



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# VYUŽITÍ NÁSTROJŮ DISKRÉTNÍ SIMULACE PRO VYTVÁŘENÍ DIGITÁLNÍHO DVOJČETE VÝROBNÍHO SYSTEMU

USE OF DISCRETE SIMULATION TOOLS FOR DIGITAL TWIN CREATION

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Jozefovič

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.

BRNO 2024



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Bc. Patrik Jozefovič**  
Studijní program: Aplikovaná informatika a řízení  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Využití nástrojů diskrétní simulace pro vytváření digitálního dvojčete výrobního systému

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Digitální dvojče je digitální (počítačový) model reálného, například výrobního systému, na němž lze simulovat jeho fungování, komunikaci mezi jeho složkami atd. Může se také učit z různých zdrojů a adaptovat na měnící se podmínky (wikipedia). Taková virtuální replika reálných zařízení pomáhá odhalit různé chyby a nesrovnalosti ještě předtím než se daný systém uvede do provozu.

Pojem digitální dvojče se vyskytuje v souvislosti s nástupem programu Průmysl 4.0. Využívá se hlavně ve výrobních závodech, kde dokáže zkrátit dobu zprovoznění nových linek či závodů a umožňuje zvyšovat jejich efektivitu. Při vývoji stroje nebo zařízení se díky digitálnímu dvojčeti vytvořenému ve vhodném simulačním programu zmenší potřebný počet fyzických prototypů. Již vytvořené digitální dvojče se pak dá využít v dalších fázích životního cyklu strojů. Poslouží k analýze výroby, předpoví poruchovost, kalkuluje energetické výdaje i prostoje kdykoliv v průběhu výrobního procesu.

Cílem navrhované práce je vytvořit metodiku pro vypracování digitálních modelů výrobních systémů za využití diskrétní simulace a MES.

### Cíle diplomové práce:

1. Analýza metodiky digitálního dvojčete
  - Popis
  - Funkce
2. Diskrétní simulace jako nástroj pro vytváření digitálního dvojčete
3. Odvádění výroby pomocí MES
4. Zpracování příkladných digitálních dvojčat
  - Metodika vytvoření digitálního dvojčete
  - Odvádění výroby v prostředí digitálního dvojčete
  - Rozvrhování výroby pomocí digitálního dvojčete
  - Výkonové charakteristiky výrobního systému na základě DB digitálního dvojčete

**Seznam doporučené literatury:**

Gopal Chaudhary, et. „Digital Twin Technology“, ISBN: 0367677970, 2021, CRC Press

Shyam Varan Nath Pieter van Schalkwyk Dan Isaacs, „Building Industrial Digital Twins“, ISBN: 1839219076, 2021, Packt Publishing Limited

REMBOLD, U. Computer Integrated Manufacturing and Engineering. Wokingham: Addison-Wesley, 1994, 640 s. ISBN 02-015-6541-2.

MOORE, Ron. Selecting the right manufacturing improvement tools: What tool? When?. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007, xxii, 390 s. ISBN 07-506-7916-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Pavel Heriban, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Digitálne dvojčatá si prešli významným vývojom od ich predstavenia v roku 2002. Postupné rozširovanie schopností a funkcií, ktorými digitálne dvojčatá disponujú, im tak zabezpečilo nenahraditeľné miesto v rámci výrobných systémov dnešnej doby. Táto práca sa preto zaoberá popisom digitálnych dvojčiat, ako aj úrovni automatizácie podnikov, s bližším predstavením výrobného informačného systému, na ktorý má v rámci výrobného podniku digitálne dvojča priamy vplyv. Okrem samotného predstavenia technológie digitálneho dvojčata a blízko súvisiacich technológií Priemyslu 4.0 sa táto diplomová práca ďalej zameriava na tvorbu digitálneho dvojčata vybraného výrobného systému a bližšie predstavenie jeho schopností. Ďalej je praktická časť diplomovej práce doplnená o ukážku možností simulačných nástrojov digitálneho dvojčata v kontexte optimalizácie výrobných procesov. Samotné návrhy na optimalizáciu sú následne nasimulované a výsledky porovnané s počiatočným riešením.

## **ABSTRACT**

Digital Twins have undergone significant development since their introduction in 2002. Gradual expansion of capabilities and functions has secured them an indispensable place within today's manufacturing systems. This work focuses on describing digital twins, as well as levels of enterprise automation. It provides a closer look at the manufacturing execution system as it is directly influenced by digital twins within a manufacturing company. In addition to introducing digital twin technology and related Industry 4.0 technologies, this thesis delves into creating a digital twin for a selected manufacturing system and further explores its capabilities. The practical part of the thesis includes a demonstration of simulation tools for digital twins in the context of optimizing manufacturing processes. Proposed optimizations are then simulated and compared with the initial solution.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

digitálne dvojča, modelovanie, diskretná simulácia, výrobné systémy, kyberneticko-fyzikálny systém

## **KEYWORDS**

digital twin, modeling, discrete event simulation, manufacturing systems, cyber-physical systems





ÚSTAV AUTOMATIZACE  
A INFORMATIKY



2024

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

JOZEFOVIČ, Patrik. *Využití nástrojů diskrétní simulace pro vytváření digitálního dvojčete výrobního systému*. Brno, 2024. Dostupné na: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157673>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, Vedúci práce: doc.. Ing. Simeon Simeonov, CSc.





## **Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela**

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry.

Ako autor uvedenej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následku porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov.

V Brne dňa 24. 5. 2024

.....

Patrik Jozefovič



## **Podakovanie**

Na tomto mieste by som sa chcel v prvom rade podakovať môjmu vedúcemu práce doc. Ing. Simeonovi Simeonovi, CSc. za zabezpečenie softvéru, v ktorom bola praktická časť práce vypracovaná, ako aj za vecné pripomienky a rady v procese tvorby tejto práce. Ďalej by som rád podakoval mojim rodičom za ich podporu a trpezlivosť. Rovnako veľká vďaka patrí aj mojej partnerke, ktorá mi bola veľkou inšpiráciou a mala pre mňa pochopenie aj v náročnejších chvíľach.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Digitálne dvojča</b> .....	<b>17</b>
2.1	Úroveň integrácie digitálneho dvojčata .....	18
2.1.1	Digitálny model .....	18
2.1.2	Digitálny tieň .....	19
2.1.3	Digitálne dvojča .....	19
2.2	Digitálne dvojčatá vo výrobných systémoch .....	20
2.2.1	Vplyv Priemyslu 4.0 na digitálne dvojčatá vo výrobnom sektore .....	21
2.2.2	Aplikácie digitálnych dvojčiat vo výrobných systémoch .....	24
2.3	Využitie digitálnych dvojčiat v ostatných sektoroch .....	27
2.3.1	Digitálne dvojčatá v zdravotníctve .....	27
2.3.2	Digitálne dvojčatá v podnikaní .....	27
2.3.3	Digitálne dvojčatá v letectve .....	27
2.3.4	Digitálne dvojčatá v stavebníctve .....	28
2.3.5	Digitálne dvojčatá v energetike .....	28
2.4	Metodika tvorby digitálnych dvojčiat .....	29
<b>3</b>	<b>Podnikové úrovne automatizácie</b> .....	<b>33</b>
3.1	Model ISA-95 .....	33
3.2	Popis výrobného informačného systému .....	35
3.2.1	Odvádzanie výroby pomocou MES .....	39
3.3	Kľúčové ukazovatele výkonnosti .....	41
3.3.1	ISO 22400 .....	42
3.3.2	Najbežnejšie ukazovatele výkonnosti .....	45
<b>4</b>	<b>Typy simulácií</b> .....	<b>47</b>
4.1	Diskrétna simulácia .....	47
4.2	Spojité simulácie .....	48
4.3	Ostatné druhy simulácií .....	50
<b>5</b>	<b>Praktická časť</b> .....	<b>51</b>
5.1	Rozbor praktickej časti .....	51
5.2	Softvér pre vytvorenie digitálneho dvojčata .....	51
5.3	Podklady pre tvorbu digitálneho dvojčata .....	53
5.4	Metodika tvorby digitálneho dvojčata .....	54
5.4.1	Materiál .....	56
5.4.2	Pracovné zmeny .....	57
5.4.3	Zdroje .....	58
5.4.4	Technologický postup .....	59
5.4.5	Výrobok .....	62

5.4.6	Zákazky . . . . .	63
5.5	Výsledné digitálne dvojča výrobného systému . . . . .	65
5.5.1	Funkcie digitálneho dvojčata v prevádzkovom režime . . . . .	66
5.5.2	Možnosti diskrétnej simulácie v prostredí digitálneho dvojčata . . . . .	69
5.6	Výsledky simulácie výrobného procesu digitálneho dvojčata . . . . .	70
5.7	Overenie a analýza konceptov optimalizácie výrobného procesu . . . . .	73
5.7.1	Výsledky variantu s pridaným montážnym zdrojom . . . . .	74
5.7.2	Výsledky variantu s pridaným zdrojom práčka . . . . .	76
5.7.3	Výsledky variantu s veľkosťou dávky 1250 ks . . . . .	77
5.7.4	Výsledky variantu s veľkosťou dávky 5000 ks . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Záver . . . . .</b>	<b>81</b>
	<b>LITERATÚRA . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV . . . . .</b>	<b>91</b>
	<b>ZOZNAM TABULIEK . . . . .</b>	<b>93</b>

# 1 Úvod

Digitálne dvojčatá sa v priebehu posledných rokov dostávajú do popredia záujmu naprieč rôznymi sférami. Vytvorenie digitálnej kópie, zhromažďujúcej všetky dostupné dáta o fyzickom objekte spolu s dostupnými analytickými nástrojmi na prácu s takýmito dátami, poskytuje výhodu podnikom využívajúcim tieto technológie oproti konkurencii [1]. Tento fakt je ďalej umocnený vzostupom strojového učenia a neurónových sietí. Neurónové siete ako výpočtové modely v rámci digitálnych dvojčiat vedia poskytnúť veľmi presné výsledky a predpovede vývojov, ktoré môžu ešte viac zvýšiť potenciál digitálnych dvojčiat [2].

Najväčšou z oblastí využitia digitálnych dvojčiat je výrobný sektor. Súčasný trend digitalizácie a automatizácie výroby, súhrnne označovaný aj ako štvrtá priemyselná revolúcia alebo Priemysel 4.0, priniesol technológie a koncepty ako napríklad internet vecí (angl. internet of things; IoT) alebo kyberneticko-fyzikálne systémy (angl. cyber-physical systems; CPS), ktoré zabezpečili v rámci tohto sektora jednoduchú integráciu digitálnych systémov, ako aj dostupnosť dát, na ktorých sú digitálne dvojčatá závislé [3].

V rámci automatizácie podnikov, okrem zavádzania nových technológií spomínaných vyššie, bolo potrebné pristúpiť k zmenám v samotnej organizácii podnikov. Jednou z takýchto potrebných zmien bolo navrhnutie architektúry informačných technológií v podniku, ktorá by umožňovala prepojenie medzi všetkými úrovňami podniku, ako sú pracovníci, stroje, manažment a iné. Z tohto dôvodu sa rozhodla Medzinárodná spoločnosť pre automatizáciu (angl. International Society of Automation; ISA) zaviesť štandard ISA-95 s cieľom normalizácie integrácie podnikových systémov. V rámci tohto štandardu je každý podnik rozdelený do piatich úrovní, v ktorých sú vytýčené ciele, po dosiahnutí ktorých je možná automatizácia naprieč podnikom [4]. Na jednej z úrovní operuje výrobný informačný systém (angl. manufacturing execution system; MES), ktorý sa stará o celkové plánovanie a monitorovanie výroby v podniku [5]. S ohľadom na digitálne dvojčatá práve MES a integrácia digitálnych dvojčiat v rámci tejto úrovne umožňuje ich maximálne uplatnenie.

Všetky tieto kroky viedli k rozpoznaní potenciálu digitálnych dvojčiat a ich postupnému zavádzaniu naprieč rôznymi oblasťami vo výrobných podnikoch. V dnešnej dobe existuje celá škála digitálnych dvojčiat od strojov a pracovísk, ktoré pomáhajú s analýzou a optimalizáciou výrobných procesov alebo potrieb údržby, až po celé podniky, v ktorých pomáhajú s prijímaním rozhodnutí o budúcom smerovaní podniku, kontrolujú celkovú energetickú náročnosť alebo zhromažďujú dodávateľské reťazce do jedného celku.

Ďalšou z dôležitých predností digitálnych dvojčiat sú simulačné nástroje, ktoré môžu byť v ich rámci implementované. V kontexte výrobných systémov zohrávajú kľúčovú rolu najmä v oblastiach výrobných procesov, logistiky a dizajnu. Znalosť výrobného systému v podobe matematického alebo iného druhu modelu umožňuje za využitia spomínaných simulačných nástrojov jednoduché simulovanie rôznych scenárov tohto systému. Tieto scenáre sa môžu týkať napríklad rozvrhovania strojov v rámci podnikových priestorov alebo úprav vo výrobných procesoch a odhalenia ich dopadu na chod podniku ešte pred ich samotným nasadením v reálnom prostredí [6].

