



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Richard Skýpala

Autoreferát dizertačnej práce

Vývoj modelov správania výrobných systémov v procese virtuálneho uvedenia do prevádzky

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, v skratke PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: Strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, 31. 8. 2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na :

Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ:

Ing. Richard Skýpala
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25 917 24 Trnava

Školiteľ

doc. Ing. Roman Ružarovský, PhD.
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25 917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňao.....hod.

Na Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave, J. Bottu 25, 917 24 Trnava.

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan MTF STU

OBSAH

1	ÚVOD A CIELE PRÁCE	3
2	TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ SIMULÁCIE A VIRTUÁLNEHO UVEDENIA DO PREVÁDZKY PRI VÝVOJI MODELOV SPRÁVANIA VÝROBNÝCH SYSTÉMOV	4
3	KONCEPTUÁLNY RÁMEC VÝVOJA A TESTOVANIA MODELOV SPRÁVANIA PRE VIRTUÁLNE UVEDENIE DO PREVÁDZKY	6
4	PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA A EXPERIMENTÁLNE OVERENIE MODELOV SPRÁVANIA	11
5	EXPERIMENTÁLNE SKÚMANIE ÚROVNE DETAILU MODELU SPRÁVANIA ELEKTROPNEUMATICKÉHO AKTUÁTORA PRE VIRTUÁLNE UVEDENIE DO PREVÁDZKY	17
6	DISKUSIA	22
7	ZÁVER.....	23
7.1	Prínosy pre vedný odbor.....	23
7.2	Prínosy pre prax.....	24
7.3	Prínosy pre pedagogiku	24
7.4	Budúce smerovanie výskumu	24
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	25

1 ÚVOD A CIELE PRÁCE

Virtuálne uvedenie do prevádzky (VC) je moderný prístup využívajúci digitálne dvojčatá na testovanie a validáciu riadiacich systémov. Jeho prínosom je skrátenie času vývoja, zníženie chybovosti a zvýšenie spoľahlivosti. Hlavnou výzvou ostáva rovnováha medzi úrovňou detailu modelov a ich implementačnou náročnosťou, potreba standardizácie a zlepšenie interoperability softvérových nástrojov.

Motiváciou práce je rastúci význam komplexných robotických buniek, ktoré vyžadujú presné modely správania. Ich tvorba je náročná a technologicky limitovaná, čo znižuje efektívnosť využívania VC v praxi.

Hlavným vedeckým cieľom dizertačnej práce je analyzovať možnosti a obmedzenia VC pri návrhu robotizovaných systémov so zameraním na modely správania ako kľúčový prvok digitálnych dvojčiat. Skúmaný je vzťah medzi detailom modelu, kvalitou digitálnej reprezentácie a implementačnou náročnosťou, pričom návrh metodiky a odporúčaní je overený na prípadovej štúdii robotickej bunky a elektropneumatického valca.

Výskum sa sústreďuje na tri otázky: aký je prínos modelov správania pri testovaní a validácii riadiacej logiky, ktoré faktory ovplyvňujú presnosť a spoľahlivosť VC a aký je vzťah medzi detailnosťou modelu, kvalitou výstupov a náročnosťou jeho implementácie. Odpovede vytvárajú základ pre systematické odporúčania a efektívnejšie využívanie VC v priemysle.

Práca je realizovaná metódou Software-in-the-Loop v prostredí Siemens, ktorá umožňuje testovanie PLC kódu a simuláciu interakcií bez fyzického prototypu. Tento prístup je flexibilný a bezpečný, no vyžaduje vysoké programátorské úsilie a výsledky sú viazané na použité nástroje.

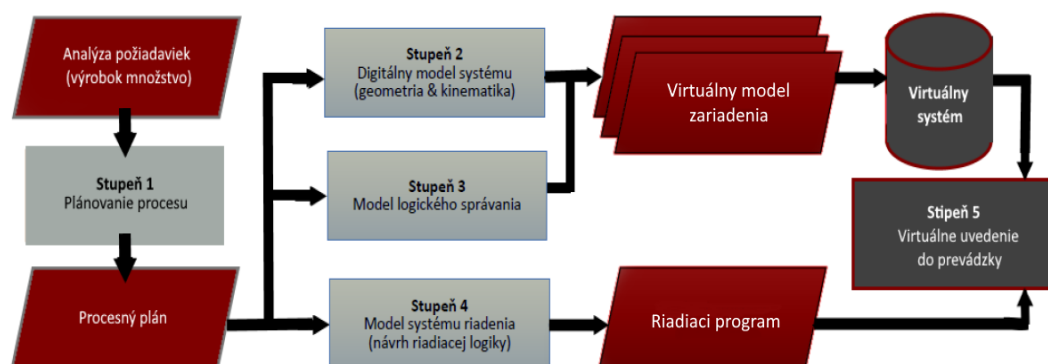
Očakávaným prínosom je prehĺbenie poznatkov o návrhu modelov správania v digitálnych dvojčatách, najmä vo vzťahu medzi ich hĺbkou, kvalitou a implementačnou náročnosťou. Výsledky podporia spoľahlivejšiu validáciu riadiacich logík, systematické rozhodovanie pri tvorbe modelov a širšie využitie VC v priemyselnej praxi bez potreby fyzických prototypov v raných fázach vývoja.

2 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ SIMULÁCIE A VIRTUÁLNEHO UVEDENIA DO PREVÁDZKY PRI VÝVOJI MODELOV SPRÁVANIA VÝROBNÝCH SYSTÉMOV

Simulácia je kľúčovým prvkom digitálneho vývoja výrobných systémov, pretože umožňuje testovanie návrhov bez zásahu do reálnej infraštruktúry. Vytvára základ pre analýzu správania systémov, odhaľovanie chýb a overenie reakcií na rôzne vstupné scenáre ešte pred fyzickým nasadením. Tradičná simulácia sa sústreďuje na optimalizáciu parametrov systému, zatiaľ čo virtuálne uvedenie do prevádzky (VC) ide ďalej – umožňuje testovanie PLC programu v reálnom čase prostredníctvom prepojenia s digitálnym modelom.

VC je definované ako spojenie riadiaceho systému a simulačného prostredia, čím vzniká virtuálne testovacie prostredie schopné odhaliť programové chyby, rozpoznať kolízie a preveriť reakcie systému v prípade porúch. Hlavnými prínosmi sú skrátenie času uvedenia zariadenia do prevádzky, zníženie nákladov na opravy, zvýšenie bezpečnosti a podpora paralelného inžinierstva. Na druhej strane je VC náročné na prípravu presných digitálnych modelov, interdisciplinárnu koordináciu a kvalifikovaný personál.

Z hľadiska architektúry pozostáva VC zo štyroch základných zložiek: riadiaceho programu (PLC), emulačnej vrstvy sprostredkujúcej komunikáciu, modelu správania opisujúceho reakcie komponentov a vizualizácie poskytujúcej 3D spätnú väzbu. Medzi nimi zohráva rozhodujúcu úlohu model správania, ktorý funguje ako most medzi logikou riadenia a fyzickým správaním systému. Jeho presnosť určuje kvalitu validácie riadiaceho kódu a dôveryhodnosť digitálneho dvojčata.

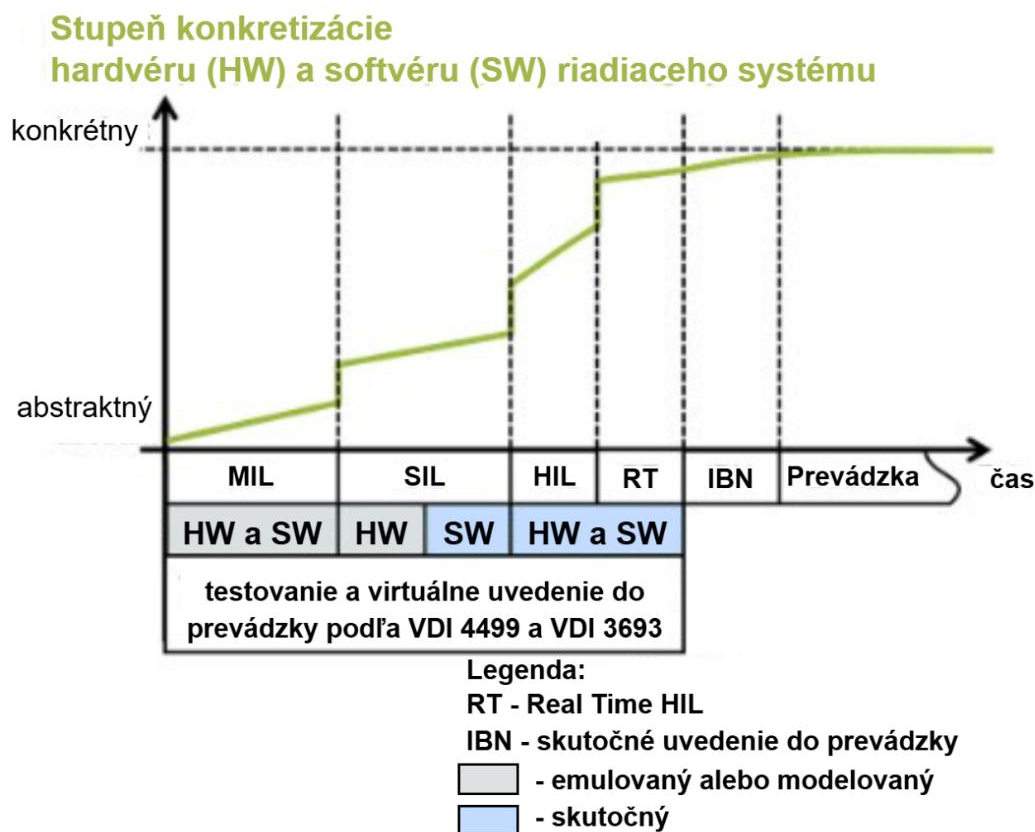


Obr. 1

Modely správania predstavujú formálnu reprezentáciu dynamiky komponentov, časovania a stavových prechodov. Implementujú sa prostredníctvom stavových automatov, funkčných blokov alebo knižníc a umožňujú simuláciu reálnych reakcií vrátane poruchových stavov. V porovnaní s geometrickým modelom, ktorý slúži na vizualizáciu a kontrolu kolízií,

behaviorálny model poskytuje procesnú a logickú funkcionálnu, a teda aj realistickú spätnú väzbu pre PLC.

Význam VC spočíva v tom, že prináša overenie riadiacej logiky bez potreby fyzického prototypu a podporuje digitálnu integráciu v rámci Industry 4.0. Norma VDI rozlišuje tri úrovne testovacích prostredí – Model-in-the-Loop, Software-in-the-Loop a Hardware-in-the-Loop – pričom táto práca využíva predovšetkým metódu Software-in-the-Loop.

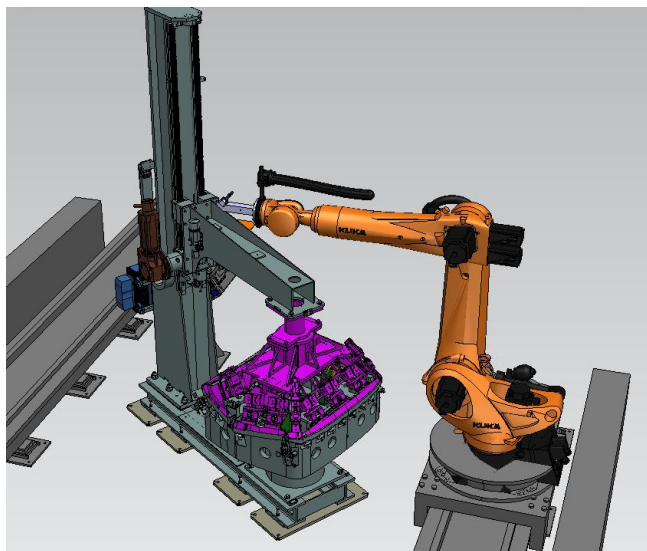


Obr. 2

Záverom možno konštatovať, že tvorba behaviorálnych modelov je dnes jednou z najväčších výziev VC. Hoci existuje množstvo nástrojov, chýba jednotná metodika, typológia aj databáza validovaných modelov. Práve preto je nevyhnutné systematicky rozvíjať rámce pre ich tvorbu, validáciu a opätovné použitie, aby sa VC stalo štandardizovaným a spoľahlivým nástrojom v priemyselnej praxi aj výskume.

