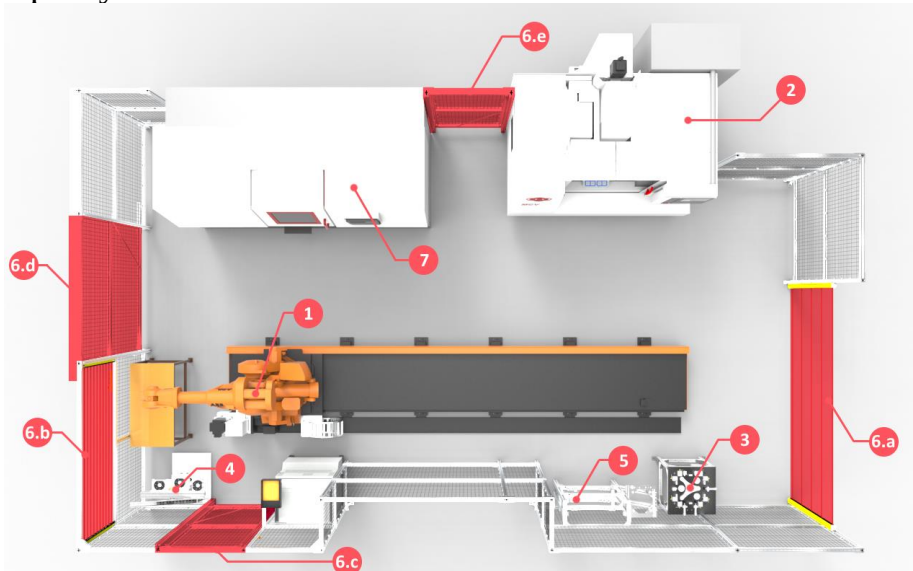


Obr. 7 Metodika pro návrh digitálního dvojčete a jeho vymezení v rámci kyber-fyzikálního systému – subprogram „Vytvoření modulu“

4. APLIKACE METODIKY PRO NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE VÝROBNÍ BUŇKY UVSSR CELL NA VYBRANÉ PRVKY

4.1 IDENTIFIKACE TECHNICKÉ SOUSTAVY

V souladu s vytvořenou metodikou je nejprve identifikována technická soustava výrobní buňky UVSSR Cell (Obr. 8) a dále jsou popsány všechny vazby mezi jednotlivými prvky.



Obr. 8: Rozložení výrobní buňky UVSSR Cell

Základ buňky tvoří robot ABB IRB 4400 (1) a obráběcí centrum KOVOSTVIT MAS MCV754 Quick (2). Obráběcí centrum je osazeno externí senzorikou a systémem pro sběr dat. K vyhodnocení odchylek obrobků na základě porovnání naměřených hodnot s etalonem slouží měřicí stanice (3). Dále se v rámci buňky nachází stojan na nástroje robotu (4) a zásobník na obrobky (5). Zabezpečení buňky je realizováno pomocí bezpečnostních prvků ABB Jokab Safety (6), pomocí optických závor (6.a, 6.b) a zámků dveří (6.c, 6.d, 6.e). Dle Obr. 8 obsahuje výrobní buňka také CNC soustruh KOVOSTVIT MAS SPM 16 (7), který není součástí automatizovaného robotizovaného pracoviště, proto není po zbytek práce uvažován jako prvek kyber-fyzikálního systému. Kromě výše uvedených prvků obsahuje výrobní buňka řídicí systém a uživatelské rozhraní. Technologické schéma propojení jednotlivých prvků výrobní buňky je zobrazeno na Obr. 9.

Na základě identifikace prvků soustavy, technologického schématu a použití metodiky, konkrétně části *A. Struktura technické soustavy* (Obr. 2) je pak možné definovat vazby mezi jednotlivými prvky.