Predmetom diplomovej práce bude vytvorenie digitálneho dvojčata výrobného systému. V rámci tvorby samotného dvojčata je detailne popísaná jeho metodika v prostredí vybraného softvéru pre tvorbu digitálnych dvojčiat. Následne sú v zostrojenom digitálnom dvojčati predstavené možnosti interakcie s MES, ako aj schopnosti jeho simulačných nástrojov. Výsledky zo simulácie výrobného procesu sú ďalej analyzované a návrhy na optimalizáciu tohto procesu sú predstavené a takisto nasimulované. V závere sú zhodnotené jednotlivé optimalizačné návrhy na základe dát získaných z jednotlivých simulácií týchto prípadov.



## 2 Digitálne dvojča

Koncept digitálneho dvojčata sa od svojej prvej zmienky v roku 2002 značne vyvinul. Vzhľadom na jeho komplexnosť a využitie naprieč rôznymi odvetvami priemyslu je mimoriadne dôležité presne stanoviť, aký je jeho význam a schopnosti. S prihliadnutím na históriu sa digitálne dvojča prvý raz objavilo v podobe digitálneho informatívneho modelu, vytvoreného na základe reálneho pozorovaného subjektu. Takáto digitálna reprezentácia mala obsahovať také množstvo detailov, ktoré bolo možné potenciálne získať podrobným obhliadnutím daného reálneho náprotivku. V pôvodnom znení sa koncept digitálneho dvojčata skôr než na funkcionality zameriaval na presné vykreslenie fyzickej podoby reálneho systému [7]. Až po desiatich rokoch prišli Stargel a Glaessgen s popisom digitálneho dvojčata, ktorý je uznávaný až do súčasnosti. Glaessgen a Stargel opísali digitálne dvojča ako integrovanú multi-fyzikálnu a multi-škálovú pravdepodobnostnú simuláciu komplexného systému, ktorá využíva zároveň najlepšiu možnú fyzickú reprezentáciu daného systému, ako aj všetky dostupné informácie zo senzorov reálneho systému, aby bola schopná čo najlepšie odzrkadľovať život a funkčnosť svojho dvojčata z reálneho sveta [8]. Na rozdiel od svojho prvotného účelu zrkadlenia produktu sa tak digitálne dvojča vyvinulo do podoby, kedy je schopné digitalizovať aj procesy reálneho systému alebo predpovedať výstupy takýchto procesov na základe vstupných parametrov.

V prípade digitálnych dvojčiat výrobných systémov, ktoré sú hlavnou témou tejto diplomovej práce, je podľa definície Stargela a Glaessgena digitálne dvojča virtuálnou reprezentáciou výrobného systému, ktoré komunikuje, prijíma a analyzuje dáta zo svojho reálneho náprotivku. Na základe analýzy dát je následne schopné navrhovať optimalizácie chodu, ktorých vplyv je takisto schopné odsimulovať s využitím svojich simulačných nástrojov a modelu samotného systému. Tento matematický model slúži na čo najpresnejší popis samotného systému. Toto všetko vie zároveň vykonávať počas celej prevádzkovej doby a v reálnom čase [9].

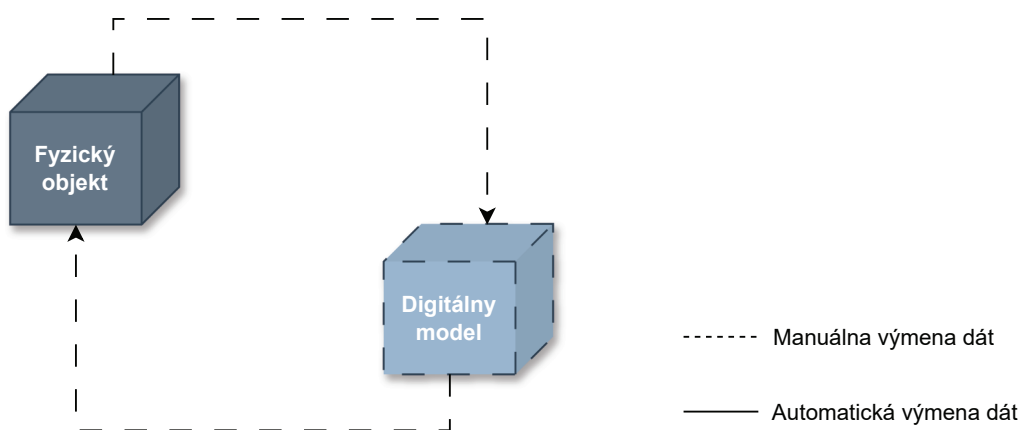
Je takisto dôležité zdôrazniť, že digitálne dvojča nemusí byť vytvorené len na základe existujúceho systému. V dnešnej dobe je čoraz častejšie, že digitálne dvojča predchádza vzniku reálneho systému. Reálny systém potom môže vzniknúť na základe dát dostupných z vytvoreného digitálneho dvojčata. Touto cestou je možné optimalizovať samotný systém ešte vo fáze jeho vzniku, kedy sú úpravy ľahko realizovateľné a nie sú finančne náročné.

## 2.1 Úroveň integrácie digitálneho dvojčata

V princípe je možné uvažovať o digitálnom dvojčati ako o určitej časti patriacej do väčšieho celku. Tento celok pozostáva minimálne z dvoch častí. Konkrétne sa jedná o samotné digitálne dvojča a reálny systém, ktorý je pomocou svojho dvojčata digitalizovaný. Komunikácia a výmena dát tak medzi týmito celkami tvorí dôležitú väzbu, ktorá však môže dosahovať rôzne stupne. Na základe úrovne výmeny dát medzi spomínanými časťami je možné definovať tri podkategórie digitálnych dvojčiat.

### 2.1.1 Digitálny model

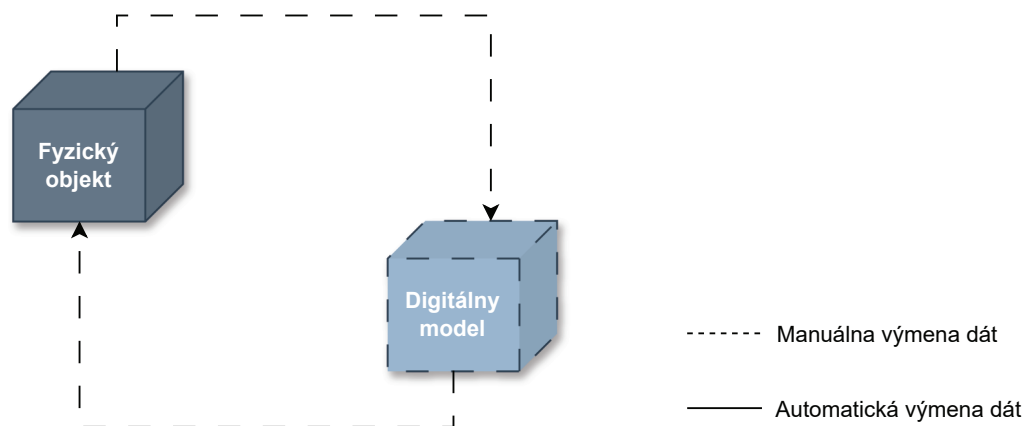
Digitálny model sa najviac približuje pôvodnej definícii digitálneho dvojčata. Jedná sa o digitálnu reprezentáciu existujúceho alebo plánovaného fyzického objektu. Táto digitálna verzia môže mať rôznu úroveň komplexnosti, od jednoduchého matematického modelu, až po prepracovaný 3D model systému. Charakteristickým rysom všetkých digitálnych modelov je, že nedochádza k žiadnej automatickej výmene dát medzi modelom a fyzickým objektom. To má za následok fakt, že zmena stavu reálneho objektu sa nijako neprejaví na stave jeho digitálnej kópie. V prípade potreby aktualizácie stavu digitálneho modelu je tak nutné túto zmenu vykonať manuálne. Podobne, akákoľvek úprava digitálnej podoby nemá žiaden vplyv na existujúci reálny objekt, pokiaľ nie je manuálne reálny objekt upravený. Typickými príkladmi digitálnych modelov sú napríklad modely dizajnu produktov vytvorené v niektorom zo základných CAD programov, ako je AutoCAD alebo Solidworks. Tieto modely majú za úlohu len vizualizovať produkt pred jeho výrobou alebo na účely propagácie. Ďalším príkladom môžu byť napríklad digitálne mapy, ktoré sú vo svojej podstate digitálnym modelom fyzických lokalít. Všetky tieto príklady spája fakt, že akákoľvek zmena v reálnom prostredí sa nepremietne do ich digitálnej verzie až do momentu, pokiaľ ju tam niekto nepridá [10].



Obr. 1: Ukážka dátového toku v digitálnom modeli, vlastná tvorba podľa [10]

### 2.1.2 Digitálny tieň

V rámci úrovne integrácie je digitálny tieň vyššou úrovňou digitálneho modelu. Na rozdiel od digitálneho modelu, pri digitálnom tieni prebieha automatický tok dát jedným smerom, a to z reálneho objektu do digitálneho tieňa. Tok opačným smerom ostáva stále manuálny. To má za následok automatickú aktualizáciu statusu digitálnej kópie, ktorá odráža aktuálny stav reálneho objektu. V rámci priemyslu je najčastejšie využitie digitálnych tieňov v rámci kyberneticko-fyzikálnych výrobných systémov (angl. cyber-physical production systems; CPPS). CPPS, spoločne s industriálnym internetom vecí (angl. industrial internet of things; IIoT), vytvárajú ideálne prostredie na výmenu dát a následnú tvorbu digitálnych tieňov jednotlivých výrobných systémov. Takéto systémy sú schopné prijímať cez IIoT sieť dáta zo senzorov jednotlivých strojov a na základe týchto dát kontrolovať ich celkový chod. Ďalším príkladom využitia digitálnych tieňov je napríklad zdravotníctvo, kde sa využíva digitálny tieň pacientov. Dáta ohľadom medikácie alebo zdravotného stavu pacienta sú automaticky odosielané do digitálneho tieňa konkrétneho pacienta, avšak akúkoľvek zmenu v liečbe pacienta je nutné vykonať manuálne [10, 11]. Na základe prieskumu z [10] vyplýva, že práve digitálne tieňe sú v praxi najviac zastúpenou kategóriou digitálnych dvojčiat s ohľadom na ich úroveň integrácie. Podiel digitálnych tieňov tvorí 35 %.

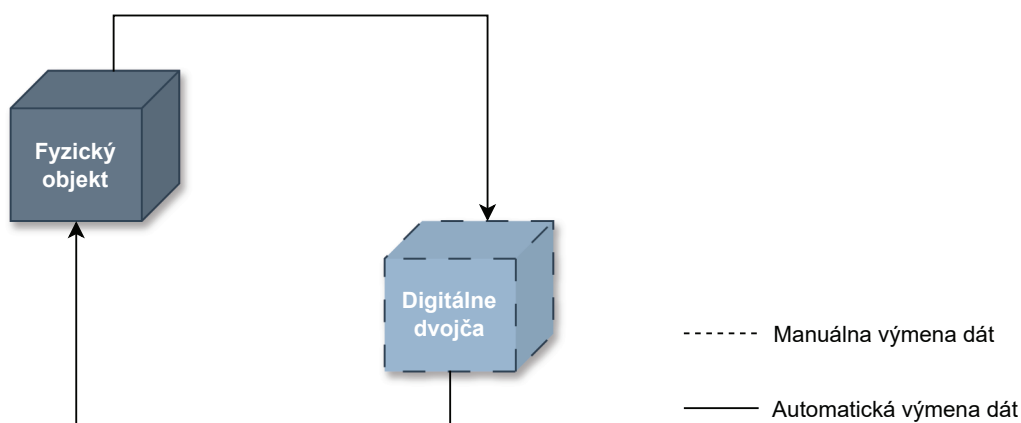


Obr. 2: Dátový tok v digitálnom tieni, vlastná tvorba podľa [10]

### 2.1.3 Digitálne dvojča

Digitálne dvojčatá sú najvyššou úrovňou v rámci dátovej integrácie. V ich prípade dochádza k automatickému dátovému toku obojsmerne. To v praxi znamená, že rovnako ako vie reálny systém zasielať dáta svojmu digitálnemu dvojčaťu, vie aj digitálne dvojča zasielať dáta reálnemu systému. Dáta od digitálneho dvojčata reálnemu systému môžu mať podobu napríklad úprav jeho parametrov tak, aby

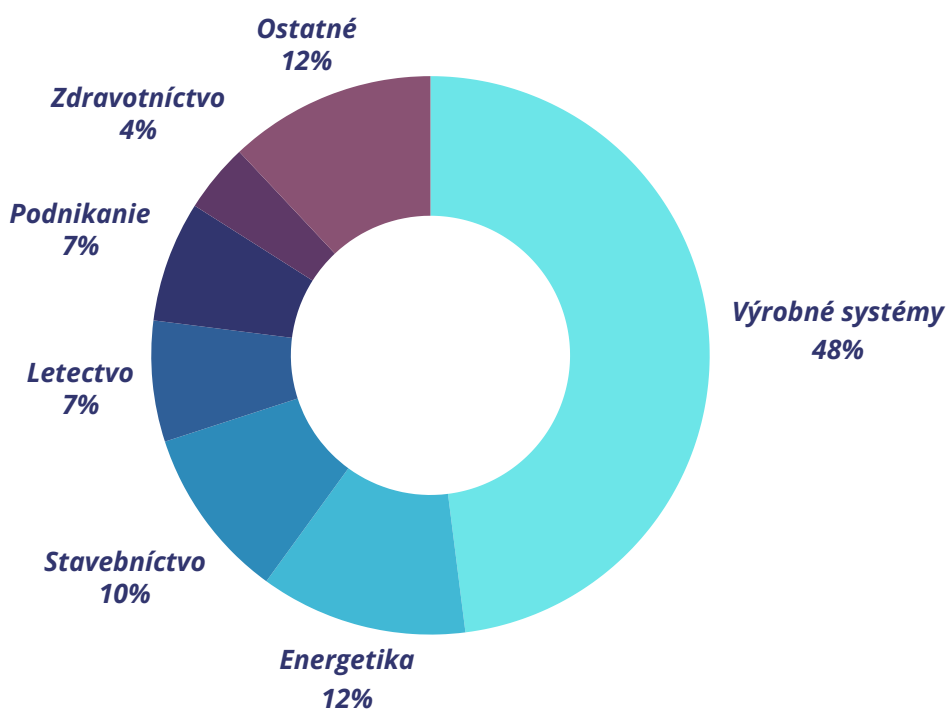
sa zefektívnil chod daného systému. Takéto digitálne dvojčatá nachádzajú svoje uplatnenie v rôznych sektoroch, kde sú využívané na špecifické účely. Využitie digitálnych dvojčiat môžeme nájsť napríklad pri výrobných linkách, v letectve, robotike alebo pri výstavbe a rozvoji miest [11, 12].