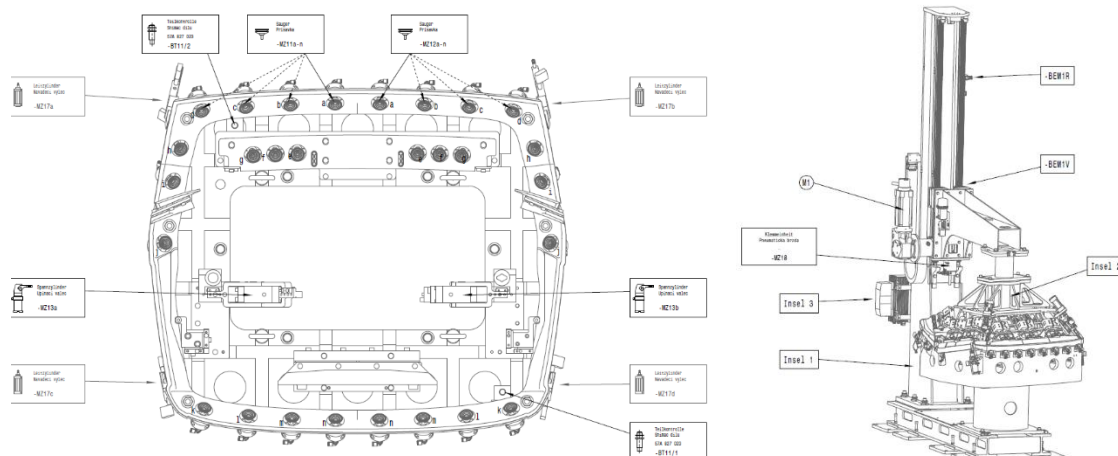
3 KONCEPTUÁLNY RÁMEC VÝVOJA A TESTOVANIA MODELOV SPRÁVANIA PRE VIRTUÁLNE UVEDENIE DO PREVÁDZKY

V rámci výskumu bol vytvorený metodický rámec pre vývoj a testovanie modelov správania, ktorého cieľom je formalizovať kroky potrebné na vytvorenie funkčnej uzavretej slučky medzi PLC a digitálnym modelom zariadenia. Referenčným príkladom pre jeho overenie sa stal upínací prípravok s pneumatickými valcami a vákuovými prísavkami, ktorý kombinuje mechanické, pneumatické a elektrické prvky so snímačmi a riadiacimi obvodmi.



Obr. 3 Robotické pracovisko s priemyselným robotom KUKA a upínacím prípravkom

Takýto prípravok predstavuje reprezentatívny systém využívaný v priemyselnej praxi, a preto umožňuje testovanie interakcií medzi komponentmi, skúšanie rôznych scenárov virtuálneho uvedenia do prevádzky a porovnanie rôznych úrovní detailu pri tvorbe modelov správania.

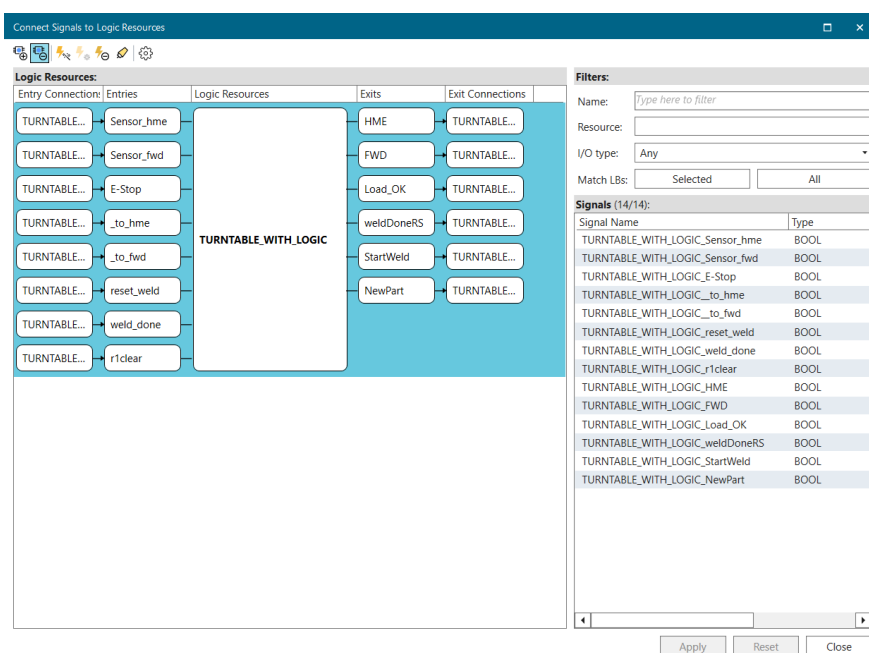


Obr. 4 Detailná štruktúra upínacieho prípravku s vyznačenými funkčnými prvkami

Výskum ukázal, že samotná 3D geometria a kinematika zariadenia nestačia na účely verifikácie riadiacej logiky. Kľúčovým prvkom sa stáva model správania, ktorý dopĺňa digitálny model o emulačnú vrstvu. Jeho úlohou je sprostredkovať reakcie aktuátorov a snímačov na príkazy riadiaceho systému a poskytovať realistickú spätnú väzbu, ktorá umožňuje testovať PLC program v uzavretej slučke. Práve týmto spôsobom sa znižuje riziko chýb pri implementácii a skracuje čas potrebný na uvedenie zariadenia do prevádzky.

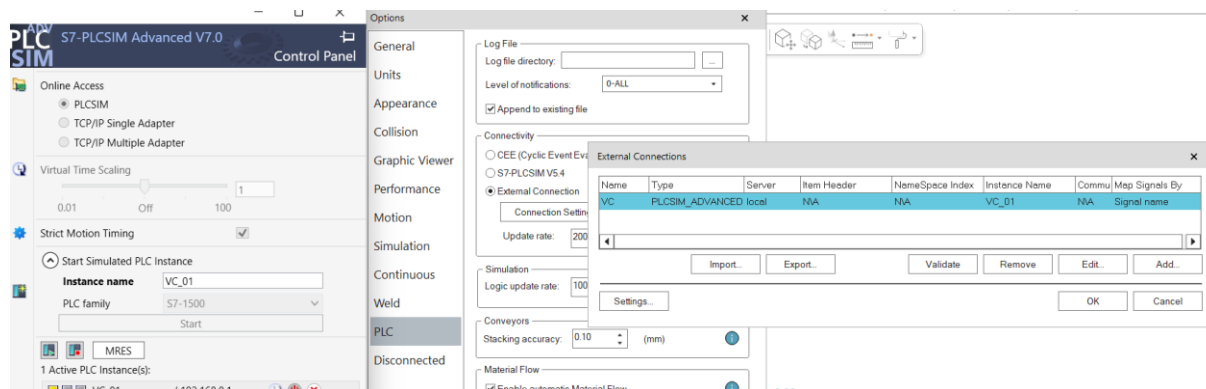
V rámci referenčného systému boli identifikované kľúčové prvky, ktoré ovplyvňujú riadiacu logiku – aktuátory, snímače, väzby a sekvencie činností. Ostatné fyzikálne detaily boli abstrahované, pretože nemajú priamy vplyv na riadenie. Prípravok sa skladal z upínacej časti, ktorá stabilne fixuje diel prostredníctvom pneumatických valcov a vákuových modulov, a polohovacej časti, ktorá umožňuje natočenie obrobku do požadovanej pracovnej polohy. Model správania tak zahŕňal časovanie a dynamiku pohonov, stavové signály snímačov, riadenie vákuových obvodov, reakcie brzdových mechanizmov a logické väzby zabezpečujúce správne sekvencie činností.

Samotný vývoj modelov správania prebiehal v troch krokoch. Najskôr bol pripravený digitálny model so základnou geometriou, kinematikou a parametrami potrebnými na väzbu s PLC. Následne bol vytvorený model správania vo forme stavových automatov, ktoré emulovali reakcie aktuátorov a snímačov, pričom sa sústredili nielen na nominálne činnosti, ale aj na chybové scenáre. Tretím krokom bola integrácia s PLC emulátorom a testovanie, ktoré umožnilo overiť logiku riadenia, identifikovať chyby a optimalizovať trvanie cyklov ešte pred fyzickou implementáciou.



Obr. 5 Priradenie I/O signálov k logickým zdrojom modelu

Významnou súčasťou metodiky bolo zavedenie riadiacej vrstvy digitálneho modelu, ktorá zabezpečuje prepojenie medzi 3D kinematikou a PLC logikou. Prostredníctvom signálov a väzieb sa vytvára regulačný cyklus, ktorý zabezpečuje realistické odozvy. Testovanie bolo realizované metódou Software-in-the-Loop, kde emulovaný riadiaci systém komunikoval s modelmi správania v reálnom čase.



Obr. 6 Prepojenie simulačného modelu s PLC prostredníctvom PLCSIM Advanced

Modely správania boli implementované v jazyku SCL ako funkčné bloky predstavujúce pneumatické valce, vákuové prísavky či snímače. Každý blok generoval spätné signály vrátane časových odoziev a alarmových stavov. Testovacie scenáre pokrývali nominálne cykly, hraničné prípady aj chybové situácie, ako napríklad netesnosť vákuového okruhu alebo zablokovanie pohybu. Výsledky ukázali, že modely poskytujú konzistentnú a realistickú spätnú väzbu, ktorá umožňuje overovať funkčnosť a bezpečnostné reakcie PLC programu bez potreby fyzického zariadenia.

```

SCL Editor - v_0000
15 //
16 REGION M1
17 //
18 //
19 #PE1_Umrichter_betriebsbereit:= true; //START_Inicializace
20 #PE1_IPos_Referenz:= true;
21 #PE1_Ziel_Pos_erreicht:= true;
22 //ABGE1PRE:=;
23 IF #PE2_3_Pos_Ist=1 THEN
24 #BGE1PRE:=true;
25 ELSE #BGE1PRE:=false;
26 END_IF;
27 //
28 END_REGION
29 //
30 REGION ZIEL_POS
31 //
32 IF #F_AE1R THEN
33 #F_AE1Rk:=true;
34 #F_AE1Vx:=false;
35 #F_AE1ZPOS3x:=false;
36 ELIF #F_AE1V THEN
37 #F_AE1Rk:=false;
38 #F_AE1Vx:=true;
39 #F_AE1ZPOS3x:=false;
40 ELIF #F_AE1ZPOS3 THEN
41 #F_AE1Rk:=false;
42 #F_AE1Vx:=false;
43 #F_AE1ZPOS3x:=true;
44 ELSE
45 #F_AE1Rk:=true;
46 END_IF;
47
48 #POSE_ANY:= #F_AE1Rk OR #F_AE1Vx OR #F_AE1ZPOS3x;
49 #F_POS_TP(IN:= #POSE_ANY,PT:=T#3S); //TRANS_COND
50 #F_POS_TON(IN:=#F_POS_TP.Q, PT:=T#2S);
51
52 IF #F_POS_TON.Q THEN
53 #PA2_3_Ziel_Position:=#PE2_3_Pos_Ist;
54 END_IF; *)
55
56 IF #Pos_Ist = #Null_Byte THEN
57 #Pos_Ist:=#Ziel_pos;
58 #POSE_ANY:= FALSE;
59 ELIF #Pos_Ist <> #Null_Byte THEN
60 #POSE_ANY:= TRUE;
61
62 END_IF;

```

Obr. 7 Náhľad SCL editora v Tecnomatix Process Simulate

Integračná architektúra virtuálneho uvedenia do prevádzky bola koncipovaná tak, aby prepojila digitálny model s kinematikou, modely správania a riadiaci systém PLC. Model správania tu zohrával úlohu väzbovej vrstvy, ktorá generovala realistické reakcie na príkazy riadiacej logiky. Validácia bola založená na signálových testoch a simulácii hraničných prípadov, pričom reakčné časy sa porovnávali so skutočnými parametrami zariadenia. Tento prístup potvrdil, že vytvorený systém je schopný spoľahlivo testovať riadiacu logiku a optimalizovať časovanie cyklov ešte pred fyzickým nasadením.