4.1.1 Vazba TS3

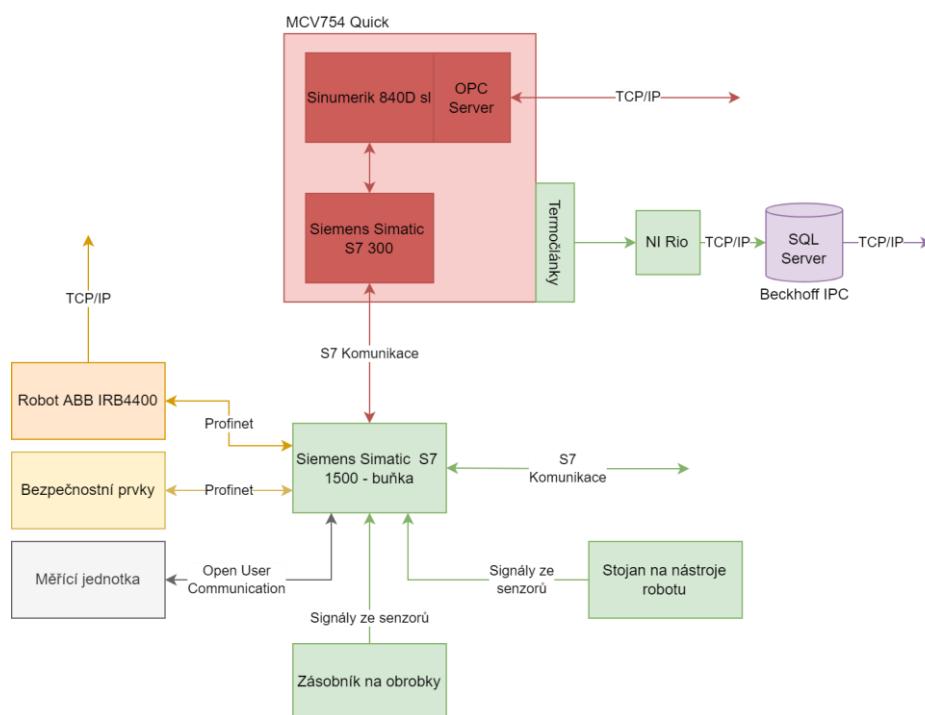
Mezi identifikované prvky technické soustavy řízené pomocí řídicího systému technické soustavy patří obráběcí centrum MCV754 Quick – řídicí systém výrobní buňky (TS3.a), robot ABB IRB440 – řídicí systém výrobní buňky (TS3.b),

bezpečnostní prvky – řídicí systém výrobní buňky (TS3.c) a 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.

4.1.2 Vazba TS4

Mezi identifikovanými prvky technické soustavy je pouze jedno uživatelské rozhraní pro interakci s řídicím systémem technické soustavy, a tím je uživatelské rozhraní výrobní buňky. Jedná se o obousměrnou vazbu sloužící k monitorování a řízení.



Obr. 9 Technologické schéma výrobní buňky UVSSR Cell popisující komunikaci mezi jednotlivými zařízeními

4.1.3 Vazba TS1

Mezi identifikovanými prvky technické soustavy se nachází tři prvky představující senzoriku. Těmito jsou zásobník na obrobky, stojan na nástroje robotu a 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. 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.

4.1.4 Vazba TS2

V kap. 4.1.3 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. Jedná se tedy o vazby zásobník na obrobky – řídicí systém výrobní buňky (TS2.a), stojan na nástroje robotu – řídicí systém výrobní buňky (TS2.b) a termočlánek – sběr dat (TS2.c).

4.2 NÁVRH DIGITÁLNÍHO DVOJČETE PRO PREDIKCI CHYBY PŘESNOSTI NAJETÍ DO POLOHY ZPŮSOBENOU ZMĚNOU TEPLOT

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 [10], [11]. 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.

4.2.1 Definice vstupů a výstupů digitálního dvojčete

Při návrhu je postupováno pomocí vytvořené metodiky konkrétně části *B. Vnitřní struktura digitálního dvojčete* (Obr. 4), podle které jsou nejprve definovány 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.

4.2.2 Modul M1

Vytvořen na základě požadavku na zpracování vstupních dat definovaných v kap. 4.2.1. Při návrhu modulu je postupováno pomocí metodiky na vytvoření modulu (Obr. 7). Modul reprezentuje model teplotního chování stroje, pro jehož popis nejsou známy všechny parametry, 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.

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.

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.

4.2.3 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.

Vazba DD4

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

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.

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.

4.2.4 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

uživatelé a dále umožnit uživateli rozhodnout o správnosti predikovaných chyb. Modul tedy plní funkci rozhodovacího mechanismu na základě uživatelského vstupu.

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.

Vazba DD3

Obousměrná vazba DD3.c mezi modulem M3 a uživatelským rozhraním vytvořena 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.

4.2.5 Modul M4

Vytvořen na základě požadavku modulu M3 na zpracování jeho výstupu. Jedná se o 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.

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.