Obr. 3: Dátový tok v digitálnom dvojčati, vlastná tvorba podľa [10]

## 2.2 Digitálne dvojčatá vo výrobných systémoch

Po predstavení jednotlivých úrovní integrácie digitálnych dvojčiat je možné prejsť k ich samotnému aplikačnému využitiu. Na základe výskumov [13, 14] ohľadom modelovania digitálnych dvojčiat, ktoré analyzovali zastúpenie digitálnych dvojčiat v rôznych odvetviach, vyplýva, že takmer polovica všetkých aplikácií digitálnych dvojčiat sa týka práve výrobného sektora. Takto silné zastúpenie v tejto oblasti je spôsobené najmä tým, že výrobný sektor bol jedným z prvých prostredí, kde sa začali digitálne dvojčatá objavovať. Ďalším z faktorov, ktorý napomáha ich obľube práve vo výrobnom sektore, je široká škála možností využitia tejto technológie v danej oblasti. Správna aplikácia a pochopenie účelu digitálnych dvojčiat pomáha podnikom s optimalizáciou ich výrobných procesov a zlepšením kvality ich produktov, čo prispieva k zvyšovaniu ich konkurencieschopnosti. V nasledujúcej časti tak budú predstavené konkrétne príklady využitia digitálnych dvojčiat naprieč výrobnými systémami. Spoločne s tým budú popísané technológie, ktoré sa do najväčšej miery pričinili na ich úspechu práve v tejto oblasti.



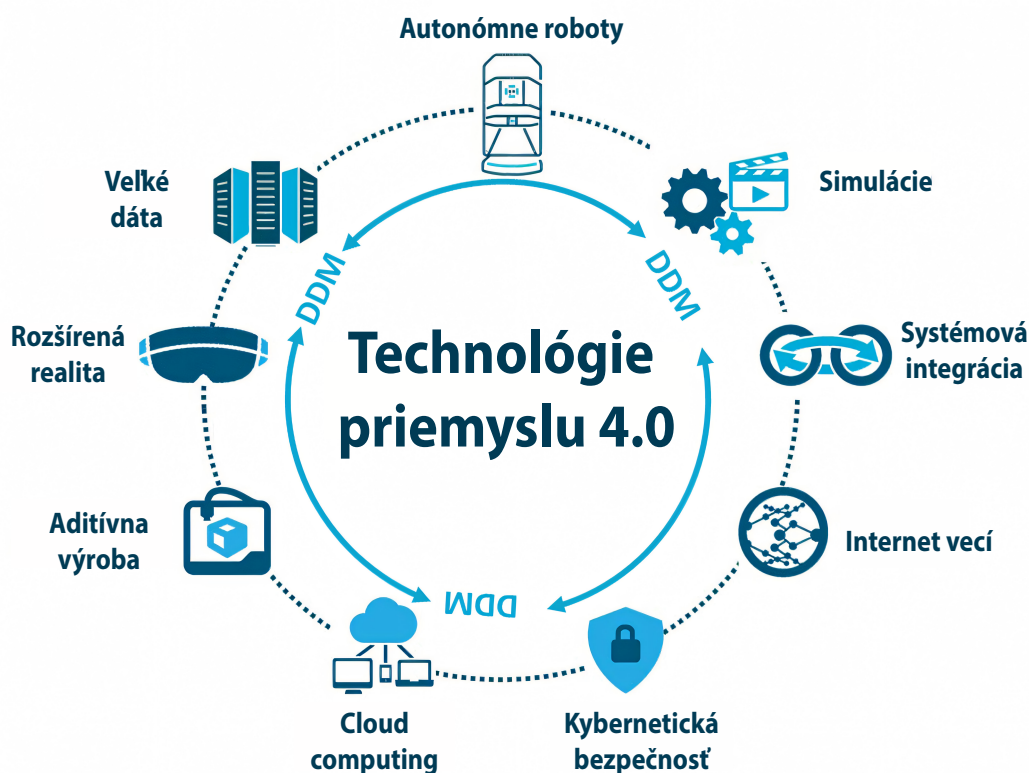
Obr. 4: Percentuálne zastúpenie digitálnych dvojčiat naprieč sektormi, vlastná tvorba podľa [13]

### 2.2.1 Vplyv Priemyslu 4.0 na digitálne dvojčatá vo výrobnom sektore

Priemysel 4.0, často označovaný aj ako štvrtá priemyselná revolúcia, predstavuje zhrnutie konceptu súčasného trendu digitalizácie a automatizácie. Prvýkrát sa tento pojem použil v roku 2013 v Nemecku. Jednalo sa o analýzu vykonanú nemeckou vládou ohľadom dopadu nových technológií na hospodárstvo a potenciálu ich využitia na zvýšenie konkurencieschopnosti európskeho priemyslu v rámci svetového trhu [15, 16]. V kontexte digitálnych dvojčiat práve zmeny, ktoré Priemysel 4.0 so sebou priniesol, do veľkej miery zabezpečili možnosť ich plynulej a bezproblémovej implementácie naprieč výrobnými podnikmi. Z tohto dôvodu budú v rámci tejto kapitoly predstavené vybrané technológie Priemyslu 4.0, ktoré sú takisto kľúčové z pohľadu digitálnych dvojčiat.

V rámci Priemyslu 4.0 ide o vytvorenie tzv. inteligentnej továrne, ktorej hlavným cieľom je integrácia a prepojenie fyzického a virtuálneho sveta, teda umožnenie priamej komunikácie a spolupráce medzi ľuďmi, strojmi, zariadeniami a logistickými systémami [17]. Tohto by malo byť dosiahnuté využitím technológií ako sú napríklad IoT, CPPS alebo v dnešnej dobe často skloňovaná umelá inteligencia. Takáto inteligentná továreň by mala byť schopná zbierať a zdieľať dáta

v reálnom čase, ktoré by mohli byť ďalej analyzované na cloudovom úložisku, na základe ktorých by boli stroje a továrne schopné adaptácie svojou optimalizáciou a rekonfiguráciou, ideálne bez zásahu človeka. Ďalším potenciálom v takejto inteligentnej továrni je zvýšenie bezpečnosti zamestnancov alebo zníženie pozícií s repetitívnou manuálnou prácou, nie však v zásade na úkor zníženia počtu zamestnancov, ale ich využitia na iných, novo vzniknutých pozíciách [18, 19].



Obr. 5: Najdôležitejšie aspekty chytrej továrne, upravené [20]

### Internet vecí

IoT je systém prepojených zariadení, ktoré spolu autonómne komunikujú po sieti. Zariadenia pripojené na tejto sieti, ktorými môžu byť rôzne senzory, akčné členy, spotrebiče a iné, sú schopné si spolu neustále vymieňať dáta a robiť informované rozhodnutia na základe analýzy týchto dát [21]. Takýto systém následne poskytuje nové možnosti ako je napríklad vzdialené ovládanie a monitorovanie, automatizácia procesov alebo optimalizácia využitia zdrojov.

V rámci priemyslu sa väčšinou využíva pojem industriálny internet vecí. IIoT rozširuje IoT princípy do priemyselného prostredia s cieľom zlepšovania výrobných procesov, dodávateľských reťazcov alebo infraštruktúry. Typický IIoT systém pozostáva z inteligentných systémov schopných reagovať na podnety,

mikrokontrolérov, bezdrôtových senzorov zbierajúcich dáta o svojom okolí a rôznych bezpečnostných systémov. Ďalej takýto systém zahŕňa plne prepojenú vysokorýchlostnú komunikáciu naprieč rôznymi rozhraniami a komunikačnými protokolmi, ktoré môžu jednotlivé zariadenia v sieti využívať spoločne s prepojením a možnosťou výpočtov na cloude alebo na lokálnom dátovom úložisku. V neposlednom rade systém zabezpečuje interakciu s človekom pomocou rozhrania medzi človekom a strojom (angl. human machine interface; HMI). Takéto rozhranie umožňuje ľudskému operátorovi nahliadnúť do dát z jednotlivých strojov, na základe ktorých je operátor schopný robiť zásahy do chodu týchto strojov. Medzi hlavné benefity, ktoré sľubuje využívanie IIoT v priemysle, patria napríklad lepší manažment skladových zásob, sledovateľnosť výrobku v rámci výrobného procesu, zlepšenie bezpečnosti a spoľahlivosti a mnohé ďalšie. Aj keď prvé zmienky o IoT v priemysle je možné nájsť už v 60. rokoch 20. storočia, uplatnenie IoT zažíva v posledných rokoch neustály nárast najmä vďaka zvyšovaniu výpočtového výkonu a lepšej cenovej dostupnosti senzorov, ktoré majú navyše minimálnu energetickú náročnosť [22, 23].

Potenciál, ktorý v sebe IIoT skrýva má za následok jeho využitie naprieč rôznymi sektormi priemyslu. Najväčším z nich je práve výrobný sektor, najmä vďaka svojmu potenciálu prepojenia materiálu, výrobkov, strojov, skladov a logistiky, ktoré sú spolu schopné komunikovať a prenášať dáta po IIoT sieti. Vďaka podpore rôznych komunikačných protokolov (MQTT, OPC UA, HTTP) je takisto veľkou výhodou možnosť jednoduchého rozšírenia o nové zariadenia alebo technológie ako sú napríklad robotické ramená alebo rôzne chytré senzory. Takto získané dáta hrajú potom dôležitú úlohu pri optimalizácii chodu výroby naprieč rôznymi oblasťami [21].

Toto zároveň slúži ako ideálne miesto pre implementáciu digitálnych dvojčiat. Keďže digitálne dvojčatá sú závislé na prístupe k dátam z reálnych objektov a možnosti ich jednoduchého prenosu, môže byť využitie IIoT v priemysle považované za kľúčový prvok pre úspešné zavedenie a efektívne fungovanie digitálnych dvojčiat. Ďalším faktorom, ktorý napomáha úspešnej implementácii digitálnych dvojčiat vo výrobnom sektore, je príprava podnikov na digitalizáciu v rámci Priemyslu 4.0. Tieto podniky sa aktívne pripravujú na interakciu medzi digitálnym a fyzickým svetom, čo je základným predpokladom pre efektívne využitie digitálnych dvojčiat. S ich schopnosťou vytvárať most medzi fyzickými a digitálnymi systémami, digitálne dvojčatá umožňujú podnikom lepšie monitorovať, analyzovať a optimalizovať svoje výrobné procesy.

Prvá zmienka o využití IIoT v rámci výrobného závodu sa datuje do roku 1999, kedy spoločnosť Procter & Gamble v závode v Cincinnati použila senzory rádiových frekvencií identifikácie (RFID) na presné a aktuálne sledovanie polohy produktov naprieč výrobnými procesmi [24]. Práve táto prvá aplikácia podkryla

jeden z potenciálov, ktoré IoT a zariadenia v rámci tejto siete skrývajú, čo sa odzrkadlilo vo väčšom záujme o túto technológiu.

V dnešnej dobe stojí za zmienku napríklad využitie IIoT systému firmou BMW, ktorá takto sleduje výrobu svojich automobilov naprieč výrobným procesom. Vďaka tomu, že pracovníci vždy presne vedia, v akej výrobnej fáze sa jednotlivé automobily nachádzajú, majú možnosť presnejšieho manažmentu skladu, čo im pomáha predchádzať oneskoreniam vo výrobe v dôsledku nepripravenosti materiálu [25].

Ďalšou aplikáciou z praxe je napríklad firma General Electric (GE), ktorá využíva IIoT na zlepšenie efektívnosti nimi vyrábaných prúdových motorov. Pridaním senzorov na vyrobené prúdové motory je GE schopné zbierať dáta počas celej jeho životnosti. Spoločne s údajmi o jeho prípadných údržbách je následne GE schopné nájsť potenciálne miesta na zlepšenie svojich budúcich motorov [22].