Obr. 8 Fázy vývoja modelov správania pre virtuálne uvedenie do prevádzky

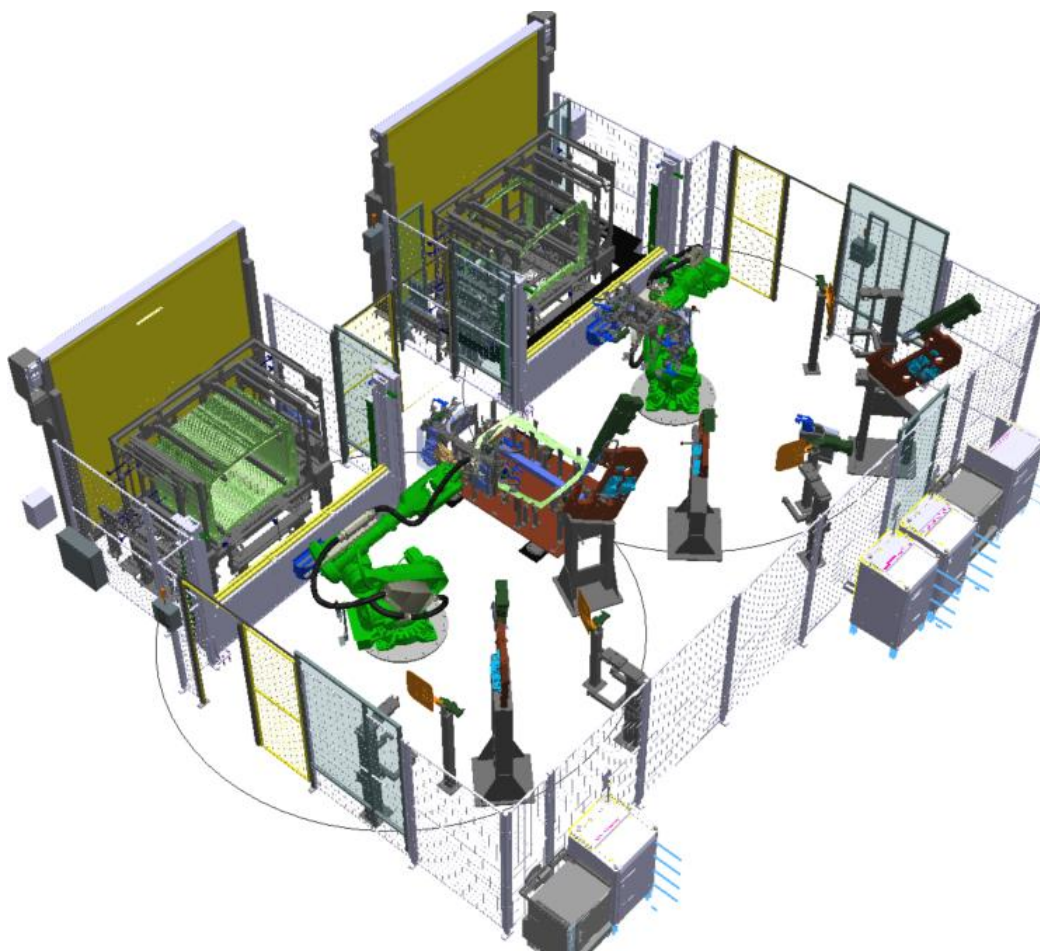
Navrhnutá metodika priniesla viacero prínosov. Znižuje chybovosť pri validácii riadiacich programov, skracuje čas testovania a podporuje opätovné využitie vytvorených modelov v rôznych projektoch. Jej modularita a škálovateľnosť umožňujú aplikáciu od jednoduchých prípravkov až po komplexné výrobné bunky či celé linky. Limitom metodiky je úroveň abstrakcie, pretože sa sústreďuje na správanie a sekvencie, nie na detailnú fyzikálnu simuláciu. V praxi sa ukázalo, že prístup založený na SCL poskytuje vyššiu mieru detailu a flexibilitu, hoci si vyžaduje väčšie implementačné úsilie. Alternatívne prostredia, ako SIMIT,

ponúkajú rýchlejší vývoj a knižnice preddefinovaných blokov, no môžu byť obmedzené pri špecifických komponentoch.

Záverom možno konštatovať, že kľúčovým prvkom virtuálneho uvedenia do prevádzky je práve model správania. Zatiaľ čo geometrický a kinematický model predstavuje iba vizualizačnú vrstvu, model správania premieňa digitálny model na plnohodnotný komponent kyber-fyzikálneho systému. Vytvorené modely umožňujú realistické testovanie a validáciu PLC programov, čím prispievajú k zvýšeniu spoľahlivosti a bezpečnosti robotických buniek a skracujú čas potrebný na ich nasadenie v priemyselnej praxi.

4 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA A EXPERIMENTÁLNE OVERENIE MODELOV SPRÁVANIA

Prípadová štúdia bola zameraná na robotický výrobný systém s priemyselnými manipulátormi a upínacími prípravkami, ktorý predstavuje reprezentatívny príklad z praxe. Jej cieľom bolo demonštrovať možnosti a limity využitia modelov správania pri virtuálnom uvedení do prevádzky (VC).



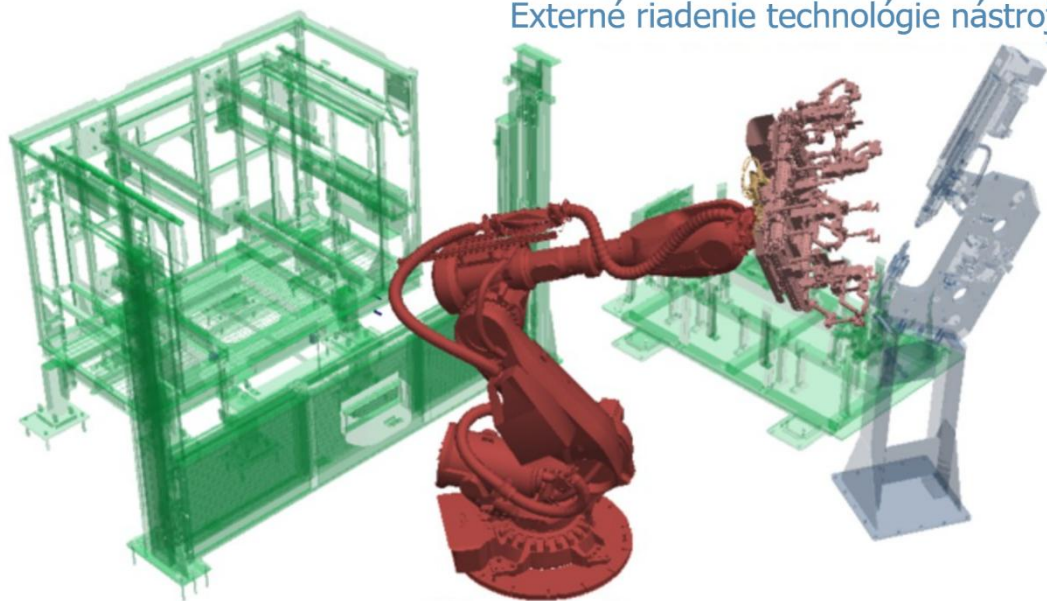
Obr. 9 Robotizovaná výrobná bunka s dvoma priemyselnými robotmi ABB, upínacími prípravkami, nakladacími a vykladacími stanicami, periférnymi zariadeniami a bezpečnostným oplotením

Ako metodický prístup bola zvolená simulácia typu Software-in-the-Loop (SIL), v ktorej sú riadiace algoritmy spúšťané na emulovaných riadiacich jednotkách bez potreby fyzického hardvéru. Tento prístup sa ukázal ako vhodný kompromis pre komplexné systémy s viacúrovňovou riadiacou hierarchiou, typické pre automobilový priemysel, a umožnil flexibilné experimentovanie so scenármi a testovanie logiky riadenia.

Softvérová a komunikačná architektúra bola navrhnutá hierarchicky s centrálnym uzlom v prostredí Siemens SIMIT, ktoré slúžilo na modelovanie správania komponentov, zber a distribúciu signálov a koordináciu celého procesu VC.