Vazba DD3

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

4.3 PROPOJENÍ TECHNICKÉ SOUSTAVY A DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

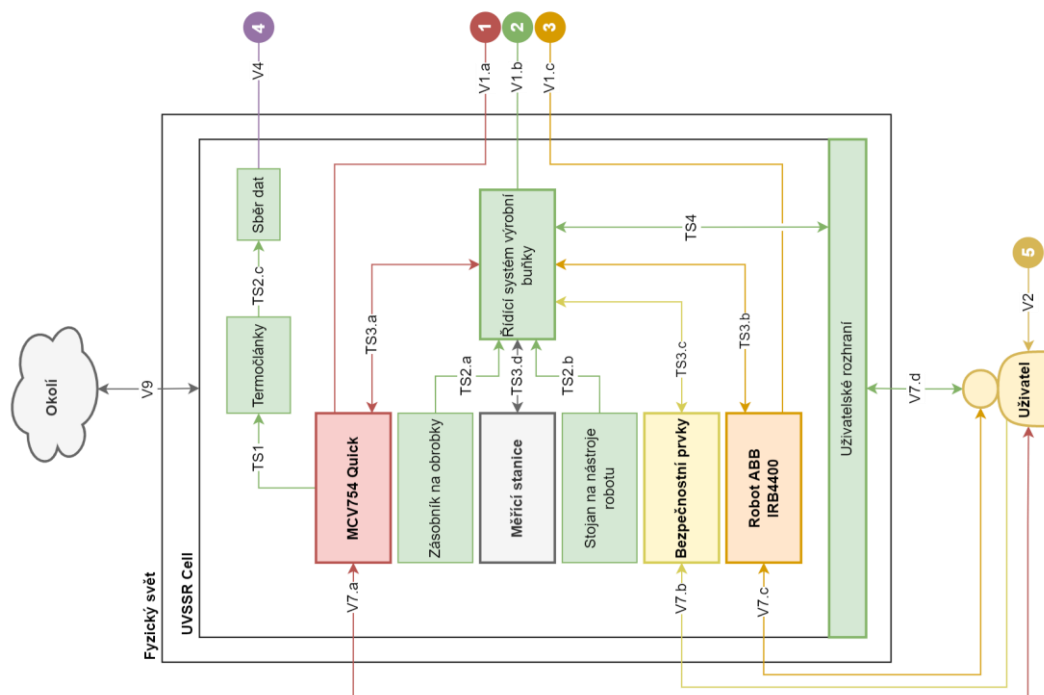
Propojení těchto dvou prvků v kyber-fyzikálním systému je možné určit pomocí metodiky, konkrétně části E. *Vazba mezi technickou soustavou a digitálním dvojčetem* na Obr. 5.

4.3.1 Vazba V1

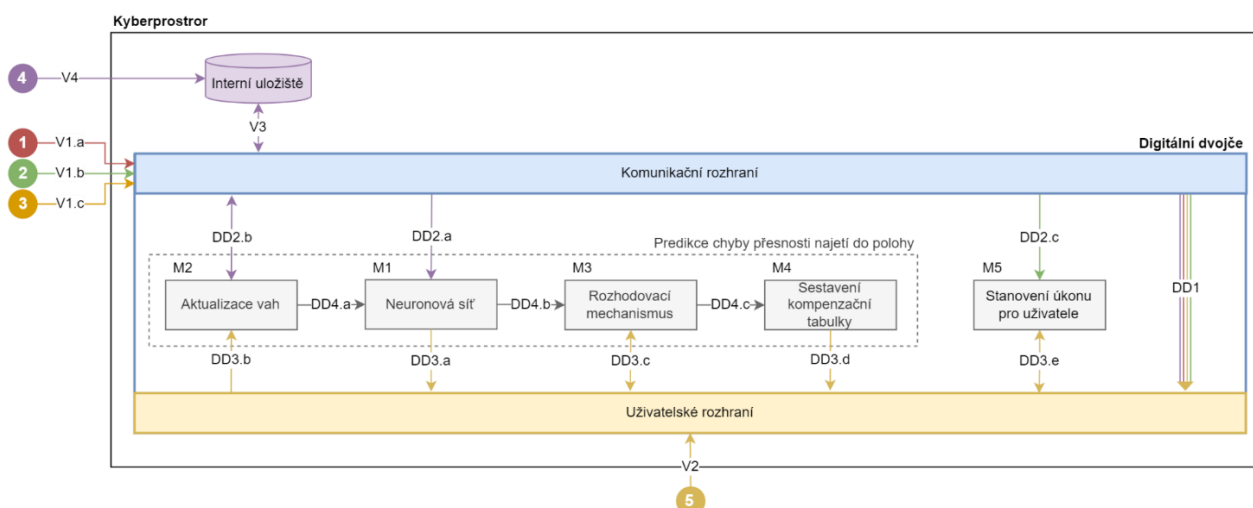
Digitální dvojče implementuje vazbu DD1. Tato vazba slouží mimo jiné k přenosu dat z technické soustavy k uživateli. Konkrétně se jedná o data z obráběcího centra, řídicího systému technické soustavy a robotu. Jedná se o vazby V1.a – jednosměrná vazba pro přenos dat z obráběcího centra MCV754 Quick do digitálního dvojčete, V1.b – jednosměrná vazba pro přenos dat z řídicího systému technické soustavy do digitálního dvojčete a V1.c – jednosměrná vazba pro přenos dat z robotu ABB IRB4400 do digitálního dvojčete.