### 2.2.2 Aplikácie digitálnych dvojčiat vo výrobných systémoch

Ako už bolo predstavené na obr. 4, najväčšie zastúpenie nachádzajú digitálne dvojčatá práve vo výrobnom sektore. Často sa jedná o využitia rovnaké, ako v iných sektoroch, avšak vďaka vyššej miere integrácie so svojou digitálnou verziou umožňujú práve vo výrobnom sektore väčšie využitie potenciálu, ktoré tieto digitálne kópie ponúkajú. Vďaka svojej flexibilitě je možné nájsť digitálne dvojčatá naprieč rôznymi úrovňami výrobných podnikov. Môže sa jednať o digitálne dvojčatá jednotlivých strojov alebo výrobných liniek až po digitálne dvojčatá celých podnikov, ktoré slúžia na analýzu dát vo viacerých aspektoch. Ako hlavné oblasti uplatnenia digitálnych dvojčiat vo výrobnom sektore je možné stanoviť nasledujúce oblasti:

- Dizajn
- Údržba
- Procesy a logistika
- Bezpečnosť

#### Dizajn

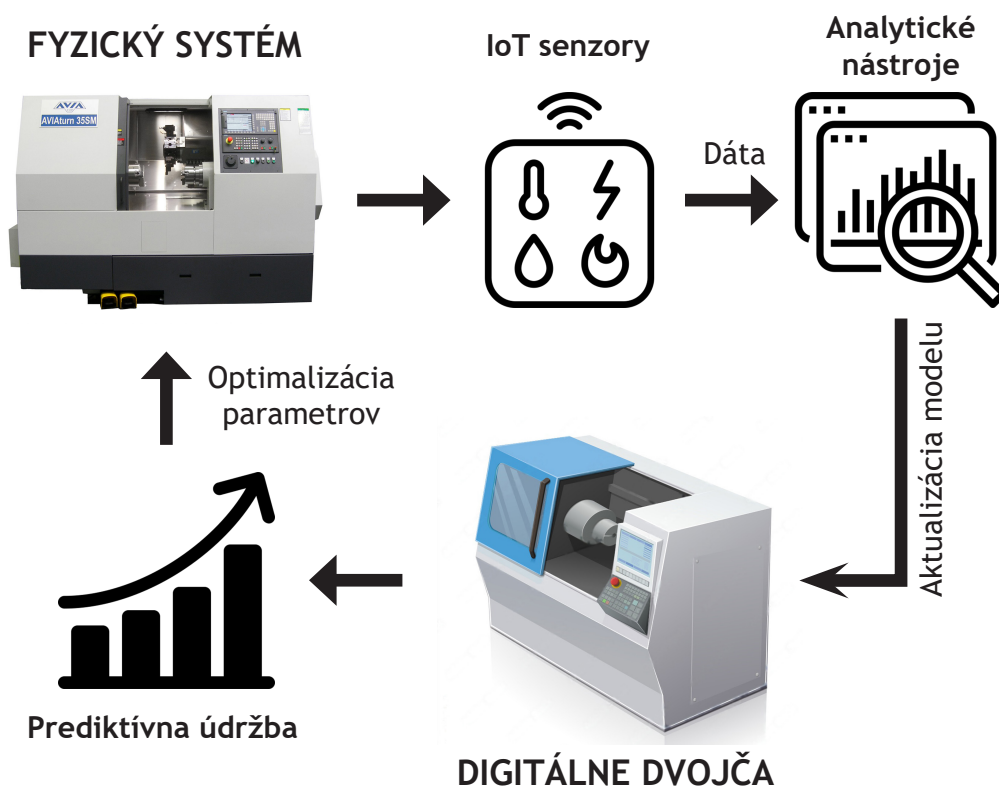
Do kategórie dizajnu spadajú využitia digitálneho dvojčata na účely simulácie, testovania a optimalizácie v rámci výroby. Táto kategória zdieľa veľa podobností s odvetvím letectva a kozmonautiky. Hlavným uplatnením v tejto oblasti je najmä predikovanie potenciálnych nedostatkov produktu, ktoré takto môžu byť odstránené pred vstupom do výroby. Vytvorenie digitálneho dvojčata produktu takisto dovoľuje dizajnérom testovanie rôznych konfigurácií s cieľom zlepšenia jeho životnosti alebo iných vlastností. Výsledkom toho je urýchlenie celej vývojovej fázy, kedy je počet potrebných prototypov od fázy konceptu po fázu finálneho produktu oveľa nižší. Toto však nie je jediná oblasť v rámci dizajnu, kde sa dajú využiť prednosti digitálnej kópie. V oblasti dizajnu je digitálne dvojča podobne podstatné aj v



prípade samotných strojov a pracovísk, kedy sa digitálne dvojčatá takýchto celkov využívajú na testovanie úprav za cieľom odstránenia nedostatkov, ako sú napríklad ergonomické riziká pracovníkov [26].

### Údržba

Údržba je ďalšou z oblastí, v ktorých sú digitálne dvojčatá veľkým prínosom. Zároveň je v tejto oblasti výskyt digitálnych dvojčiat aj najbežnejší, a to najmä vďaka vplyvu Priemyslu 4.0. Chytré senzory umožňujú digitálnemu dvojčatu fyzického systému stály prísun aktuálnych dát o stave stroja, ktoré sú následne analyzované a vyhodnocované. Simulácie vývoja stavu stroja následne pomáhajú odhadnúť, kedy je potrebný servis stroja skôr, ako by mohla nastať jeho porucha. Na základe dostupných dát sú takisto schopné včas odhaliť poruchu samotnú. Touto cestou je zabránené riziku vzniku prestojov vďaka nefunkčnosti stroja, prípadne zníženiu kvality výrobkov, kvôli zhoršujúcemu sa stavu stroja. Všeobecne sa tento prístup označuje ako prediktívna údržba. Oblasť prediktívnej údržby je tak v dnešnej dobe pre výrobný sektor oporným kameňom. Takáto prediktívna údržba sa môže týkať ako celých strojov, tak aj samotných nástrojov, ktoré stroj alebo systém využíva. Toto je umožnené najmä vďaka vysokej dostupnosti dát, ktoré sú schopné poskytnúť ucelený obraz o ich stave [26].



Obr. 6: Princíp prediktívnej údržby s využitím digitálneho dvojčata

## Procesy a logistika

V rámci oblasti procesov a logistiky sa digitálne dvojčatá zameriavajú na samotné operácie, ktoré stroje vykonávajú. Vďaka IoT senzorum inštalovaným do zariadení vie digitálne dvojča v reálnom čase monitorovať a vyhodnocovať výrobné procesy. Pomocou simulačných nástrojov vie následne nájsť potenciálne vhodné parametre, ktoré by vedeli dané procesy zefektívniť. To isté sa týka napríklad aj spotreby elektrickej energie stroja. Pri sériových výrobách vie zase upravovať parametre pre zachovanie konzistentnosti kvality produktov, ktorá by mohla byť inak ovplyvnená napríklad opotrebovávaním nástrojov. Podobne to je v prípade logistiky, kedy vie digitálne dvojča zariadení včasný prísun materiálu predtým, ako by mohlo dôjsť k jeho spotrebovaniu. Ak takýto materiál už k dispozícii na sklade nie je, vie upozorniť a odhadnúť, kedy daný materiál bude vyčerpaný, prípadne ho automaticky naskladniť. Touto cestou dokáže digitálne dvojča zabezpečiť stály, stabilný a efektívny chod výroby s ohľadom na optimalizáciu času a zdrojov [15, 26].

## Bezpečnosť

Bezpečnosť zamestnancov je takisto kritická a veľmi dôležitá oblasť, v ktorej sa začali uplatňovať digitálne dvojčatá. V dnešnej dobe firmy uplatňujú všetky dostupné prostriedky na zvýšenie bezpečnosti pracovníkov na pracovisku. Jednou z dostupných možností je napríklad simulácia možných scenárov pri práci za rôznych podmienok a odhalenie možných rizík. Po určení takýchto rizík prebieha analýza pravdepodobnosti, že takáto riziková situácia môže nastať spoločne s odhadnutím následkov pre pracovníkov. Na základe výsledkov vie firma odhadnúť najzásadnejšie riziká a navrhnúť bezpečnostné opatrenia, aby sa takýmto situáciám predišlo. Ďalšou z možností je využitie digitálnych dvojčiat pri tréningu a zaškoľovaní zamestnancov. Pri využití digitálneho dvojčata reálneho systému nehrozí zamestnancovi žiadne nebezpečie, tak isto ako nemôže nastať situácia, že by svojimi činmi ohrozil plynulý chod výrobného procesu. Navyiac je možné simulovať rôzne nebezpečné scenáre, kedy je zamestnanec lepšie pripravený, keby takýto scenár nastal v praxi. Ďalším z benefitov je napríklad vyhodnocovanie vplyvu pracovného prostredia na zdravie zamestnancov. To môže zahrňovať optimalizáciu rozloženia nástrojov pre zamedzenie nadbytočného zdvíhania ťažkých bremien alebo nadmerného presunu kvôli zlému umiestneniu nástrojov na pracovisku. Všetky zmienené možnosti vedú k predchádzaniu akéhokoľvek ohrozenia zamestnancov alebo pre zlepšenie pracovného prostredia pre zamestnancov, čo má priamy dopad na zabezpečenie plynulého chodu a zvýšenie efektivity v rámci firmy [10, 26].

## 2.3 Využitie digitálnych dvojčiat v ostatných sektoroch

Aplikačný potenciál digitálnych dvojčiat je veľmi vysoký, a to nielen v prostredí výrobných systémov. V období snáh o digitalizáciu naprieč všetkými sektormi sa koncept digitálnych dvojčiat čoraz viac stáva stredobodom pozornosti. Medzi ich hlavné prednosti patrí najmä schopnosť prepojenia reálneho sveta s digitálnym priestorom. Ďalším faktorom, ktorý prispieva k úspechu digitálnych dvojčiat, je ich schopnosť prispôsobenia sa špecifickým potrebám a úrovniam komplexnosti, ktoré jednotlivé sektory vyžadujú. Toto má za následok prenikanie digitálnych dvojčiat do ďalších oblastí.

### 2.3.1 Digitálne dvojčatá v zdravotníctve

Najnovšou a najrýchlejšie rastúcou oblasťou využitia digitálneho dvojčata je práve zdravotníctvo. Prvotné uplatnenie digitálneho dvojčata v zdravotníctve sa využívalo na optimalizáciu počtu lôžok na jednotlivých oddeleniach alebo počtu zdravotníckeho personálu [27].

Najviac zaujímavou oblasťou v zdravotníctve je však vytváranie digitálnych dvojčiat pacientov. Reálne dáta, ako krvný tlak alebo srdcová frekvencia, sa posielaajú do svojej virtuálnej repliky, ktorá navyše obsahuje informácie o prekonaných chorobách, predispozíciách alebo medikácii, čím vytvára kompletný prehľad o danom pacientovi [28].

### 2.3.2 Digitálne dvojčatá v podnikaní

Uplatnenie digitálnych dvojčiat v oblasti podnikania je veľmi rôznorodé, keďže každá oblasť podnikania má svoje špecifické potreby. Väčšina digitálnych dvojčiat v podnikateľskom sektore sa zameriava prevažne na optimalizáciu služieb poskytovaných svojim zákazníkom [29].

Táto optimalizácia sa týka najmä personalizácie poskytovaných služieb. Jednotliví zákazníci alebo skupiny zákazníkov majú vytvorenú svoju virtuálnu kópiu, na základe ktorej sa modeluje správanie zákazníkov a následne sa určuje napríklad výber vhodných odporúčaní produktov a služieb [29].

V podnikateľskej sfére sa digitálne dvojča využíva na posudzovanie operačnej efektivity, pri ktorej sa vytvára digitálny model podniku a skúmajú sa možné optimalizácie pre zlepšenie jeho výkonnosti po stránke finančného chodu [29].

### 2.3.3 Digitálne dvojčatá v letectve

Sektor leteckého a vesmírneho priemyslu je považovaný za prvý, ktorý začal využívať koncept digitálnych dvojčiat. Táto technológia sa ukázala v tejto oblasti mimoriadne užitočná vďaka možnosti riešenia komplexných výziev, ktoré v tomto odvetví

existujú. Preto už v roku 2010 NASA v snahe vylepšiť fyzický model svojho raketoplánu využívala virtuálne kópie, vďaka ktorým vedela predpovedať vhodnosť návrhu a takisto testovať rôzne podmienky, ktorým by mohol byť raketoplán vystavený. Toto viedlo k výraznému zlepšeniu bezpečnosti a efektívnosti jednotlivých misií, ako aj k časovej a finančnej úspore [30].

Postupne sa tento koncept uchytil aj v leteckom priemysle, ktorý v dnešnej dobe najviac ťaží práve z vytvárania digitálnych dvojčiat s ohľadom na dizajn a údržbu lietadiel. Po dizajnovej stránke sú odborníci touto cestou schopní odhaliť efektívnosť daného dizajnu a prípadné problémy, ktoré sú potom schopní riešiť bez nutnosti vytvárania reálnych modelov a ich testovania. V rámci údržby sú údaje zo senzorov na motoroch lietadiel odosielané do ich virtuálnych kópií, kde sú následne vyhodnotené a na základe nich je vytvorený plán pre včasnú údržbu skôr, ako by mohlo dôjsť k vážnejšiemu ohrozeniu správneho fungovania daného motora [31].