Zariadenia riadené PLC

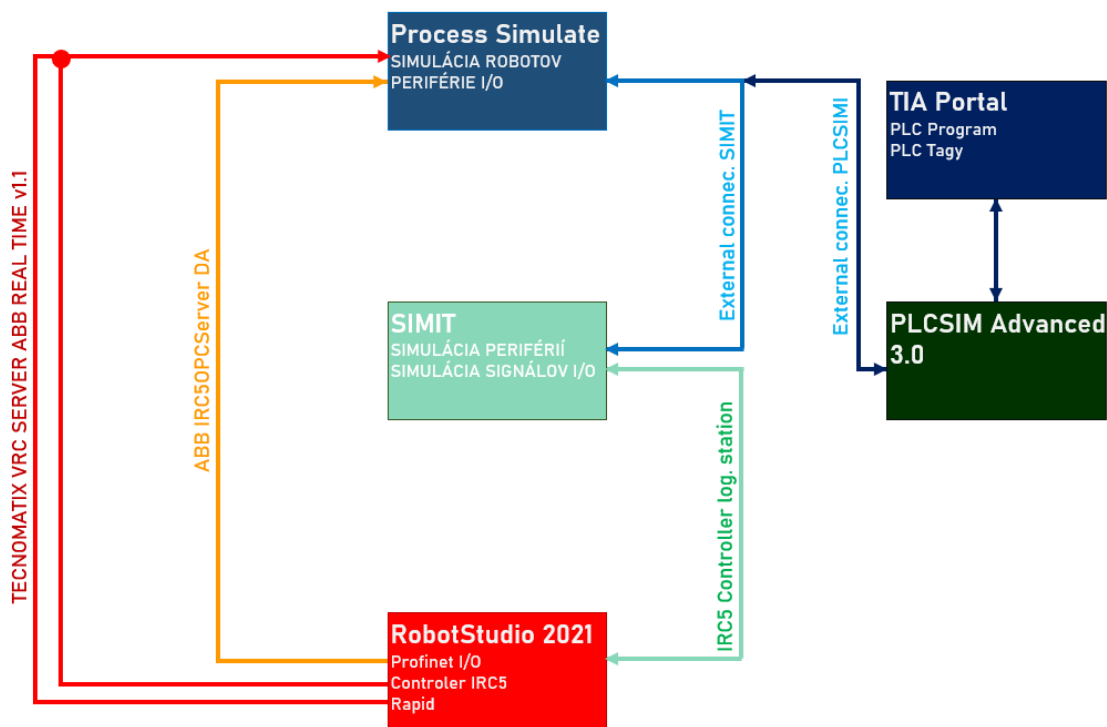
Externé riadenie technológie nástrojov



Kontrolér priemyselného robota

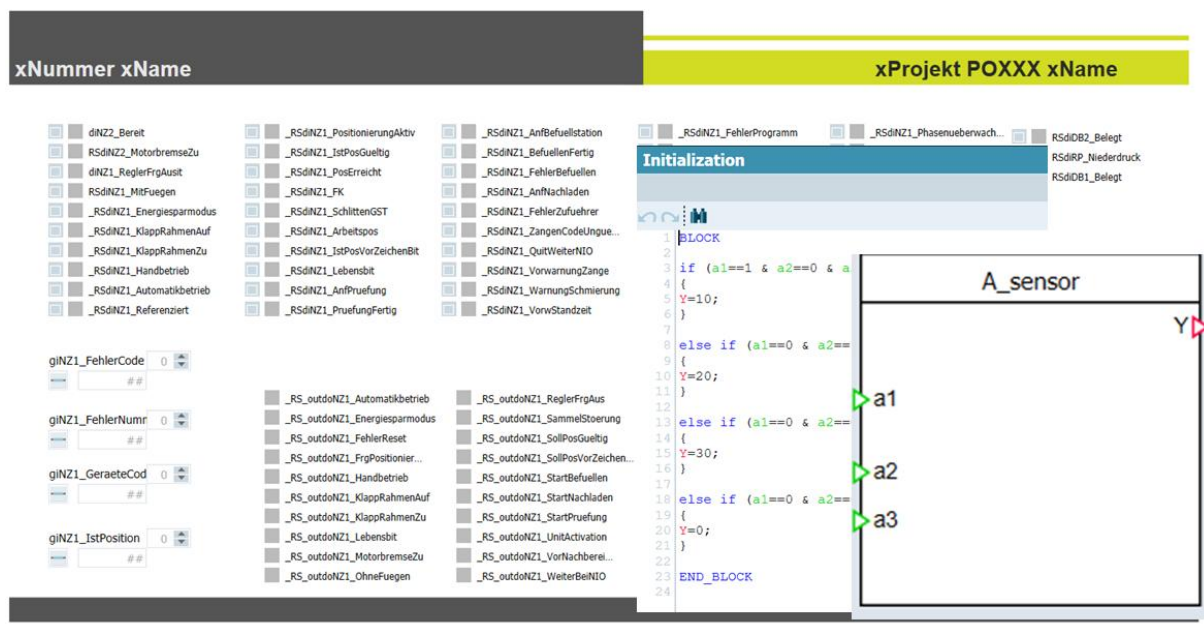
Obr. 10 Grafické rozdelenie komponentov výrobného systému podľa typu ich riadenia

Pre PLC bol použitý emulátor SIMATIC PLCSIM Advanced, robotické riadenie bolo emulované prostredníctvom ABB RobotStudio a vybrané procesné nástroje boli doplnené o špecifické modely správania. Komunikácia medzi systémami bola realizovaná cez OPC, čím sa vytvorila jednotná integračná platforma.



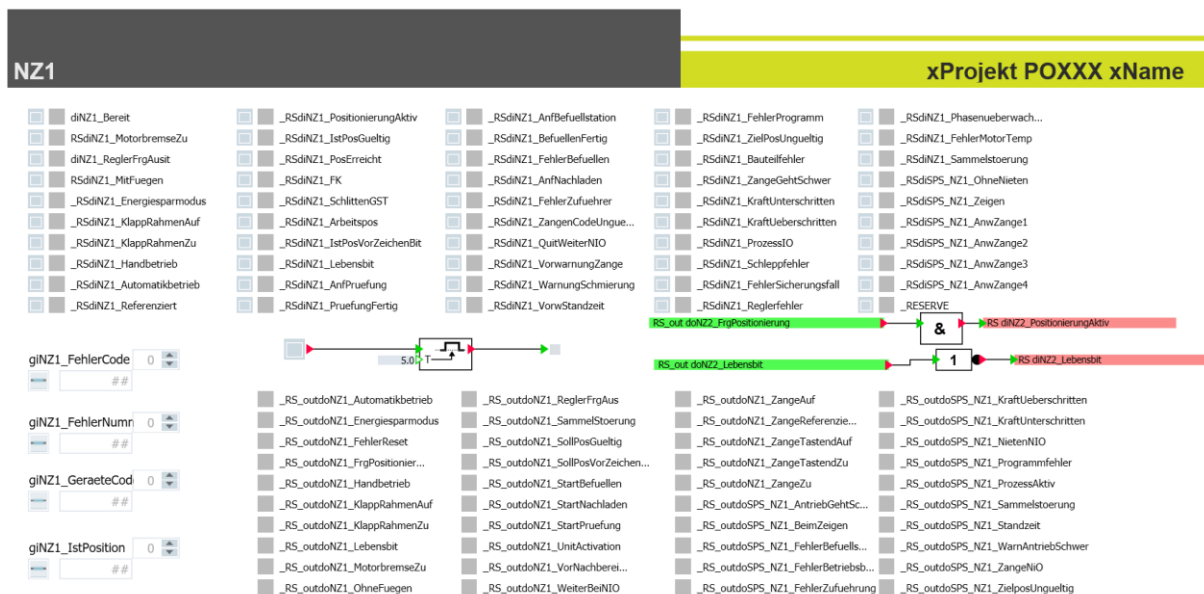
Obr. 11 Navrhnuté softvérové nastavenie pre prípadovú štúdiu

Modely správania boli implementované v prostredí SIMIT prostredníctvom vlastných knižníc vytvorených v nástroji Component Type Editor.



Obr. 12 Využitie SIMIT na ovládanie procesu VC v prípadovej štúdii s náhľadom vytvoreného komponentu pre analógový snímač

Pre jednotlivé komponenty boli definované stavové automaty, časové odozvy a poruchové režimy, čo umožnilo testovať nielen nominálne cykly, ale aj chybové stavy, ako napríklad netesnosti vákuových prísaviek alebo prekročenie časového limitu pri pohybe aktuátorov.



Obr. 13 Modelovanie modelov správania v rámci projektu v prostredí SIMIT

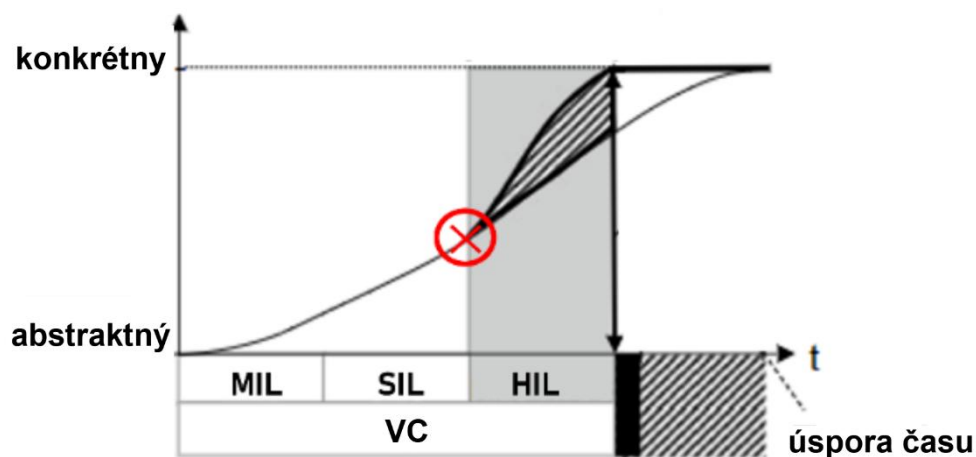
Experimentálne overenie bolo zamerané na rôzne úrovne detailu modelovania a ich prínos voči vynaloženému úsiliu. Výsledky ukázali, že najlepšie sa darilo pokrývať správanie pneumatických komponentov a snímačov, kde sa dosiahla vysoká úroveň konzistencie.

DOSIAHNUTÁ ÚROVEŇ REPREZENTÁCIE SPRÁVANIA KOMPONENTOV



Obr. 14 Úroveň reprezentácie správania komponentov dosiahnutá v rámci experimentálneho modelu

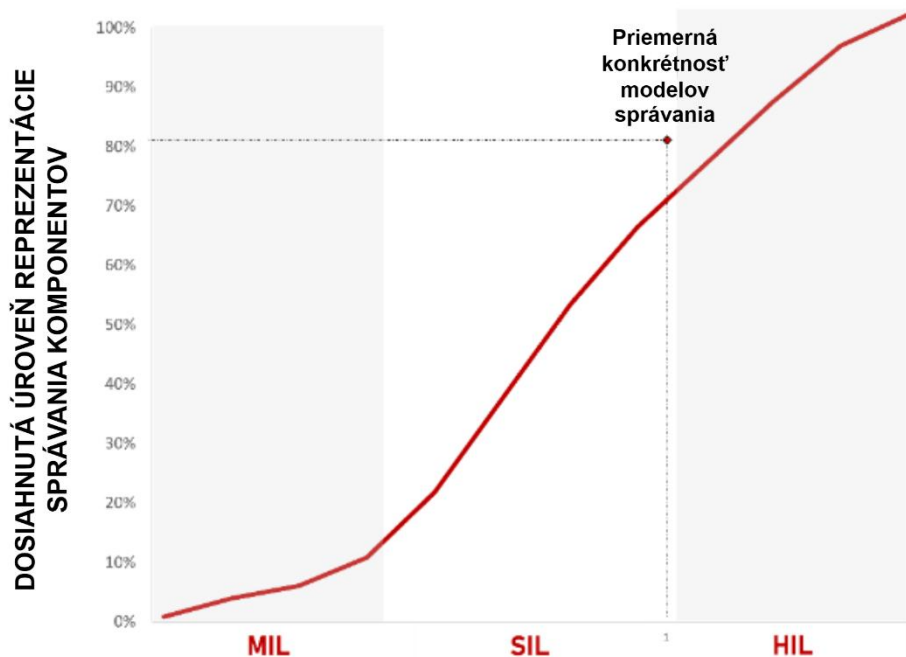
Naopak, najväčšie problémy spôsobovali frekvenčné meniče a elektrické pohony, pri ktorých chýbali štandardizované knižnice a bolo potrebné rozsiahle ručné modelovanie. Priemerná dosiahnutá kvalita modelov správania dosiahla hodnotu približne 80 %, čo zodpovedalo očakávaniam a požiadavkám stanoveným metodikou SIL.



Obr. 15 Schéma úrovní MIL, SIL a HIL v procese virtuálneho uvedenia do prevádzky a ich prínos k úspore času

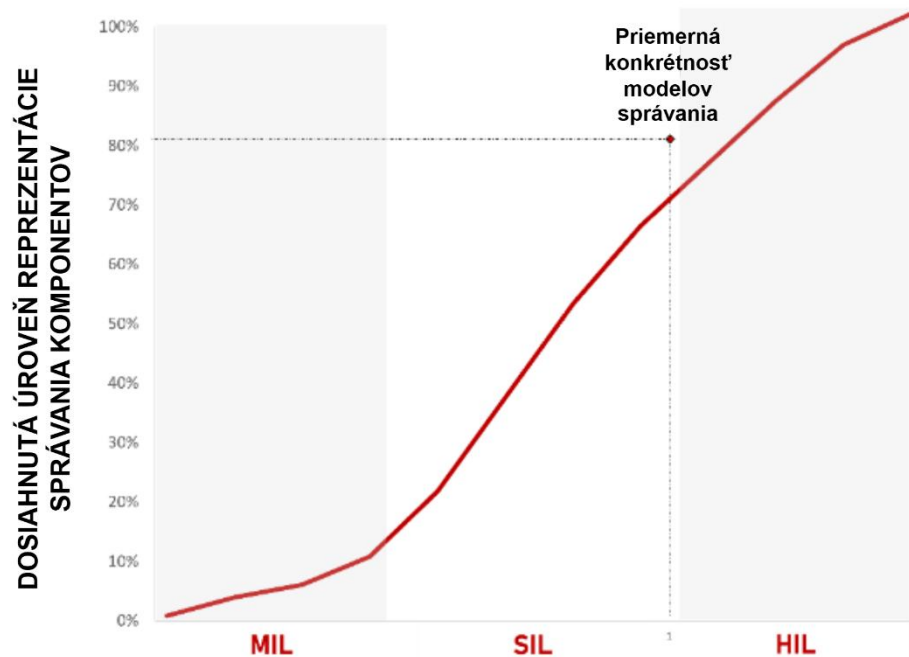
Diskusia potvrdila, že modely správania sú kľúčové pre realistické VC, pretože samotná geometrická a kinematická simulácia neposkytuje dostatočnú spätnú väzbu pre PLC. Zároveň sa ukázalo, že najväčšou výzvou ostáva tvorba kvalitných a štandardizovaných knižníc modelov správania pre zložitejšie elektrické subsystémy a procesné nástroje. Výsledky štúdie majú priamy transferný význam pre prax, napríklad v spolupráci s Porsche Werkzeugbau, kde

sa ukázalo, že knižnice modelov správania môžu výrazne urýchliť uvádzanie digitálnych dvojčiat do výroby.