4.4 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. 10, část kyberprostoru na Obr. 11.



Obr. 10 Schéma kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell – Část A „Fyzický svět“



Obr. 11 Schéma kyber-fyzikálního systému výrobní buňky UVSSR Cell – Část B „Kyberprostor“

5. PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE

5.1 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.

5.2 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.

5.3 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 TOS Čelákovice, Slovácké strojírna a. s., TOSHULIN a. s., FERMAT CZ s. r. o. FOSFA a.s.

V rámci hospodářské soutěže SR132057007 bylo na základě sestavené metodiky navrženo a implementováno digitální dvojče expedice provozu Fosfáty. 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.

Navržená metodika byla také aplikována při řešení hospodářské soutěže SR13857154 s firmou Slovácké strojírny a.s. Na základě sestavené metodiky bylo navrženo digitální dvojče horizontální vyvrtávačky HCW3 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.

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. 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.

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. 4. Implementace tohoto dvojčete je popsána v dizertační práci.

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.

6. 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.

7. LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] T. Marek and J. Marek, *Mít sondu nestačí*. Brno: Renishaw s.r.o., 2017.
- [10] B. Štědroň, *Právo a umělá inteligence*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2020.
- [11] L. Kolaříková and F. Horák, *Umělá inteligence & právo*. Praha: Wolters Kluwer, 2020.

8. ŽIVOTOPIS

OSOBNÍ ÚDAJE **Jiří Kroupa**

 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2896/2, 616 69 Brno (Česká republika)

 +420 541 142 483

 kroupa@fme.vutbr.cz

 <https://www.vutbr.cz/lide/jiri-kroupa-133630>

VZDĚLÁNÍ

Od 2015 **Doktorské studium (Ph.D.)**

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Konstrukční a procesní inženýrství

Téma práce: *Návrh digitálního dvojčete obráběcího stroje*

2013-2015 **Magisterské studium (Ing.)**

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Aplikovaná informatika a řízení

Téma práce: *Návrh ovladače pro PROFINET bus coupler*

2010-2013 **Bakalářské studium (Bc.)**

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Aplikovaná informatika a řízení

Téma práce: *Řízení modelů procesů EDU-mod programovatelným automatem řady S7-1200*

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

Od 2020 **Asistent, ÚVSSR – odbor výrobních systémů a virtuální reality**

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

2017-2020 **Technický pracovník, ÚVSSR – Výzkumné centrum automatické manipulace**

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

2014-2017 **Technický pracovník, Sekce adaptivního řízení**

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

PEDAGOGICKÁ ČINNOST

CEL Elektrotechnika a elektronika

6EE Elektrotechnika a elektronika

VĚDECKO- VÝZKUMNÁ ČINNOST

- Od 2020 Technologie pro digitální dvojče výrobních systémů (FSI-S-20-6335)
- Od 2020 Výzkum a vývoj v oblasti zvyšování kvality výroby velkých obrobků – přesné a opakovatelné ustavení a měření obrobků (FW01010012)
- Od 2019 Národní Centrum Kompetence MESTEC (TN01000071/02)
- Od 2019 Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství (OP VVV DMS SVTPS)
- 2017 Implementace virtuální reality při návrhu výrobních strojů (FV 17-28)
- 2017-2018 Implementace virtuální reality v zobrazování výsledků měření (FAST/FSI-J-17-4566)
- 2017-2020 Zvyšování technické vyspělosti výrobních strojů a zařízení (FSI-S-17-4477)

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.

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.