#### **2.3.4 Digitálne dvojčatá v stavebníctve**

Digitálne dvojčatá sa v stavebníctve využívajú na vytváranie virtuálnych kópií ciest, mostov alebo križovatiek a na základe dostupných dát z ich reálnych predlôh sa navrhujú ich prípadné úpravy pre zlepšenie. Ďalším možným využitím je napríklad údržba budov a manažment núdzových situácií, kedy na základe dostupných dát a vytvoreného modelu je možné simulovať rôzne prírodné katastrofy a ich dopad na samotnú budovu alebo komplex. Podľa tohto modelu sa následne upravujú aspekty danej budovy alebo evakuačné plány. Ďalšie oblasti využitia digitálnych dvojčiat v stavebníctve môžu byť napríklad plánovanie a riadenie projektov. V prípade stavebníctva je však potrebné rozlišovať medzi digitálnymi dvojčatami a konceptom informačných modelov budov (angl. building information modeling; BIM). Koncept BIM sa zaoberá vytváraním samotného digitálneho modelu a posúdením jeho jednotlivých aspektov ešte pred samotnou výstavbou. Pri BIM modeloch sa nepočíta s následnou výmenou dát medzi fyzickým a digitálnym objektom, a teda tento model slúži čisto len na optimalizáciu pred samotnou výstavbou [32, 33].

#### **2.3.5 Digitálne dvojčatá v energetike**

Vytváranie digitálnych dvojčiat v sektore energetiky je veľmi moderné najmä pri obnoviteľných zdrojoch energie, kedy sa vytvárajú digitálne dvojčatá celých energetických parkov za účelom optimalizácie výroby elektriny alebo detekcie anomálií v systémoch.

Ďalšie využitie nachádzajú v ukladaní energie. V tejto oblasti sa vytvárajú najmä zjednodušené modely zariadení na skladovanie energie za účelom monitorovania a ovládania takéhoto zariadenia [34].

## 2.4 Metodika tvorby digitálnych dvojčiat

Vzhľadom na širokú škálu kategórií a možností využitia digitálnych dvojčiat v rôznych oblastiach je nevyhnutné stanoviť základné pravidlá pre ich tvorbu a implementáciu. Cieľom vytvorenia metodiky tvorby digitálneho dvojčata je maximalizovať využitie potenciálu, ktorý digitálne dvojča ponúka. Takýto integrovaný prístup zabezpečí, že digitálne dvojča bude nielen spĺňať očakávania firmy, ale aj prinášať skutočnú hodnotu a prínosy v rámci jej operácií a rozhodovacích procesov.

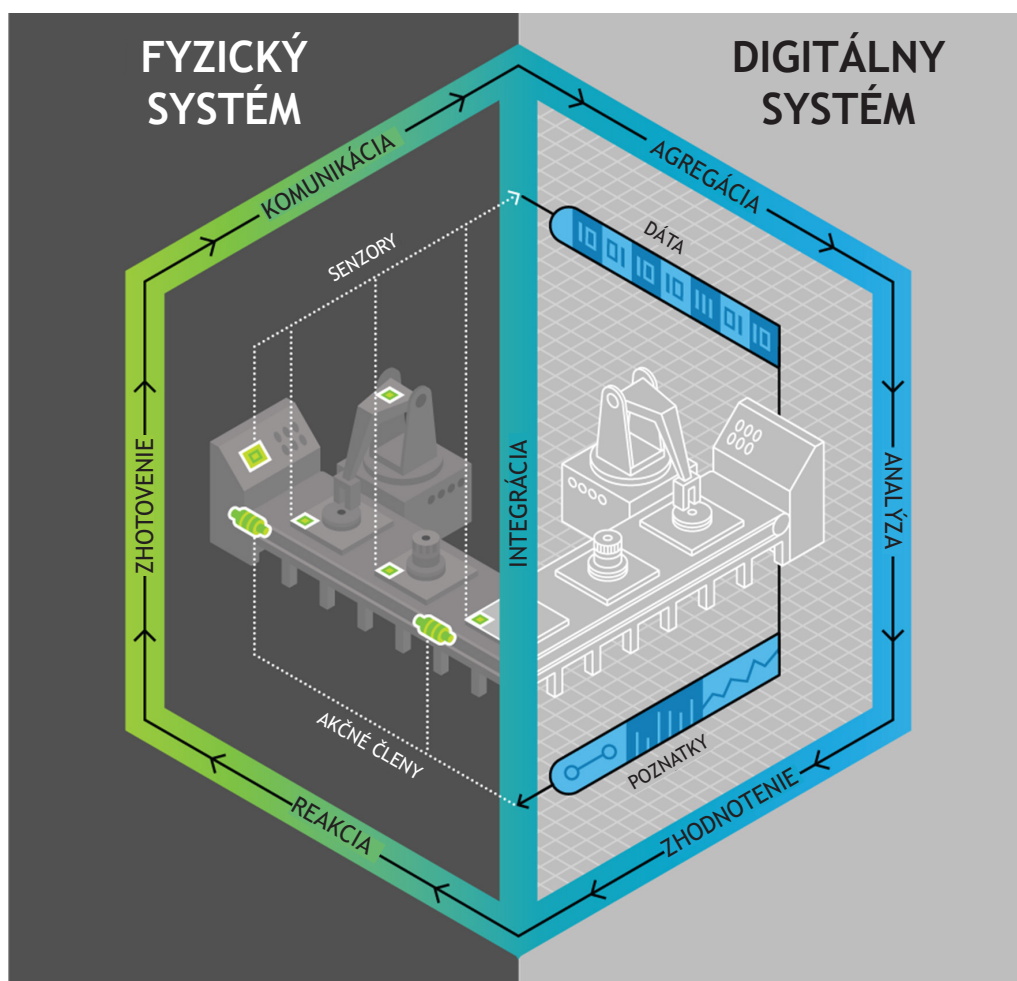
Ešte pred samotným začiatkom tvorby digitálneho dvojčata je nevyhnutné jasne definovať jeho účel a ciele. Toto rozhodnutie priamo ovplyvňuje nielen výber technológií a dát, ktoré budú potrebné, ale aj celkový dizajn a štruktúru digitálneho dvojčata.

Rovnako dôležitým aspektom pri tvorbe digitálnych dvojčiat je škálovateľnosť. Keďže digitálne dvojčata sa často vytvárajú ako malé časti systémov, je nevyhnutné zabezpečiť ich možnosť neskoršieho prepojenia do podoby väčších celkov [35].

Tieto prvotné rozhodnutia sú kľúčové pre úspešnú tvorbu a implementáciu digitálneho dvojčata. Správne zvolený prístup na začiatku môže výrazne zjednodušiť celý proces a zabezpečiť, že digitálne dvojča bude skutočným prínosom pre organizáciu.

Po dôkladnom premyslení úvodných krokov je možné prejsť k samotnému vytváraniu digitálneho dvojčata. Proces vytvárania digitálneho dvojčata je možné rozdeliť do šiestich základných etáp nasledovne:

- Zhotovenie
- Komunikácia
- Agregácia
- Analýza
- Zhodnotenie
- Reakcia



Obr. 7: Proces tvorby digitálneho dvojčeta, upravené [36]

### Zhotovenie

Samotný proces tvorby digitálneho dvojčeta sa začína prevodom fyzického stroja do digitálnej podoby. Za tento proces zodpovedá etapa zhotovenia. Komplexnosť digitálnej podoby stroja môže dosahovať rôzne úrovne a primárne sa odvíja od potrieb samotného podniku, pre ktorý je digitálne dvojča vytvárané. Ak má byť takéto digitálne dvojča zamerané na kontrolu výrobných procesov, je možné zvoliť jednoduchšiu reprezentáciu napríklad v podobe obrázkov. Ak hlavným cieľom digitálneho dvojčeta je presná vizualizácia, môžu byť použité napríklad 3D modely. Okrem prevodu do digitálnej podoby sa etapa zhotovenia takisto zaoberá aj zberom dát zo samotných objektov digitalizácie. Digitálne dvojča vyžaduje širokú škálu informácií o reálnom stroji a vlastnostiach okolia, v ktorom stroj pracuje. Ak tieto informácie nie sú dostupné, je nutné stroj doplniť o chýbajúce senzory, ktoré tieto dáta zabezpečia. V samotnom rozhraní digitálneho dvojčeta sú tieto informácie ďalej doplnené o ďalšie potrebné dáta z rôznych podnikových systémov, ktoré digitálnemu dvojčetu poskytujú informácie o plánovaní výroby, hladinách materiálov na skladoch alebo prijatých zákazkách [36, 37, 38].

## **Komunikácia**

Komunikácia sa zaoberá prenosom dát medzi fyzickým a digitálnym náprotivkom. Jej hlavnou úlohou je zabezpečenie obojsmernej interakcie v reálnom čase. Jedná sa tak o kritický aspekt pre správne fungovanie celého konceptu. Pri navrhovaní vhodnej komunikácie sú dôležité viaceré aspekty. Prvým z nich je štandardizácia komunikácie. IoT senzory môžu využívať rôzne komunikačné rozhrania a preto je dôležitá implementácia štandardizovaného protokolu na výmenu dát. Ďalším z dôležitých aspektov je bezpečnosť. Vzhľadom na fakt, že prenášané dáta môžu obsahovať citlivé informácie, je dôležité zaistiť ich bezpečnú výmenu. Medzi dôležité aspekty komunikácie sa takisto radí škálovateľnosť. Počet potrebných senzorov môže počas fungovania digitálneho dvojčata narastať a je dôležité, aby komunikačná sieť zvládla nárast v objeme prenášaných dát [36, 37].

## **Agregácia**

Agregácia dát v kontexte digitálnych dvojčiat je kľúčovým procesom, ktorý zahŕňa zhromažďovanie a spracovanie dát z rôznych zdrojov do jednotného celku. Tento proces umožňuje efektívne využitie dát analytickými nástrojmi digitálneho dvojčata. V prípade spomínaného jednotného celku sa vzhľadom na povahu dát väčšinou jedná o databázovú štruktúru. S ohľadom na samotný návrh databázových štruktúr je dôležité, aby takáto štruktúra bola schopná rýchlo a efektívne spracovať veľké objemy dát. Pred ich samotným ukladaním sú dáta často podrobené ďalším krokom, ako je sumarizácia alebo transformácia, aby tieto dáta poskytovali čo najviac zmysluplný vhľad [36, 39].

## **Analýza**

Analýza dát je kľúčovou súčasťou práce s digitálnymi dvojčatami. Po zhromaždení a spracovaní dát do vhodnej formy sa tieto dáta podrobujú analýze pomocou vhodných analytických nástrojov. Tieto nástroje môžu byť využité na rôzne účely, vrátane optimalizácie procesov, predikcie údržby alebo simulácie rôznych scenárov. V kontexte analýzy dát je čoraz bežnejšie využívanie algoritmov umelej inteligencie, ktoré umožňujú presnejšiu interpretáciu dát a poskytujú hlbšie a presnejšie vhlady. Tieto algoritmy prispievajú k efektívnosti a presnosti digitálnych dvojčiat, čo vedie k lepšiemu rozhodovaniu a optimalizácii procesov [6, 36].

## **Zhodnotenie**

Zhodnotenie v procese tvorby digitálneho dvojčata je potrebné pre efektívnu komunikáciu a interpretáciu výsledkov analýzy. Táto etapa zahŕňa predstavenie výstupov z analýzy v prijateľnom formáte, často prostredníctvom vizualizácií, ktoré sú ľahko pochopiteľné a môžu byť prezentované rôznym úrovňam manažmentu. Zhodnotenie by malo zdôrazniť oblasti na zlepšenie a identifikovať odchýlky medzi simuláciami a skutočnou výkonnosťou fyzických strojov. Aj keď táto etapa nemá

priamy vplyv na technické fungovanie digitálneho dvojčata, je neodmysliteľnou súčasťou jeho celkového prínosu pre organizáciu. Bez vhodného zhodnotenia a interpretácie výsledkov by mohla byť efektívnosť a dôležitosť digitálnych dvojčiat prehliadnutá. Preto je etapa zhodnotenia neoddeliteľnou súčasťou procesu tvorby a využitia digitálnych dvojčiat [36].

### **Reakcia**

Reakcia je fázou implementácie rozhodnutí a krokov na základe výsledkov etáp analýzy a zhodnotenia. Tieto kroky môžu byť implementované priamo do reálneho systému cez digitálne dvojča alebo môžu byť vykonané manuálne, napríklad prostredníctvom dizajnových úprav stroja. Cieľom tejto etapy je optimalizovať výrobný proces a zlepšiť výkonnosť fyzického modelu. Aj napriek tomu, že reakcia je posledným krokom v procese tvorby digitálneho dvojčata, tento proces je navrhnutý ako iteratívny. To znamená, že po etape reakcie sa celý proces začína znova, aby bola dosiahnutá čo najvyššia presnosť a efektívnosť digitálneho dvojčata. Tento cyklický prístup zabezpečuje digitálnym dvojčatám schopnosť prispôbovať sa zmenám v reálnom svete, učiť sa a neustále zlepšovať [36, 40].



### 3 Podnikové úrovne automatizácie

Výrobný podnik predstavuje komplexný systém, ktorý sa skladá z množstva úsekov, pričom každý z nich plní svoju špecifickú úlohu a funkciu. Tieto úseky zahŕňajú oblasti ako financie, predaj, výroba či údržba, pričom ich efektívne fungovanie závisí na dátach, ktoré generujú, ako aj dátach, ktoré prijímajú. Prijímané dáta pochádzajú väčšinou práve z iných podnikových úsekov a tak je mimoriadne dôležité zabezpečiť ich plynulú výmenu naprieč podnikom. Spoločne s tým je potrebné, aby dáta boli spracované a presne adresované v čo najkratšom čase, keďže akékoľvek meškania alebo chyby v týchto dátach môžu viesť k neefektívnosti alebo chybám vo výrobe.