Obr. 16 Priemerná dosiahnutá úroveň reprezentácie správania komponentov v závislosti od typu simulácie (MIL, SIL, HIL)

Celkovo prípadová štúdia preukázala, že navrhnutá metodika je aplikovateľná na reálne robotické pracoviská, prispieva k skráteniu času uvedenia do prevádzky, zvyšuje spoľahlivosť riadiacich systémov a predstavuje základ pre budúci posun od SIL k robustnému využitiu HIL a následne k digitálnym dvojčatám výrobných systémov.



Obr. 17 Priemerná dosiahnutá úroveň reprezentácie správania komponentov v závislosti od typu simulácie (MIL, SIL, HIL)

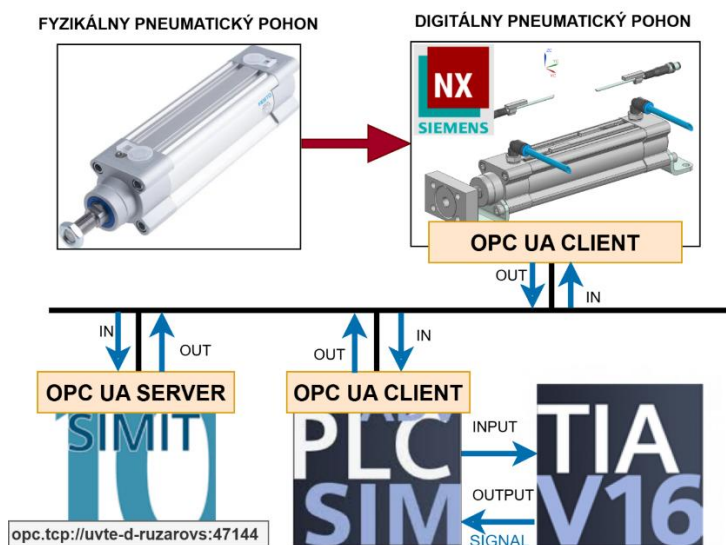
5 EXPERIMENTÁLNE SKÚMANIE ÚROVNE DETAILU MODELU SPRÁVANIA ELEKTROPNEUMATICKÉHO AKTUÁTORA PRE VIRTUÁLNE UVEDENIE DO PREVÁDZKY

Kapitola sa sústreďuje na to, ako úroveň detailu modelu správania ovplyvňuje použiteľnosť virtuálneho uvedenia do prevádzky pri elektropneumatickom aktuátore. Ako reprezentatívny objekt bol zvolený štandardný dvojčinný valec Festo DSBC-32-100, keďže ide o bežný prvok v upínacích prípravkoch aj na linkách a zároveň existuje kvalitná dokumentácia na porovnanie simulácie s očakávaným správaním.



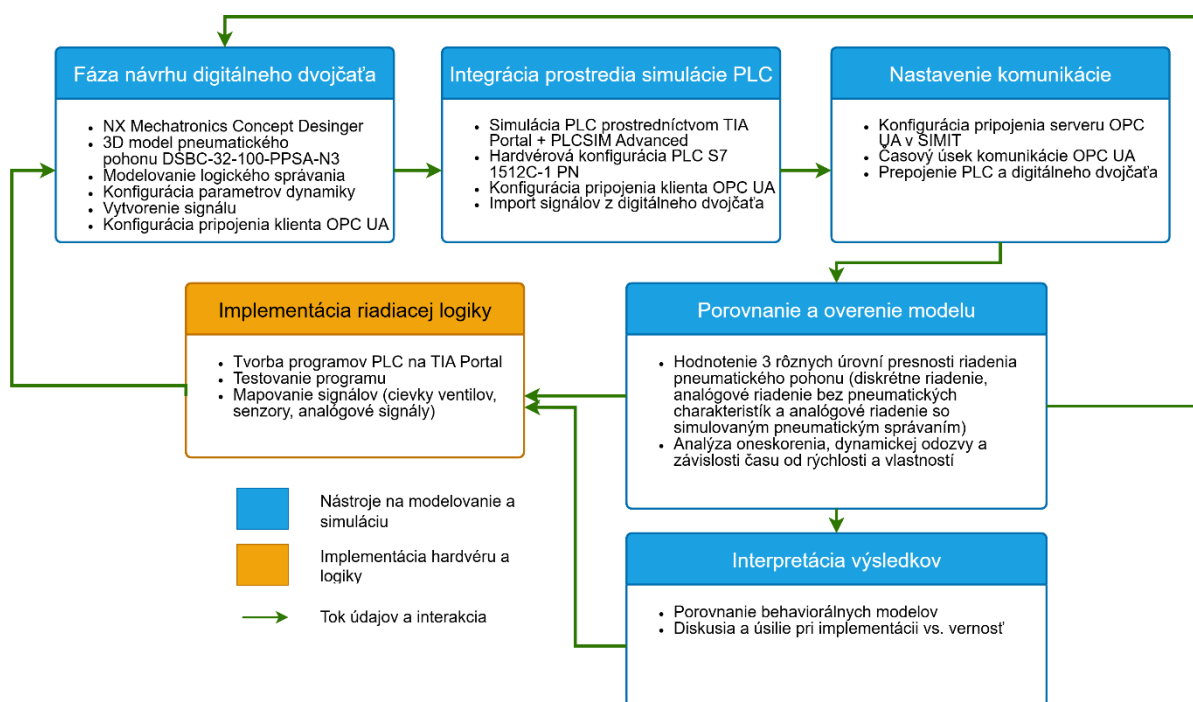
Obr. 18 Štandardizovaný dvojčinný valec podľa normy ISO 15552 DSBC-32-100-PPSA-N3, ktorý sa používa na predmet skúmania a renos 3D modelu vytvoreného pomocou nástroja Festo Design Tool 3D a exportovaného vo formáte NX prt

Experiment prebiehal v architektúre SIL: mechanika a dynamika aktuátora boli modelované v NX Mechatronics Concept Designer, riadiaca logika v TIA Portal s PLCSIM Advanced a správanie (vrátane pneumatických javov) bolo emulované v Siemens SIMIT. Komunikácia prebiehala cez OPC UA, takže sme mali uzavretú slučku PLC ↔ digitálne dvojča, pripravenú aj na prípadný prechod k HIL.



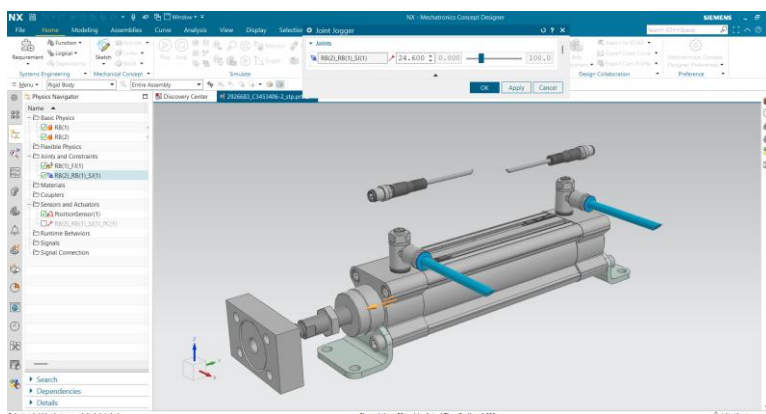
Obr. 19 Navrhnutá architektúra komunikácie VC

Metodika postupovala od návrhu modelu cez integráciu až po experimentálne overenie.



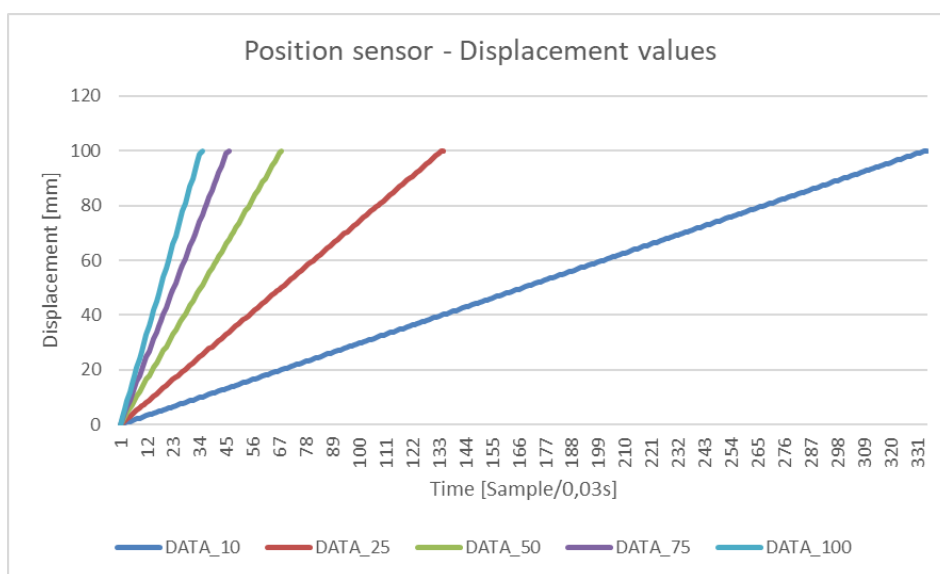
Obr. 20 Prehľad metodického rámca použitého na vývoj, integráciu a overenie digitálneho dvojčata elektropneumatického pohonu. Postup zahŕňa návrh 3D a behaviorálneho modelu v NX MCD, integráciu s prostredím PLC prostredníctvom PLCSIM Advanced, nastavenie komunikácie OPC UA pomocou SIMIT, implementáciu riadiacej logiky a porovnanie rôznych konfigurácií modelu.

Kľúčové bolo pripraviť tri varianty modelu správania s rastúcou mierou vernosti. Najjednoduchší, „diskrétny“ model ON/OFF, priamo prepína koncové polohy bez fyziky – je rýchly na implementáciu a ideálny na overenie sekvencií, bezpečnostných a medzistavových logík. Druhý, analógový model bez pneumatickej dynamiky už umožňuje spojitie riadenie polohy a rýchlosti a pohodlné ladenie základných regulácií, no stále vytvára ideálne, lineárne priebehy bez nábehov a fluktuácií. Tretí model je fyzikálne verný: zohľadňuje tlak, prietok, trenie, spätný tlak a tlmenie v koncových polohách. V praxi to znamená realistické nábehy, mierne kolísanie rýchlosti a asymetrie zdvihov – presne to, s čím sa stretávame na stroji.

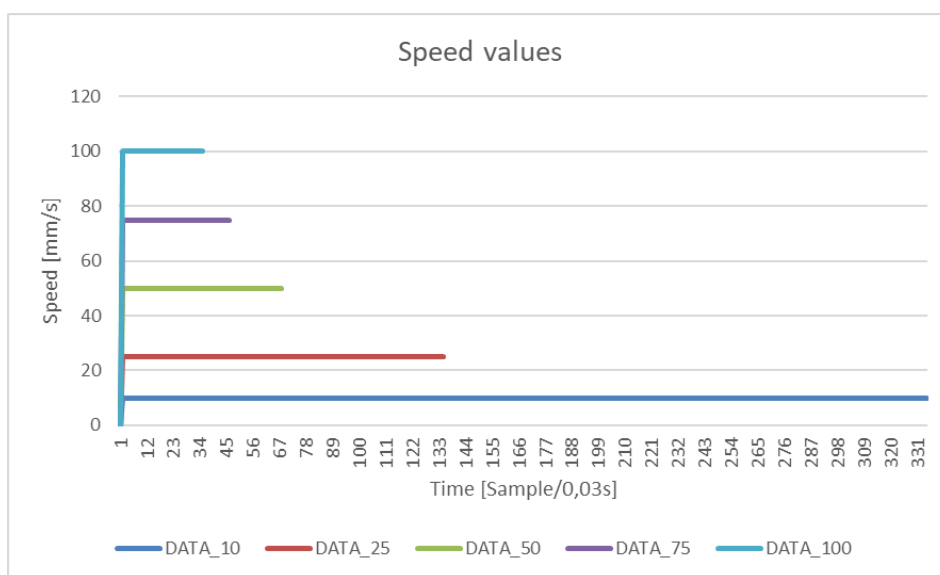


Obr. 21 Import informácií do programu NX Mechatronics Concept Designer vrátane vytvorenia fyzikálneho a kinematického modelu pre digitálne dvojčata.

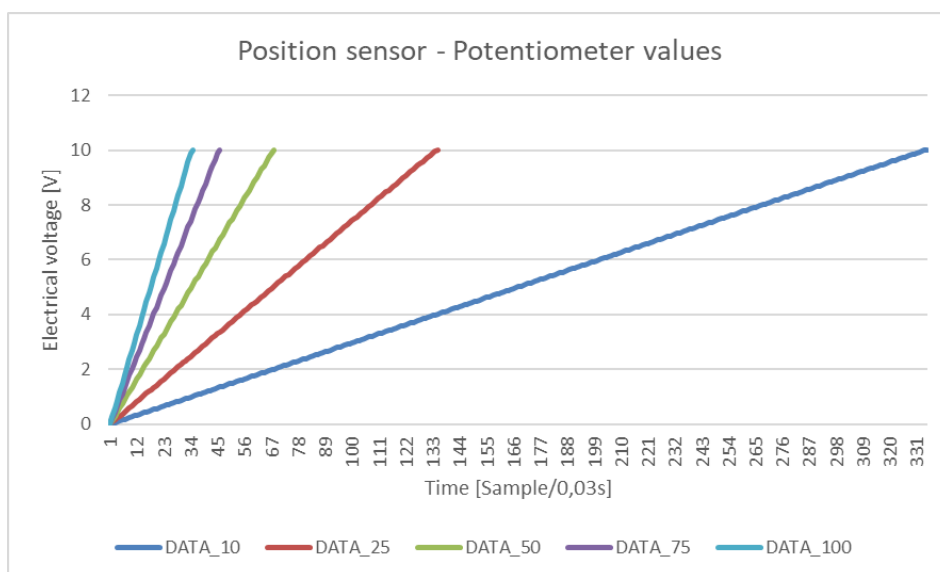
Testovanie prebiehalo tak, že PLC zadávalo požadované rýchlosti a polohy; v simulácii sme zbierali časové rady rýchlosti, polohy, napätia 0–10 V a časových parametrov (nábeh, dĺžka cyklu). Pri diskretnom a „mechanickom“ analógovom modeli boli výstupy presne podľa „učebnice“: rýchlosť aj poloha sa správali ideálne a lineárne, bez oneskorení a výkyvov. Takéto modely sú výborné na rýchle overenie PLC logiky a HMI tokov, ale nehovoria veľa o tom, ako sa bude systém správať pri reálnej pneumatike. Naopak, fyzikálny analógový model ukázal, že pri štarte pohybu rýchlosť nenaskočí okamžite – najprv treba prekonať statické trenie a vybudovať tlak. Počas zdvihu sa prejavujú jemné fluktuácie vplyvom škrtenia a spätnej väzby tlaku, konce zdvihu sú tlmené a celá dráha je mierne asymetrická. Zvyšovanie prírodného tlaku skrátilo nábeh a stabilizovalo rýchlosť, čo je presne to, čo pozorujeme aj na reálnych systémoch.



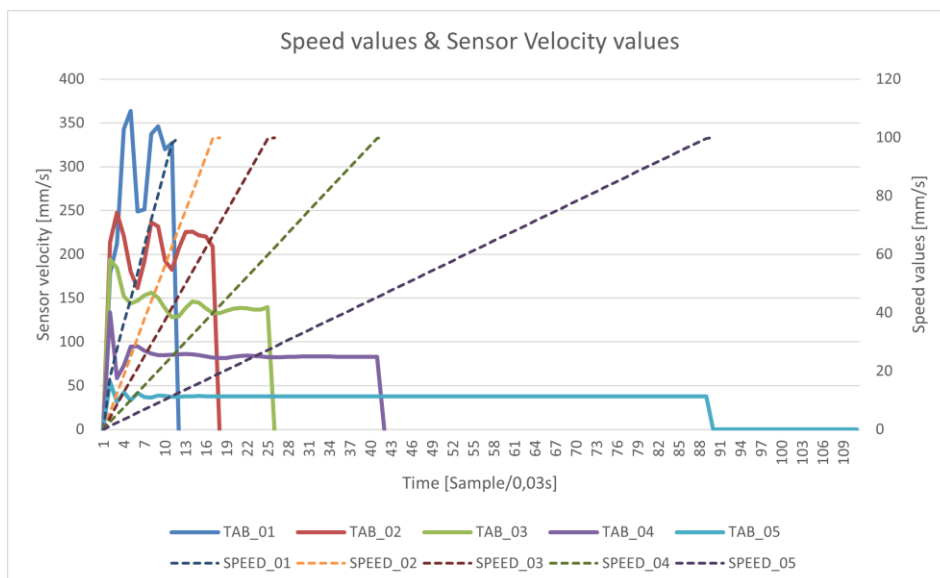
Obr. 22 Profily rýchlosti piestu pri nastavených vstupných rýchlostiach (DATA_10 až DATA_100)



Obr. 23 Časový priebeh posunu piestu pri rôznych rýchlostiach



Obr. 24 Výstup z potenciometra pri pohybe piestu (0-100 mm = 0-10 V)



Obr. 25 Porovnanie požadovaných vstupných rýchlostí (SPEED_01 až SPEED_05) so skutočnými hodnotami rýchlosti piestu nameranými snímačom (TAB_01 až TAB_05) pre analógové riadenie so simulovaným pneumatickým správaním

Z praktického pohľadu z toho vyplýva jednoduché pravidlo. Ak potrebujeme len rýchlo preveriť sekvencie, bezpečnostné stavy, medzizámky a základné HMI, stačí diskretný alebo mechanický analógový model – implementačne sú lacné a spoľahlivo „drátujú“ PLC s digitálnym dvojčat'om. Ak ale riešime časovú optimalizáciu, kvalifikáciu regulácie, interakcie viac pohonov či robustnosť voči chybovým stavom, bez fyziky sa nezaobídeme. Fyzikálny model je najnáročnejší na prípravu aj výpočty, no poskytuje verný obraz o tom, čo sa bude diať po spustení stroja – od nábehov cez variabilitu rýchlosti až po citlivosť na tlak a nastavenia škrtenia.

Za zmienku stojí aj integračná perspektíva. OPC UA vytvorilo stabilnú a škálovateľnú komunikačnú vrstvu – dnes pre SIL, zajtra pre HIL bez toho, aby sa museli zásadne meniť rozhrania. Zároveň sa ukázalo, že pri vysokej miere vernosti rastú nároky na CPU/GPU a dôležité je rozumne voliť simulačné kroky a granularitu modelu, inak hrozia oneskorenia. To je typický kompromis: vyššia presnosť za cenu vyššej zložitosti a výkonu.

Celkový záver kapitoly je teda pragmatický. „Správna“ hĺbka modelu správania nie je univerzálna – volí sa podľa účelu. Pre sekvencie a bezpečnosť má najlepší pomer cena/výkon jednoduchý model; pre dynamiku, časovanie a kvalifikáciu regulácie je potrebný model s fyzikou. Kombinácia NX MCD + SIMIT + PLCSIM v režime SIL sa ukázala ako robustný a opakovateľný rámec, ktorý šetrí čas a riziko pred nasadením na stroji a zároveň je pripravený na prirodzený postup k HIL. Praktický prínos je dvojitý: rýchlejšie a istejšie uvádzanie do prevádzky a jasný metodický kompas, ako ďaleko ísť v detailnosti modelu, aby sa zisk na presnosti nestratil v nákladoch a čase.

6 DISKUSIA

Empirické skúsenosti s implementáciou virtuálneho uvedenia do prevádzky (VC) ukazujú, že okrem technických otázok majú zásadný vplyv aj ľudské, organizačné a ekonomické faktory. Najväčšou prekážkou je nedostatok interdisciplinárnych znalostí – v podnikoch sa simulácia a automatizácia často vnímajú oddelene, čo sťažuje ich integráciu. Problém prehľbuje aj fakt, že tradičné podnikové štandardy obsahujú iba klasické výstupy (výkresy, programy), no chýbajú v nich dáta využiteľné pre VC.

Ďalšou bariérou je nedostatok odborníkov schopných prepájať PLC programovanie, robotiku, simuláciu a komunikáciu riadiacich systémov. Koordinácia viacerých špecialistov je preto časovo aj organizačne náročná. Absencia jednotnej metodiky spôsobuje rozdiely v kvalite VC, ktoré sa pohybujú od základnej emulácie až po takmer plnohodnotné digitálne dvojčatá.

Ekonomický prínos VC je podmienený organizačným nastavením. Ak podniky nemajú VC pevne zakotvené v projektoch, uprednostňujú zaužívané postupy, najmä pre vyššie počiatočné náklady a chýbajúce skúsenosti. Vyššia úroveň si vyžaduje investície do knižníc modelov, štandardov a softvéru (napr. FMI/FMU), čo však firmy často vnímajú ako nadbytočný náklad.

Z praktického hľadiska VC významne znižuje riziká oneskoreného ladenia. Problémy sa odhaľujú vo fáze simulácie, čím sa zosúladujú predstavy konštruktérov a programátorov, testujú sa interakcie riadiacich systémov a pripravujú sa kritické scenáre. Kľúčová je pritom primeraná hĺbka modelu – nie je potrebné detailne modelovať každý komponent, ale zabezpečiť realistické spätné väzby pre PLC. Rozdiel medzi „základným“ a „pokročilým“ VC spočíva práve v kvalite generovaných signálov a reprezentácii neštandardných stavov.

V automobilovom priemysle sa VC využíva najmä ako medzistupeň medzi návrhom a fyzickou realizáciou. Slúži na overenie realizovateľnosti riešenia, odhalenie chýb a prípravu tímov, aj keď nie vždy smeruje k úplnému digitálnemu dvojčat'u. Tento prístup umožňuje rýchlejšie nasadenie, no obmedzuje potenciál VC ako komplexného validačného nástroja.

Zhrnutím možno konštatovať, že úspech VC závisí od štandardizácie postupov, jasne definovaných cieľov a primeranej úrovne detailu. Ak tieto podmienky chýbajú, VC zostáva iba doplnkovým alebo prezentačným nástrojom, no pri systematickom uplatnení prináša skrátenie času uvedenia do prevádzky, zníženie nákladov a zvýšenie spoľahlivosti výrobných systémov.

7 ZÁVER

Realizované testy preukázali, že virtuálne uvedenie do prevádzky (VC) nie je možné uskutočniť bez behaviorálnych modelov. Zatiaľ čo softvérové prostredia ponúkajú základné vizualizačné nástroje, tie nedokážu zachytiť komplexné väzby a dynamiku systémov. Pre praktické využitie VC je preto nevyhnutné vytvoriť model s primeranou úrovňou detailu, ktorý umožní testovanie všetkých relevantných signálov a verifikáciu riadiacej logiky. Tým sa potvrdil vedecký cieľ práce – analyzovať možnosti a limity behaviorálneho modelovania a určiť jeho význam pre efektívne využitie digitálnych dvojčiat.