S narastajúcim dôrazom na automatizáciu a digitalizáciu, ktorú priniesol Priemysel 4.0, je nevyhnutné zabezpečiť, aby táto komunikácia a výmena dát prebiehala automaticky s minimálnym ľudským zásahom. Toto vyžaduje integráciu systémov, ktorá takúto komunikáciu je schopná zabezpečiť.

Zároveň je však potrebné prihliadať na to, aby takáto integrácia vyzerala rovnako naprieč celým sektorom kvôli potrebe výmeny dát s dodávateľmi alebo inými podnikmi. Z týchto dôvodov bol zavedený medzinárodný štandard ISA-95, ktorý sa zameriava na integráciu podnikových systémov.

#### 3.1 Model ISA-95

Ako už bolo spomenuté, medzinárodný štandard ANSI/ISA-95, vyvinutý Medzinárodnou spoločnosťou pre automatizáciu (angl. International Society of Automation; ISA) a Americkým normalizačným úradom (angl. American National Standards Institute; ANSI) poskytuje rámec pre spoľahlivú integráciu podnikových a riadiacich systémov.

Jeho hlavným účelom je definovať automatizované rozhranie medzi týmito systémami. Takto definované rozhranie zabezpečuje, aby výmena informácií bola spoľahlivá, bezpečná a s minimálnymi nákladmi. Zároveň tiež prihliada na integritu každého systému a jeho rozsah pôsobnosti [5].

Okrem toho, že norma stanovuje terminológiu pre to, ktoré dáta si majú jednotlivé úseky vymieňať, poskytuje takisto nástroje pre lepšie pochopenie fungovania podniku ako takého, ako aj jednotlivých funkcií ako riadenie výroby alebo obchodné procesy.

Model ANSI/ISA-95 je v základe usporiadaný do vrstiev, ktoré zahŕňajú oblasti od samotných výrobných procesov až po obchodné činnosti. Samotná norma sa zaoberá výmenou dát naprieč rozhraniami vrstiev, ako aj naprieč vrstvami samotnými. Tak zabezpečuje tzv. vertikálnu a horizontálnu integráciu podnikových systémov zároveň [5]. Jednotlivé vrstvy modelu pre výrobný podnik sú nasledujúce:

### **Prevádzková úroveň (úroveň 0)**

Predstavuje fyzické procesy, ktoré prebiehajú vo výrobnom prostredí. Jedná sa teda o základnú úroveň, na ktorej prebieha samotná výroba. Z pohľadu zariadení môže táto úroveň zahŕňať stroje, montážne linky a iné prostriedky, ktoré sa priamo podieľajú na výrobnom procese [5, 41].

### **Riadiaca úroveň (úroveň 1)**

Táto úroveň zahŕňa zariadenia zodpovedné za snímanie a riadenie fyzických procesov. Medzi zariadenia spadajúce do tejto vrstvy patria napríklad programovateľné logické automaty (angl. programmable logical controller; PLC) alebo rôzne regulátory. Tieto zariadenia sú v priamom spojení so strojmi na prevádzkovej úrovni [5, 41].

### **Kontrolná úroveň (úroveň 2)**

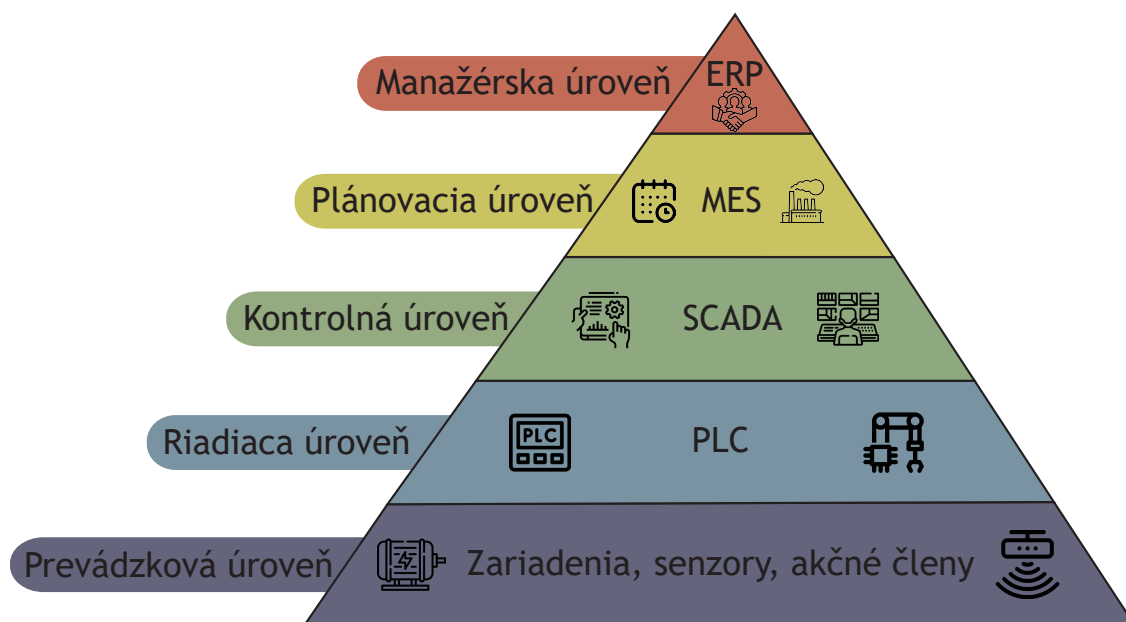
Na tejto úrovni dochádza k monitorovaniu fyzických procesov a zariadení. Obvykle sa jedná o centrálné pracovisko, z ktorého sú jednotlivé zariadenia a procesy monitorované a takisto je umožnené ich ovládanie. Táto úroveň väčšinou zahŕňa systém pre dispečerské riadenie a zber dát (angl. supervisory control and data acquisition; SCADA). Okrem SCADA sa môže jednať aj o rôzne HMI systémy. Hlavnou úlohou tejto úrovne je prepojenie nižších úrovní s vyššími riadiacimi systémami, ako aj možnosť zásahu operátorov strojov a zariadení do procesov [5, 41].

### **Plánovacia úroveň (úroveň 3)**

Vo všeobecnosti sa plánovacia úroveň stará o celkovú správu pracovných procesov, pre výrobu požadovaných produktov. Na tejto úrovni operuje tzv. výrobný informačný systém (angl. manufacturing execution system; MES). MES zastupuje úlohy ako plánovanie, expedíciu, sledovanie výrobného procesu a mnoho ďalších. MES sa takisto stará o sprostredkovanie komunikácie medzi prevádzkovou a manažérskou úrovňou [5, 41].

### **Manažérska úroveň (úroveň 4)**

Jedná sa o najvyššiu úroveň modelu ISA-95. Predstavuje činnosti spojené s podnikaním potrebné na riadenie výrobného podniku. S ohľadom na zariadenia a systémy na tejto vrstve operuje systém pre plánovanie podnikových zdrojov (angl. enterprise resource planning; ERP). V rámci tohto systému sa riadia financie, ľudské zdroje alebo dodávateľské reťazce [5, 41].



Obr. 8: Automatizačná pyramída, vlastná tvorba podľa [42]

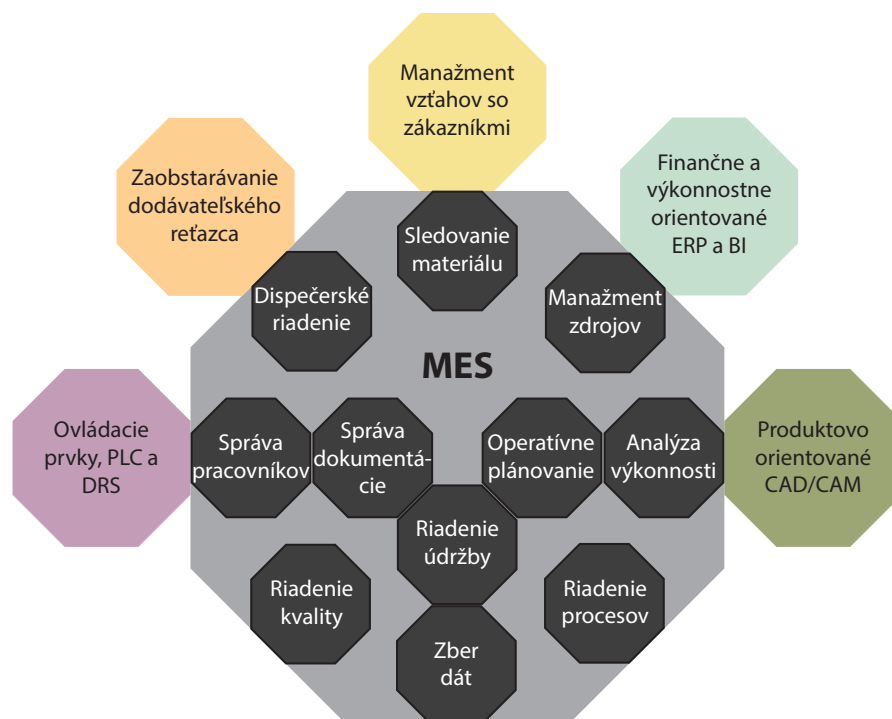
Automatizačná pyramída (obr. 8), ako sa grafický model ISA-95 nazýva, okrem rozdelenia do vrstiev na základe funkcionalít zohľadňuje takisto časové rámce pre jednotlivé vrstvy. Zatiaľ čo na prevádzkovej úrovni sa jedná o úkony často v rámci zlomkov sekúnd, na manažérskej úrovni sa väčšinou riešia plány a projekty v rámci mesiacov až rokov [43]. Tento fakt takisto napomáha efektívnemu chodu podniku vzhľadom na jasné členenie do jednotlivých úrovní.

### 3.2 Popis výrobného informačného systému

Z pohľadu ISA-95 sa výrobný informačný systém nachádza na plánovacej úrovni, kde efektívne pracuje so všetkými dátami z nižších úrovní modelu a zároveň ich ďalej sprostredkúva manažérskej úrovni skrz rozhranie medzi MES a ERP systémom. Z pohľadu podniku je však MES ďaleko komplexnejší systém, ktorý je schopný monitorovať, sledovať, dokumentovať a ovládať výrobný proces od surového materiálu až po finálny produkt.

Okrem jeho presného zaradenia v rámci informačnej štruktúry zabezpečenej pomocou normy ANSI/ISA-95 však tento systém často naráža na problém rôznorodej interpretácie jeho rozsahu funkcií, ktoré má v podniku zabezpečovať [44]. Z tohto dôvodu sa v roku 1997 rozhodla asociácia pre podnikové riešenia (angl. manufacturing Enterprise Solutions Association; MESA) vytvoriť a zaviesť model, ktorý by presne popisoval oblasti, ktoré má systém MES v podniku pokrývať [45]. Vznikol tak model popisujúci 11 základných funkčných skupín, ktoré by mal MES

systém zabezpečovať pre efektívne riadenie výroby. Model MES je zobrazený na obr. 9 spolu so systémami, s ktorými MES interaguje. Jednotlivé funkčné skupiny sú detailnejšie priblížené nižšie.



Obr. 9: Model MES s jednotlivými funkčnými skupinami a interagujúcimi systémami, vlastná tvorba podľa [46]

### Podrobné krátkodobé plánovanie (Operations / detailed scheduling)

Táto skupina má za cieľ optimalizovať zákazky prijímané z ERP vrstvy s ohľadom na výkonnosť jednotlivých strojov. Zahŕňa to zohľadnenie kapacitných, ľudských a iných zdrojov každého stroja, ako aj správnu voľbu výrobných sekvencií na minimalizáciu prestojov spôsobených prestavovaním alebo nadmernou logistikou [46, 47].

### Manažment zdrojov (Resource allocation and status)

Charakteristikou tejto funkčnej skupiny je sledovanie a spravovanie zdrojov, akými môžu byť napríklad stroje, materiál, pracovná sila a iné. To má predchádzať vzniku problémov ako nedostatok personálu alebo nadmerné vyťaženie strojov v procese výroby [46, 47].

### Dispečerské riadenie (Dispatching production units)

Riadi tok výrobných jednotiek vo forme úloh, objednávok, dávok, šarží a pracovných príkazov. Dispečing informácií je prezentovaný v poradí, v akom je potrebné vykonávať prácu, a mení sa v reálnom čase podľa udalostí na výrobnéj hale. Často

sa dispečerské riadenie podieľa aj na sprostredkovaní informácií o výrobkoch pre zákazníkov [46, 47].

### **Správa dokumentácie (Document management)**

Táto oblasť sa stará o riadenie a distribúciu akejkoľvek dokumentácie naprieč výrobou. Táto dokumentácia zahŕňa výrobné listy, zákazky, výkresy a mnohé ďalšie. Zahŕňa tiež kontrolu a integritu environmentálnych, zdravotných a bezpečnostných predpisov, ako aj informácií podľa noriem ISO. Správa dokumentácie sa takisto stará o archiváciu dát [46, 47].