Výsledky ukázali, že behaviorálne modely sú kľúčovým predpokladom úspešného VC, keďže prepájajú riadiaci kód so správaním systému a umožňujú overovanie funkčnosti ešte pred fyzickou implementáciou. Prípadová štúdia robotizovanej bunky potvrdila ich prínos pri testovaní signálových väzieb a experiment s elektropneumatickým aktuátorom preukázal schopnosť modelu realisticky reprodukovat' dynamiku pohonu.

Analýza ďalej zdôraznila, že úspešnosť VC ovplyvňuje interoperabilita softvérových nástrojov, kvalita vstupných parametrov, správna definícia signálov, dostupnosť výpočtových zdrojov a voľba detailu modelu. Kvantitatívne výsledky ukázali, že zjednodušené modely vykazovali približne 30 % odchýlku, zatiaľ čo detailné modely dosiahli hodnotu pod 10 %. Optimálne sa preto ukázali modely strednej úrovne detailu, ktoré spájajú primeranú presnosť s efektívnosťou implementácie.

Na základe týchto zistení možno konštatovať, že vedecký cieľ práce bol naplnený. Podarilo sa určiť úlohu a prínos behaviorálnych modelov, identifikovať kľúčové faktory presnosti a spoľahlivosti VC a preskúmať vzťah medzi úrovňou detailu, kvalitou výstupov a náročnosťou implementácie. Tieto poznatky vytvárajú rámec pre systematické využívanie VC v priemyselnej praxi a poskytujú odporúčania pre tvorbu digitálnych dvojčiat.

Aktuálne výsledky (Fraunhofer IWU, 2025) zároveň ukazujú, že viac ako 90 % malých a stredných podnikov pozná koncept VC a vníma jeho vysoký potenciál, no jeho uplatnenie je zatiaľ obmedzené. To podčiarkuje potrebu ďalšieho výskumu a metodologickej podpory, ktorú prezentovaná práca priamo rozvíja.

7.1 PRÍNOSY PRE VEDNÝ ODBOR

Dizertačná práca, riešená v rámci odboru strojárstvo, má výrazný medziodborový presah do kybernetiky, automatizácie a informačných technológií. Prináša metodické východiská pre konštruktérov, simulátorov aj programátorov PLC, ktorým umožňuje

efektívnejšiu tvorbu, testovanie a integráciu digitálnych dvojčiat. Výsledky potvrdzujú, že behaviorálne modelovanie je praktický nástroj s vysokým aplikačným potenciálom v prostredí Priemyslu 4.0 a predstavujú základ pre ďalší výskum aj implementáciu v priemyselnej praxi.

7.2 PRÍNOSY PRE PRAX

Dizertačná práca prináša praktické metodické odporúčania pre využitie behaviorálnych modelov vo virtuálnom uvedení do prevádzky. Výsledky preukázali, že iba realistické modely zachytávajúce dynamiku a signálové väzby umožňujú spoľahlivé testovanie PLC logiky a znižujú riziko prestojov. Experimentálne overenie potvrdilo vhodnú úroveň detailu modelu, čo poskytuje priamu oporu pre priemyselné nasadenie digitálnych dvojčiat a zvyšovanie spoľahlivosti a efektívnosti výrobných systémov.

7.3 PRÍNOSY PRE PEDAGOGIKU

Výsledky dizertačnej práce majú priamy prínos pre pedagogickú činnosť, keďže skúsenosti z výskumu boli prenesené do výučby prostredníctvom simulačného prostredia Tecnomatix Process Simulate. Na ich základe vznikli viaceré záverečné práce a pripravujú sa nové predmety zamerané na digitálne dvojčatá a VC. Študenti tak získavajú praktické skúsenosti s tvorbou behaviorálnych modelov, čo posilňuje prepojenie výskumu, priemyselnej praxe a vzdelávania a zvyšuje ich pripravenosť pre moderný priemysel.

7.4 BUDÚCE SMEROVANIE VÝSKUMU

Budúci výskum sa zameria na rozvoj metodík efektívnej tvorby behaviorálnych modelov a ich rozšírenie na pneumatické, hydraulické pohony, robotické efektory a komplexné výrobné systémy. Cieľom bude automatizované prispôbovanie hĺbky modelovania a tvorba flexibilných modelových knižníc využiteľných v rôznych priemyselných doménach. Takto pripravené modely nájdu uplatnenie nielen pri VC, ale aj v oblasti prediktívnej údržby, energetickej optimalizácie a adaptívneho riadenia. Kľúčovou výzvou ostáva štandardizácia a interoperabilita, ktoré podmieňujú ich širšie nasadenie v priemyselných ekosystémoch.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

ALBO, Anton a Petter FALKMAN, 2020. A standardization approach to Virtual Commissioning strategies in complex production environments. *Procedia Manufacturing* [online]. 2020, roč. 51, s. 1251–1258 [cit. 25.7.2022]. ISSN 2351-9789. Dostupné na: doi:10.1016/J.PROMFG.2020.10.175

DAHL, M., A. ALBO, J. ERIKSSON, J. PETTERSSON a P. FALKMAN, 2017a. Virtual reality commissioning in production systems preparation. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* [online]. 2017, s. 1–7 [cit. 26.6.2025]. ISSN 19460759. Dostupné na: doi:10.1109/ETFA.2017.8247581

DAHL, M., K. BENGTSSON, P. BERGAGÅRD, M. FABIAN a P. FALKMAN, 2017b. Sequence Planner: Supporting Integrated Virtual Preparation and Commissioning. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2017, roč. 50, č. 1, s. 5818–5823. ISSN 24058963. Dostupné na: doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.536

DRATH, Rainer, Peter WEBER a Nicolas MAUSER, 2008. An evolutionary approach for the industrial introduction of virtual commissioning. V: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* [online]. B.m.: IEEE, s. 5–8 [cit. 14.2.2021]. ISBN 1424415063. Dostupné na: doi:10.1109/ETFA.2008.4638359

FRAUNHOFER IWU, 2025. *Studie VIBN - SaxoVI* [online] [cit. 29.8.2025]. Dostupné na: https://www.iwu.fraunhofer.de/de/forschung/leistungsangebot/produktion-jetzt/virtuelle-inbetriebnahme-mit-vibn-wertvolle-zeit-sparen/studie-vibn-SaxoVI.html?utm_source=chatgpt.com

HOFMANN, Wladimir, Jan Hendrik ULRICH, Sebastian LANG, Tobias REGGELIN a Juri TOLUJEW, 2018. Simulation and Virtual Commissioning of Modules for a Plug-and-Play Conveying System. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2018, roč. 51, č. 11, s. 649–654 [cit. 14.2.2021]. ISSN 24058963. Dostupné na: doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.392

LEE, Chi G. a Sang C. PARK, 2014. Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. *Journal of Computational Design and Engineering* [online]. 2014, roč. 1, č. 3, s. 213–222. ISSN 22885048. Dostupné na: doi:10.7315/JCDE.2014.021

MAKRIS, S., G. MICHALOS a G. CHRYSSOLOURIS, 2012. Virtual commissioning of an assembly cell with cooperating robots. *Advances in Decision Sciences* [online]. 2012, roč. 2012. ISSN 20903359. Dostupné na: doi:10.1155/2012/428060

MORTENSEN, Steffen Tram a Ole MADSEN, 2018. A Virtual Commissioning Learning Platform. V: *Procedia Manufacturing* [online]. B.m.: Elsevier B.V., s. 93–98 [cit. 14.2.2021]. Dostupné na: doi:10.1016/j.promfg.2018.03.167

REINHART, Gunther a Georg WÜNSCH, 2007. Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. *Production Engineering* [online]. 2007, roč. 1, č. 4, s. 371–379. ISSN 0944-6524. Dostupné na: doi:10.1007/s11740-007-0066-0

SCHEIFELE, Christian, Alexander VERL a Oliver RIEDEL, 2019. Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems. V: *Procedia CIRP* [online]. B.m.: Elsevier B.V., s. 397–402 [cit. 14.2.2021]. Dostupné na: doi:10.1016/j.procir.2019.02.104

STEGMAIER, Valentin Andreas., 2025. Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Digitale Zwillinge: Neue Ansätze und Modelle am Beispiel der Vakuum-Handhabungstechnik. 2025.

STEGMAIER, Valentin, Daniel DITTLER, Nasser JAZDI a Michael WEYRICH, 2022. A Structure of Modelling Depths in Behavior Models for Digital Twins. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* [online]. 2022, roč. 2022-September [cit. 20.8.2025]. ISSN 19460759. Dostupné na: doi:10.1109/ETFA52439.2022.9921645

STRAHILOV, Anton a Felix DAMRATH, 2015. Simulation of the behavior of pneumatic drives for virtual commissioning of automated assembly systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2015, roč. 36, s. 101–108 [cit. 2.7.2024]. ISSN 0736-5845. Dostupné na: doi:10.1016/J.RCIM.2015.01.001

SÜSS, Sebastian, Anton STRAHILOV a Christian DIEDRICH, 2015. Behaviour simulation for Virtual Commissioning using co-simulation. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* [online]. 2015, roč. 2015-October [cit. 23.6.2025]. ISSN 19460759. Dostupné na: doi:10.1109/ETFA.2015.7301427

ZHAO, Jiaqi, El Houssaine AGHEZZAF a Johannes COTTYN, 2024. An AutomationML extension towards interoperability of 3D virtual commissioning software applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2024 [cit. 31.1.2025]. ISSN 13623052. Dostupné na: doi:10.1080/0951192X.2023.2294443

ZOZNAM VLASTNEJ PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

RUŽAROVSKÝ, Roman - HORÁK, Tibor - ZELNÍK, Roman - **SKÝPALA, Richard** - CSEKEI, Martin - ŠIDO, Ján - NEMLAHA, Eduard - KOPČEK, Michal. Development and Validation of Digital Twin Behavioural Model for Virtual Commissioning of Cyber-Physical System. In Applied Sciences. Vol. 15, iss. 5 (2025), art. no. 2859, s. 1-34. ISSN 2076-3417 (**2024: 2.5 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.521 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.438 - AIS, Q2 - AIS Best Q**). V databáze: DOI: 10.3390/app15052859 ; SCOPUS: 2-s2.0-86000588994 ; WOS: 001442342900001 ; CC: 001442342900001.

Ohlasy:

1. [1] ARAYA-SANTELICES, Pablo - MORAGA, Pedro - ATENCIO, Edison - LOZANO-GALANT, Fidel - LOZANO-GALANT, Jose Antonio. BIM-GIS-Based Approach for Quality Management Aligned with ISO 9001. In APPLIED SCIENCES-BASEL. Vol. 15, no. 11 (2025), Registrované v: WOS, CC, SCOPUS
2. [2] ASHOK, S. Human-Machine Collaboration in Semiconductor Processes. In: Journal of Computer Science and Technology Studies, Vol. 7, No. 5, pp: 629-636, ISSN: 2709-104X, 2025
3. [1] RAN, Yawei - YU, Weiwei - WEI, Xubing - GENG, Junhao - LI, Yongkang. Hybrid physics-data driven method for dynamic tool wear prediction. In: JOURNAL OF THE BRAZILIAN SOCIETY OF MECHANICAL SCIENCES AND ENGINEERING, 2025, vol. 47, no. 9, pp. ISSN 1678-5878., Registrované v: WOS, SCOPUS

RUŽAROVSKÝ, Roman - HORÁK, Tibor - **SKÝPALA, Richard** - ZELNÍK, Roman - CSEKEI, Martin - ŠIDO, Ján - NEMLAHA, Eduard - KOPČEK, Michal. Behaviour-Based Digital Twin for Electro-Pneumatic Actuator: Modelling, Simulation, and Validation Through Virtual Commissioning. In Electronics. Vol. 14, iss. 12 (2025), s. 1-23. ISSN 2079-9292 (**2024: 2.6 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.615 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.429 - AIS, Q3 - AIS Best Q**). V databáze: DOI: 10.3390/electronics14122434 ; SCOPUS: 2-s2.0-105008961199 ; WOS: 001515341500001 ; CC: 001515341500001.