### **Analýza výkonnosti (Performance analysis)**

Skupina analýzy výkonnosti má na starosť porovnávanie a vyhodnocovanie dát prichádzajúcich z výroby s predpovedanými hodnotami ako aj s hodnotami dosahovanými v minulosti. Takáto analýza má za cieľ vyhodnotenie kľúčových ukazovateľov výkonnosti podniku [46, 47].

### **Správa pracovníkov (Labor management)**

Jedná sa o komplexnú oblasť, ktorá sa stará primárne o záznamy o výrobnom personáli, akými sú ich dostupnosť, pridelenie, kvalifikácia alebo prítomnosť na pracovisku. Pomimo toho vedie štatistiku napríklad o počte vyrobených kusov za smenu. Môže interagovať s manažmentom zdrojov pre optimálne pridelenie zamestnancov k výrobným úlohám [46, 47].

### **Riadenie údržby (Maintenance management)**

Jej hlavným cieľom je udržiavať vybavenie v takom technickom stave, aby sa predišlo znižovaniu výkonnosti strojov alebo kvality výrobkov. Takisto má za úlohu včasné plánovanie údržby, aby na pracovisku nedošlo k neplánovaným odstávkam kvôli poruche strojov. V neposlednom rade zabezpečuje rozvrhy periodických a preventívnych údržieb [46, 47].

### **Riadenie procesov (Process management)**

Táto funkcia zahŕňa kontrolu a spravovanie dodržiavania pracovných postupov spolu s podporou rozhodovania operátora výroby na základe sledovania očakávaných výstupov z jednotlivých procesov. Navyše poskytuje rozhranie medzi inteligentnými zariadeniami z prevádzkovej úrovne a MES prostredníctvom funkčnej skupiny zber dát [46, 47].

### **Riadenie kvality (Quality management)**

Táto funkčná oblasť zaznamenáva, sleduje a analyzuje informácie o produktoch a výrobných procesoch, aby v prípade akýchkoľvek odchýlok včas zabránila problémom, ktoré by mohli ohroziť kvalitu produktov. Ak takáto chyba v kvalite nastane, vie ju účinne spätne dohľadať a identifikovať [46, 47].

### **Zber dát (Data collection and acquisition)**

Zber dát zahŕňa ručné aj automatické zbieranie dát o pracovníkoch, vstupných a výstupných materiáloch, produktoch, výrobných procesoch, strojoch a iných prvkoch. Tieto dáta môžu byť následne automaticky preformátované do rôznych databáz alebo využité na účely vizualizácie a analýzy. Zber dát je jednou zo základných funkcií pre správne fungovanie systému MES [46, 47].

### **Sledovanie rodopisu materiálu a produktu (Product tracking and genealogy)**

Funkciou tejto oblasti je vytváranie a zachovávanie rodopisu produktov alebo im nadradených celkov, ako sú výrobné dávky alebo série. Ide o dokumentáciu všetkých udalostí spojených so vznikom finálneho produktu od jeho vstupu do výroby v podobe nespracovaného materiálu [46, 47].

Hlavnými benefitmi správne implementovaného systému MES by na mali byť najmä:

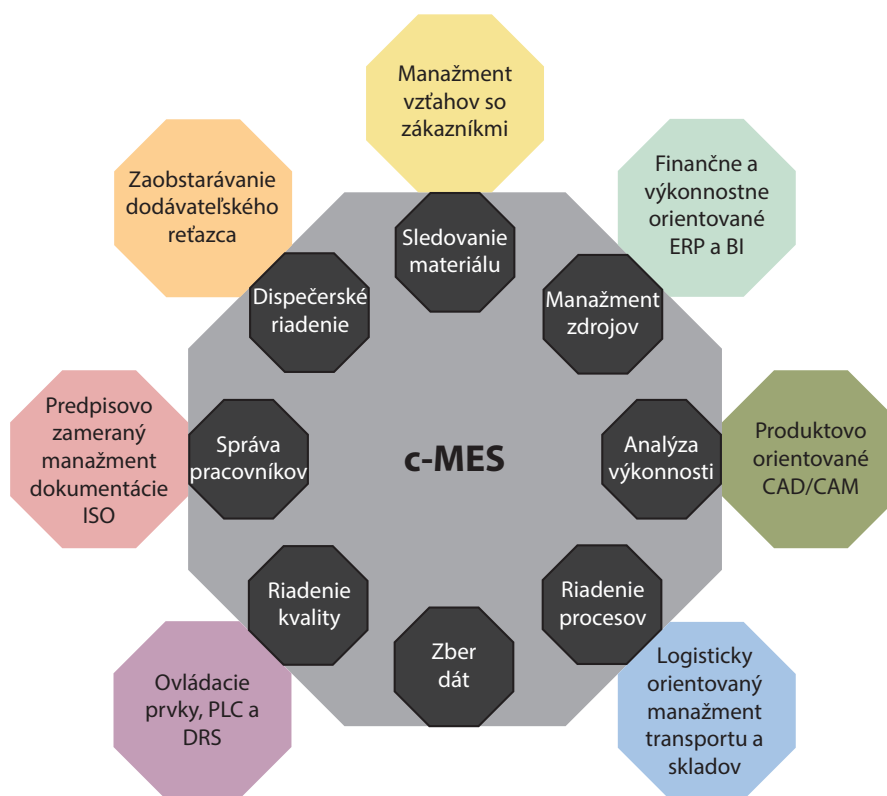
- Jednoduchá dohľadateľnosť výroby
- Zabezpečenie neskreslených dát z výroby
- Zníženie prestojov a skrátenie časov ladenie strojov
- Zvýšenie celkovej efektivity zariadení
- Znižovanie skladových zásob
- Zavedenie bezpapierovej výroby
- Presné ekonomické vyhodnotenie výroby

Okrem spomínaných benefitov je správne implementovaný MES dôležitý aj v kontexte digitálnych dvojčiat výrobných systémov. Integrácia digitálnych dvojčiat a MES môže priniesť významné výhody. Systém MES, so svojou schopnosťou riadiť a monitorovať výrobný proces, môže digitálnemu dvojčiatu dodávať údaje v reálnom čase. To naopak zabezpečuje, že digitálne dvojča poskytuje presnú a aktuálnu reprezentáciu výrobného procesu [48].

Navyše, poznatky získané z digitálneho dvojčata môžu byť zasielané späť do systému MES s cieľom optimalizovať výrobné procesy, zefektívniť pracovné postupy alebo predvídať potrebnú údržbu strojov. MES je následne schopný skrz svoje rozhrania poskytnúť tieto informácie nižším úrovniam, ktoré ich môžu fyzicky implementovať. Táto spolupráca medzi digitálnym dvojčatom a MES tak zabezpečuje nepretržité zlepšovanie naprieč podnikom.

Je nutné podotknúť, že postupom času sa ukázalo rozdelenie týchto funkčných skupín ako menej orientované na manažérsku vrstvu. Pre vytvorenie hlbšieho prepojenia medzi systémami MES a ERP preto v roku 2004 MESA predstavila tzv. kolaboratívny MES (c-MES), v rámci ktorého došlo k splynutiu niektorých

funkčných skupín s cieľom prehĺbenia spojenia s ostatnými systémami, s ktorými MES interaguje a premostuje [49]. Finálny model c-MES je zobrazený na obr. 10.



Obr. 10: Kolaboratívny MES model s upravenými funkčnými skupinami a interagujúcimi systémami, vlastná tvorba podľa [49]

### 3.2.1 Odvádzanie výroby pomocou MES

Odvádzanie výroby je úkon, ktorý umožňuje výrobnému podniku presne zadávať a evidovať výkony, ktoré sa týkajú výroby produktov spolu s podrobnými informáciami, a tieto výkony takisto následne odvádzať. V praxi sa odvádzanie výroby realizuje pomocou tzv. sprievodiek, teda dokladov, do ktorých sa zadávajú všetky potrebné a sledované informácie v rámci jednotlivých technologických operácií. Vo všeobecnosti sa sprievodky delia na dva typy, konkrétne na plánovacie sprievodky a odvádzacie sprievodky [50].

Plánovacie sprievodky slúžia na plánovanie výrobného procesu. Z technologických postupov sa do nich kopírujú plánované množstvá, avšak tieto množstvá nemusia zodpovedať skutočným množstvám a je možné ich tak ešte meniť. Z tohto dôvodu slúžia plánovacie sprievodky len ako určitý predpis pre výrobný proces a odvádzacie sprievodky [50].

Odvádzacia sprievodka je následne už skutočným dokladom, podľa ktorého sa vykonáva operácia odvádzania výroby. Na rozdiel od plánovacej sprievodky už

obsahuje skutočné množstvá, na základe ktorých sa vykonáva spotreba materiálu z výrobných skladov, ako aj príjem polotovaru alebo hotového výrobku na sklad. Na každú operáciu by mala vznikáť jedna odvádzacia sprievodka. Sprievodky ďalej obsahujú množstvo iných údajov, ako napríklad ktorý pracovník a v akej smene danú operáciu vykonal, počty správne a nesprávne vyrobených kusov, doba trvania danej operácie a iné. Všetky tieto informácie sú dôležité pre kontrolu zákaziek, avšak môžu slúžiť aj na účely vyhodnocovania výkonnostných ukazovateľov alebo ako vstupné dáta pri optimalizácii jednotlivých operácií [50].

V minulosti sa sprievodky dodávali s materiálom v papierovej forme, do ktorej príslušní pracovníci vo výrobe vyplňali potrebné údaje. Takto vyplnené sprievodky sa následne evidovali do rôznych databáz, ktoré jednotlivé spoločnosti využívali. Mohlo ísť napríklad o jednoduchú databázu vytvorenú v tabuľkovom procesore MS Excel alebo v rôznych softvéroch slúžiacich na tieto účely. Tento spôsob zberu dát z výroby mal však viacero nevýhod. Kvôli potrebe prepisovania z papierovej formy do elektronickej dochádzalo k zbytočnému zaťažovaniu pracovníkov. Ďalším problémom bola neobjektívna informovanosť o stave zákazky, kvôli časovému rozdielu vznikajúcemu medzi skutočným odvedením operácie vo výrobe a nahraním do elektronickej podoby. Dáta nebolo možné použiť ani na ohodnotenie pracovníkov vo výrobe z dôvodu možnosti ich skreslenia [51].

Kvôli týmto dôvodom sa s nástupom MES v rámci odstraňovania papierov z výroby prešlo na elektronicke sprievodky. Takáto elektronicke sprievodka sa môže vyplňať na terminálovom počítači vo výrobe alebo priamo na stroji, kedy si samotný stroj vie následne kontrolovať a priebežne aktualizovať informácie o vyrobených kusoch, nesprávne vyrobených kusoch alebo pracovníkovi, ktorý stroj obsluhuje. Ďalšou možnosťou je použitie čítačiek QR alebo čiarových kódov z existujúcich papierových sprievodiek, ktoré sa takisto postarajú o automatické zavedenie potrebných informácií do systému. Primárnou výhodou elektronickeho zadávania sprievodiek oproti papierovej forme je automatické nahrávanie do databáz, odkiaľ sú dáta ihneď k dispozícii. To umožňuje rýchlu kontrolu plnenia plánovania alebo využitia stroja. Ďalším aspektom je minimálny čas pracovníka strávený odvádzaním výroby a informovanosť zákazníka o stave zákazky v reálnom čase [52].



The screenshot shows the 'Průvodky - Realizace' window in the K2 software. It displays production order details for 'KOLO PŘEDNÍ' (Front Wheel) with a planned quantity of 10,000 units. The planned price is 18,850.00, and the actual price is 14,242.00. The order is for 'Kolo přední Shimano-Mavic MTB Deore XT - XM3' in quantity 10,000.

Kód	Popis operace	Plán. množství	Skut. množství	Množ. zmetků	Plán. částka	Skut. částka	Plán. čas	Skut. čas
01	Výplet kola	10,0000	10,0000	0,0000	14 360,0000	10 592,0000	150,0000	150,0000
02	Centrování kola	10,0000	10,0000	0,0000	200,0000	200,0000	100,0000	100,0000
03	Opláštění a nafoukání kola	10,0000	10,0000	0,0000	4 290,0000	3 450,0000	50,0000	50,0000

Kniha / Ob.	Číslo Popis	Šarže	Množství MJ	O	R	V	P
OD 2011	24 Kolo přední Shimano-Mavic MTB	01 201111116-001	10,0000 ks	O	R	V	P
OD 2011	25 Kolo přední Shimano-Mavic MTB	02 201111116-001	10,0000 ks	O	r	v	p
OD 2011	26 Kolo přední Shimano-Mavic MTB	201111116-001	10,0000 ks	O	R	V	P

Obr. 11: Elektronická sprievodka v softvéri K2 [50]

### 3.3 Klúčové ukazovatele výkonnosti

Ključové ukazovatele výkonnosti (angl. key performance indicators; KPI) sa používajú na kvantifikáciu efektívnosti rôznych procesov v podnikoch. KPI môžu slúžiť ako metrika s ohľadom na kritické faktory úspechu podniku alebo ako kontrola a prostriedok na plnenie cieľov stanovených vo vyšších vrstvách štandardu ISA-95. Využívanie KPI umožňuje zmerať pokrok vykonaný pri naplňaní cieľov stanovených podnikom, ako aj posúdenie ich dosiahnutia. Keďže parametrov, ktoré je vo výrobnom systéme možné merať, je mnoho, pre efektívne fungovanie KPI je dôležité ich presné stanovenie. V zásade je možné rozdeliť tieto ukazovatele na dva druhy:

- Priame ukazovatele
- Nepriame ukazovatele

Medzi priame ukazovatele patria také, ktoré môžu byť vyčíslené priamo z podnikových dát. Takéto ukazovatele môžu byť naviazané na počet vyrobených kusov, množstvo materiálu na sklade, mesačné obraty podniku, plnenie zákaziek a iné [53].