SKÝPALA, Richard - RUŽAROVSKÝ, Roman. The role of a behavioural model for the virtual commissioning of robotic manufacturing systems. In Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava. Vol. 30, no. 50 (2022), s. 45-52. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2022-0006.

Ohlasy:

1. [2] TIAN, H. - TIAN, J. - WANG, S. Robot's automatic strategy for fermented grains scooping based on machine vision. In: Food and Machinery, vol. 40 (2024), iss. 3, pp. 110-119. ISSN 1003-5788.
2. [1] BRAZINA, Jakub - STEPANEK, Vojtech - HOLUB, Michal - VETISKA, Jan - BRADAC, Frantisek. Application of Industry 4.0 trends in the teaching process. In: Proceedings of the 2022 20th International Conference on Mechatronics Mechatronika, ME 2022, 2022-01-01, pp., Registrované v: SCOPUS
3. [1] CHEN, Hongbo - ZHENG, Xiaohu - ZHANG, Tengfei - ZHANG, Guanyao. Stability study of robotic drilling system based on digital twin. In: 2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference, PHM-Hangzhou 2023, 2023-01-01, pp., Registrované v: SCOPUS
4. [1] KACZMARCZYK, Václav - BAŠTÁN, Ondřej - MARCON, Petr - JIRSA, Jan - ARM, Jakub - BRADAC, Zdenek - KACZMARCZYKOVÁ, Zuzana. Analysis of requirements for teaching Industry 4.0 topics at universities. In: IFAC-PapersOnLine, 2024-06-01, 58, 9, pp. 293-298., Registrované v: SCOPUS
5. [2] Yogesh, V.S. - Kumar, A. - Jha, S. Development of Digital Twin for Real-Time Monitoring and Virtual Commissioning Applications in an Assembly Line. In: Chakrabarti, A., Suwas, S., Arora, M. (eds) Industry 4.0 and Advanced Manufacturing, Volume 2. I-4AM 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2025.

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

HORÁK, Tibor - STRELEC, Peter - KOVÁČ, Szabolcs - ŠIDO, Ján - **SKÝPALA, Richard** - RUŽAROVSKÝ, Roman. Security Risk Analysis in Computer Networks for Small and Medium-Sized Enterprises. In *Cybernetics and Control Theory in Systems. CSOC 2024. Volume 2*. 1. vyd. Cham : Springer, 2024, S. 627-638. ISSN 2367-3370. ISBN 978-3-031-70299-0 (**2024: 0.166 - SJR, Q4 - SJR Best Q**). V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-70300-3_46 ; **SCOPUS**: 2-s2.0-85208033941 ; **WOS**: 001413910400046.

RUŽAROVSKÝ, Roman - **SKÝPALA, Richard**. A general take on a Tecnomatix Process Simulate's Digital Twin creation and its exchange of information with the TIA Portal and PLC SIM Advanced. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2212, iss. 1: International Conference on Applied Sciences (ICAS 2021), Hunedoara, Romania, May 12-14, 2021, online (2022), s. 1-10. ISSN 1742-6588 (**2022: 0.183 - SJR**). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2212/1/012010 ; **SCOPUS**: 2-s2.0-85127346205.

Ohlasy:

1. [1] DUAN, Lian - LIU, Zhimin - LI, Yibin - SONG, Shihua. Design and Test of Control System of RF Ion Source Test Platform Based on Industrial PLC. In 2022 International Conference on Energy and Electrical Power Systems, ICEEPS 2022. Bristol : IOP, 2023., Registrované v: SCOPUS
2. [1] JAKHOTIYA, Yash - RAHUL, M. R. - CHIDDARWAR, Shital S. Integrating digital twin and computer vision system for efficient pick-and-place operation using Tecnomatix Process Simulate. In: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024-12-01, 18, 10, pp. 7429-7443. ISSN 19552513., Registrované v: SCOPUS, WOS
3. [1] XU, W. - WU, B. - CHEN, D. - HUANG, X. - LI, Z. - ZHANG, K. - SHEN, Y. Construction and Validation of Digital Twin Based Error Compensation Model for Intelligent Production Line. In: 2023 4th International Conference on Information Science and Education (ICISE-IE). Piscataway: IEEE, 2023. ISBN 979-8-3503-9461-0., Registrované v: SCOPUS
4. [1] RIGÓ, Ladislav - FABIANOVÁ, Jana - LOKŠÍK, Milan - MIKUŠOVÁ, Nikoleta. Utilising Digital Twins to Bolster the Sustainability of Logistics Processes in Industry 4.0. In: *Sustainability (Switzerland)*, 2024-03-01, 16, 6, pp., Registrované v: SCOPUS, WOS

5. [2] ZHAO, W. - ZHANG, W. - WANG, M. - WANG, C. - JIANG, H. - LI, D. Optimization of industrial robots off-line programming for grasping tasks. In: Industrial robot, vol. 2 (2023), pp. 34-39.
6. [2] RODRIGUEZ, A. L. - ROCA, S. J. T. - MANSO, J. N. M. - CASAL, A. J. Y. - REGO, A. R. Optimization of the Robotic Process for Welding and Spot-Welding of Brackets in the Manufacturing of Bulkheads Using an Innovative Robotic Gripping and Welding Tool. In: Proceedings of the IV Iberoamerican Congress of Naval Engineering and 27th Pan-American Congress of Naval Engineering Maritime Transportation and Port Engineering (COPINAVAL ICNE 2022 2023). Cham: Springer, 2024. ISBN 978-3-031-49799-5.
7. [2] MANSO, J. N. M. - REGO, A. R. - CASL, A. J. Y. - RODRIGUEZ, A. L. - ROCA, S. J. T. Digital Twin Model Development for Condition-Based Maintenance Assessment in Robotic Manufacturing Processes Within a Shipyard. In: Proceedings of the IV Iberoamerican Congress of Naval Engineering and 27th Pan-American Congress of Naval Engineering Maritime Transportation and Port Engineering (COPINAVAL ICNE 2022 2023). Cham: Springer, 2024. ISBN 978-3-031-49799-5.
8. [1] DEMÉÁK, Jakub - ŽIDEK, Kamil - KRENICKÝ, Tibor. Digital Twin for Monitoring the Experimental Assembly Process Using RFID Technology. In: Processes, 2024-07-01, 12, 7, pp., Registrované v: SCOPUS, WOS
9. [1] KUZNETSOV, Pavel - KOTELNIKOV, Dmitry - VORONIN, Dmitriy - EVSTIGNEEV, Vladyslav - YAKIMOVICH, Boris - KELEMEN, Michal. INTELLIGENT MONITORING OF THE PHYSIOLOGICAL STATE OF AGRICULTURAL PRODUCTS USING UAV. In: MM SCIENCE JOURNAL, 2024, vol. 2024, no., pp. 7772-7781. ISSN 1803-1269., Registrované v: WOS, SCOPUS
10. [1] HECZKO, Dominik - CHLEBEK, Jakub - MLOTEK, Jakub - KOT, Tomáš - SCALERA, Lorenzo - DEKAN, Martin - ZEMAN, Zdeněk - BOBOVSKÝ, Zdenko. Enhancing Data Collection Through Optimization of Laser Line Triangulation Sensor Settings and Positioning. In: Sensors, 2025-03-01, 25, 6, pp., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC

RUŽAROVSKÝ, Roman - **SKÝPALA**, Richard - BLAHUŠIAK, Nikolas - ŠIDO, Ján - CSEKEI, Martin - HORÁK, Tibor - STRELEC, Peter. Virtual Commissioning of Industrial Robot through Software-in-the-Loop Strategies for Cyber-Physical Systems. In CECIIS 2024 : 35th International Scientific Central European Conference on Information and Intelligent Systems, 18-20 September 2024, Varaždin, Croatia. 1. vyd. Varaždin : Sveučilište u Zagrebu. Fakultet organizacije i informatike, 2024, S. 75-82. ISSN 1847-2001.

RUŽAROVSKÝ, Roman - **SKÝPALA, Richard** - ŠIDO, Ján - CSEKEI, Martin - HORÁK, Tibor - STRELEC, Peter. Exploring the Synergy Between CPS and OPC UA in Digital Twin Development: A Comprehensive Research Study. In Cybernetics and Control Theory in Systems. CSOC 2024. Volume 2. 1. vyd. Cham : Springer, 2024, S. 792-804. ISSN 2367-3370. ISBN 978-3-031-70299-0 (**2024: 0.166 - SJR, Q4 - SJR Best Q**). V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-70300-3_58 ; **SCOPUS**: 2-s2.0-85208027485 ; **WOS**: 001413910400058.

SKÝPALA, Richard - RUŽAROVSKÝ, Roman. Virtual commissioning of automated manufacturing systems — Quality-handling station case study. In MATEC Web of Conferences [elektronický zdroj]. Vol. 343, 10th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2021, Sibiu, Romania, June 2-4, 2021 (2021), s. 1-11. ISSN 2261-236X (2021). V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/202134304002.

Ohlasy:

1. [2] BADARUDIN, R. Virtual distributing station sebagai sarana media pemrograman PLC. In: Jurnal Edukasi Elektro, vol. 6 (2022), no. 2, pp. 75-84. ISSN 2548-8260.

SKÝPALA, Richard - ŠIDO, Ján - RUŽAROVSKÝ, Roman - CSEKEI, Martin - HORÁK, Tibor - STRELEC, Peter. Approaches to the Complexity of Virtual Commissioning from the Perspective of Target Requirements. In Machine Learning Methods in Systems. CSOC 2024. Volume 4. 1. vyd. Cham : Springer Nature, 2024, S. 203-217. ISSN 2367-3370. ISBN 978-3-031-70594-6 (**2024: 0.166 - SJR, Q4 - SJR Best Q**). V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-70595-3_22 ; **SCOPUS**: 2-s2.0-85208639426 ; **WOS**: 001437390900022.

P1 Pedagogický výstup publikačnej činnosti ako celok

RUŽAROVSKÝ, Roman - **SKÝPALA, Richard** - ZVOLENSKÝ, Radovan. Mechanizácia a automatizácia. Automatizácia a automatizačná technika. 1. vyd. Trnava : AlumniPress, 2024. 239 s. 16,86AH. ISBN 978-80-8096-308-8.

CELKOVÝ POČET

Vedeckovýskumná alebo tvorivá umelecká aktivita	
Výstupy v kategóriách A+, A, A- a B	9
Výstupy v kategórii A+ a A	6
Ohlasy na publikačnú alebo umeleckú aktivitu	
Ohlasy spolu	19
Ohlasy registrované vo WoS alebo SCOPUS	12

ZOZNAM AKTIVÍT DOKTORANDA

Projekt:

Mladý výskumník STU: Výskum projektovania robotických výrobných systémov metódou implementácie 3D simulačnej technológie Virtual Commissioning. 2021 – 2022

Vývoj modelov správania 318-1/23 Alpha Automation, s.r.o. - Praha 11.8.2023 - 31.8.2023

Člen Rady študijného programu (B-VZS výrobné zariadenia a systémy)

Výučba predmetu:

AVMS03_6I Automatizované výrobné a montážne systémy, 2020-2024

Vedené a obhájené bakalárske práce:

- Ing. Rudolf Bartal: Analýza možností inovácie výroby redukcí pre káblový zväzok zapalovacích cievok TFSI motorov s využitím aditívnej výroby, 2021
- Ing. Richard Branický: Ideový návrh nitovacieho robotického pracoviska, 2022
- Ing. Natália Janiuková: Návrh riadenia a simulácia robotického systému ABB, 2022
- Ing. Matúš Majtán: Návrh a simulácia manipulačného robotického pracoviska, 2022

Odborné stáže:

LLP/Erasmus Česká republika	17.07.2023	17.11.2023
LLP/Erasmus Česká republika	15.04.2024	15.08.2024