Nepriame ukazovatele naopak nie sú priamo vyčísľiteľné z dát, ktoré má podnik k dispozícii. Na to, aby dávali zmysluplné výsledky, je často potrebné štatistické vyhodnotenie viacerých priamych KPI. Takéto nepriame KPI môžu byť napríklad efektivita školenia personálu, hodnotenie dodávateľov a iné [53].

Aj napriek tomu, že priame KPI sú jednoduchšie na meranie a kontrolu, nepriame KPI väčšinou prinášajú hlbší náhľad do problémov a procesov. Z tohto dôvodu je mimoriadne dôležité zvoliť správne metriky, ktoré umožnia presné monitorovanie konkrétnych procesov pre správne napredovanie podniku ako takého.

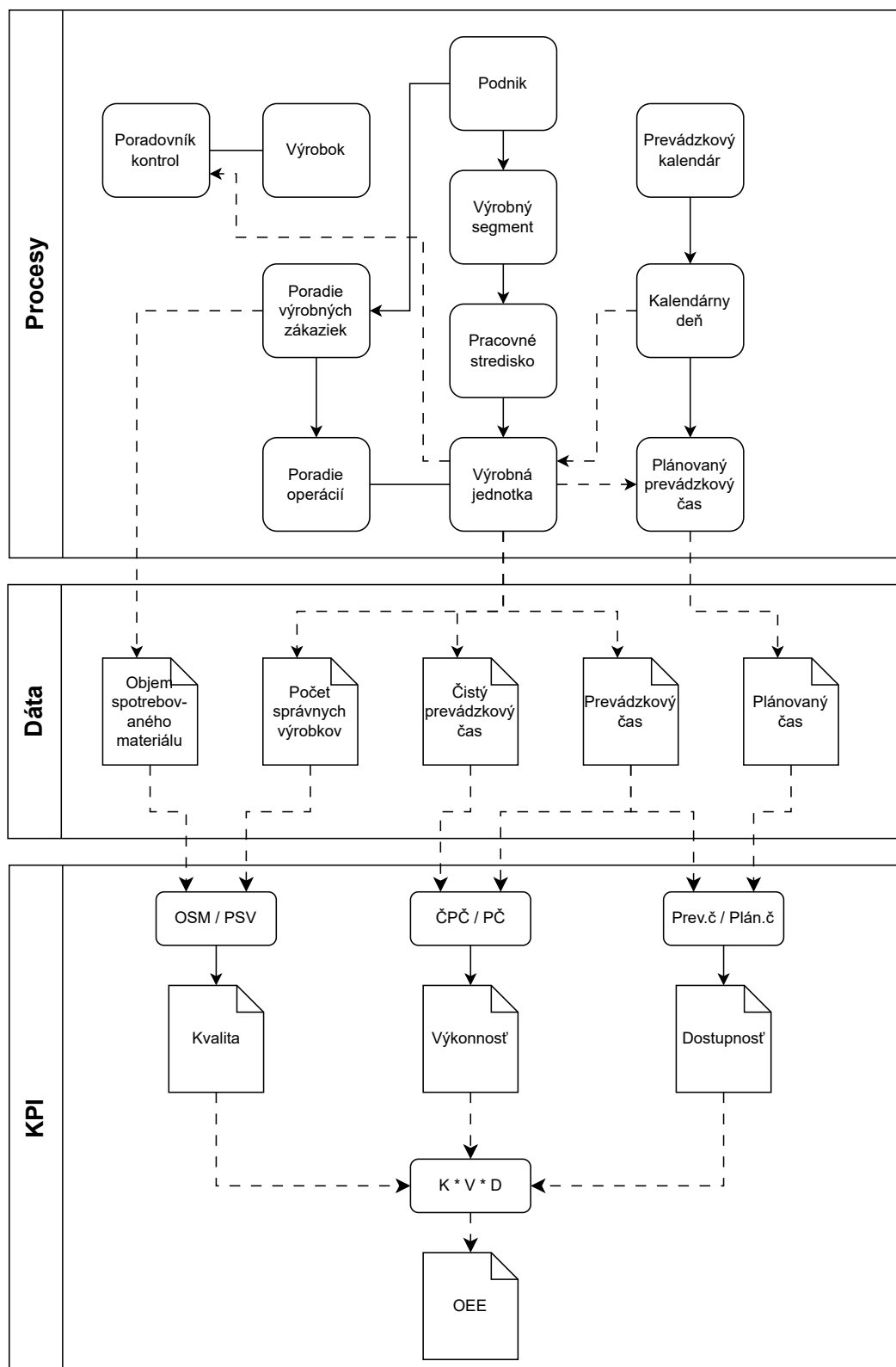
### 3.3.1 ISO 22400

Keďže každý podnik má špecifické ciele a potreby, vytvára si podľa toho aj kľúčové ukazovatele. Tieto ukazovatele sa riadia politikou konkrétnej firmy, čo má za následok veľký rozkol v chápaní a reprezentácii KPI. Z tohto dôvodu bol vytvorený štandard ISO 22400, ktorý definuje KPI vo výrobných systémoch. Vytvorenie štandardu má za cieľ jednotné vytváranie a využívanie KPI naprieč priemyslom, čo prináša jednoznačné benefity. Jedným z takýchto benefitov je napríklad možnosť jednoduchého porovnania rôznych firiem, napríklad z dôvodu zistenia konkurencieschopnosti. ISO 22400 navyše pracuje v priamom spojení so štandardom ISA-95 pre čo najvhodnejšiu definíciu kľúčových ukazovateľov výkonnosti naprieč všetkými vrstvami. Prepojenie s ISA-95 štandardom je výhodné vzhľadom na väčšiu dostupnosť dát v dôsledku automatizácie toku dát naprieč všetkými vrstvami [54, 55].

Aby sa predišlo rôznym interpretáciám na strane firiem, tento štandard takisto stanovuje presný spôsob dokumentácie a vytvárania KPI. Každé KPI by malo byť vytvorené spoločne s popisnou tabuľkou (tab. 1). Na základe tejto tabuľky by malo byť ihneď zrejmé, na čo dané KPI slúži, v akých hodnotách sa má jeho hodnota pohybovať a aké dáta sú pre jeho výpočet potrebné. Popri popisnej tabuľke je doporučené vytvorenie modelového diagramu. Samotný model pozostáva z troch častí zahrňujúcich procesy, dáta a KPI, medzi ktorými zobrazuje vzájomné závislosti. Takto vytvorený model slúži ako informatívny prehľad, na základe ktorého je zrejmé, z akých procesov dáta pochádzajú, aké metriky sú dôležité pre výpočet KPI a ako samotné KPI koreluje s ostatnými KPI [53]. Príklad modelového diagramu je zobrazený na obr. 12.

Tab. 1: Popisná tabuľka KPI podľa štandardu ISO 22400

<b>Popis KPI</b>	
<b>Obsah:</b>	
Názov	Názov KPI
ID	Jedinečný identifikátor KPI v podnikovom prostredí definovaný užívateľom
Popis	Stručný popis KPI
Sféra pôsobnosti	Oblasť, na ktorú je KPI zamerané (výrobná linka, personál, produkt a iné)
Vzorec	Matematický vzorec pre výpočet KPI
Jednotka	Jednotka alebo rozmer, v ktorom sa KPI vyčísluje
Rozsah	Logicky stanovené horné a dolné medze KPI
Trend zlepšenia	Smer vývoja k zlepšeniu (väčšia hodnota je lepšia alebo menšia hodnota je lepšia)
<b>Kontext:</b>	
Časovanie merania	Meranie môže byť v reálnom čase, periodicky alebo náhodne na vyžiadanie
Záujmová skupina	Môže sa jednať o manažment, obsluhu strojov alebo kontrolórov
Výrobná metodika	Pre ktorú metodiku je KPI použiteľné (môže sa jednať o diskretnú, dávkovú alebo priebežnú výrobu)
Modelový diagram	Grafické zobrazenie vzťahov medzi procesmi, dátami a inými KPI (voliteľné)
Poznámky	Doplnkové informácie súvisiace s KPI



Obr. 12: Modelový diagram KPI, upravené [53]

### 3.3.2 Najbežnejšie ukazovatele výkonnosti

Keďže potreby každého podniku sú veľmi špecifické, podľa nich si aj samotné podniky volia svoje KPI. Pre pomoc pri zavádzaní KPI sa MESA rozhodla spraviť prieskum najbežnejšie využívaných KPI v priemysle, ako pomôcku pri výbere, s implementáciou ktorých KPI je vhodné začať. Celkový počet najbežnejšie používaných KPI MESA stanovila na 27, s pridelením do príslušných kategórií [56]. Pre ukážku sú niektoré z týchto KPI zobrazené v tab. 2.

Tab. 2: Výber najbežnejšie používaných KPI v priemysle s odkazom na MESA

Kategória KPI	Názov KPI	Stručný popis
Zlepšenie kvality	Bezchybný prechod (angl. first pass yield; FPY)	Tento ukazovateľ udáva aké percento výrobkov prejde výrobným procesom na prvýkrát bez nezhôd
Zlepšenie efektivity	Miera priepustnosti (angl. throughput rate)	Pomocou tohto ukazovateľa sa meria koľko kusov produktu je vyrobených na stroji alebo výrobnej linke za určitý čas
Zlepšenie efektivity	Dostupnosť zariadenia (angl. availability)	Udáva aké množstvo z výrobnéj kapacity je využívané v danom čase
Zlepšenie efektivity	Celková efektívnosť zariadenia (angl. overall equipment effectiveness; OEE)	Počíta sa ako súčin priamych KPI dostupnosti zariadenia, výkonu zariadenia a kvality výroby. Tento ukazovateľ efektívnosti sa používa ako na jednotlivé stroje, tak na celé podniky. Slúži najmä firmám, ktoré sa snažia o neustále zlepšovanie a zoštieňovanie výroby [57]
Znižovanie ceny a zvyšovanie výnosnosti	Spotreba energie (angl. energy consumption)	Jedná sa o metriku spotreby energie (elektriny, pohonnej hmoty, vzduchu ai.) na výrobu určitého počtu výrobkov



## 4 Typy simulácií

Ako už bolo v predchádzajúcich kapitolách predstavené, smerovanie priemyslu leží v maximálnej automatizácii procesov a výmeny dát v rámci jednotlivých úrovní podniku, ale aj medzi úrovňami samotnými. Novodobé technológie pomáhajú získavať veľké objemy dát v reálnom čase, ktoré obsahujú cenné informácie o stave procesov, ako aj o možnostiach ich ďalšieho zlepšovania. Samotné dáta však nemajú zmysel bez ich ďalšieho spracovania. Okrem využívania dát napríklad na predikciu údržby alebo výpočet kľúčových ukazovateľov výkonnosti, je ďalšou dôležitou oblasťou aj simulovanie.

Simulovanie vo výrobnom sektore predstavuje nástroj, pomocou ktorého sú podniky schopné lepšie predvídať správanie systému. Ide o testovanie dopadov rôznych rozhodnutí na simulačnom modeli skôr, ako sa jedno z rozhodnutí uskutoční v reálnej výrobe. Touto cestou dochádza k minimalizácii rizika a zvyšovaniu efektivity rozhodovania na úrovni podnikového riadenia [58]. V dnešnej dobe sa simulovanie presúva čoraz bližšie k samotným strojom, kde IoT zariadenia sú schopné takmer v reálnom čase odosielať dáta digitálnemu dvojčetu, ktoré je schopné udržiavať aktuálny stav zariadení, analyzovať ho a naspäť do svojej fyzickej dvojčky posilať úpravy parametrov v rámci optimalizácie chodu. Vzhľadom na povahu problému, či už sa jedná o riadenie stroja vo výrobe alebo logistiku, je dôležitá správna voľba typu simulácie. Jednotlivé typy simulácií spoločne s možnosťami ich využitia budú predstavené v nasledujúcej časti.

### 4.1 Diskrétna simulácia

Diskrétna simulácia (angl. discrete event simulation; DES) je druh simulácie, v ktorej sú systémové operácie reprezentované ako body v čase v chronologickom poradí. Každý z bodov predstavuje určitú udalosť, ktorá vedie k zmene stavu systému. Každá udalosť je okamžitá, znamenajúc, že systém prechádza priamo z jedného stavu do druhého po dosiahnutí novej udalosti. Spoločne so zmenou stavu sa priamo zmení aj čas v rámci simulácie. Obdobie medzi zmenami stavov sa označuje za nevýznamné alebo nedeterministické [59].

Algoritmus diskkrétnej simulácie je založený na inicializácii v nultom stave. Následne algoritmus skontroluje, či nie je splnená ukončovacia podmienka. V prípade, že ukončovacia podmienka nie je splnená, presúva sa na očakávanie nasledujúceho stavu, ktorý si načíta z časovej osi. V momente, keď tento stav nastane, posúva sa na časovej osi a zároveň mení svoj stav systému na novo dosiahnutý. V neposlednom rade pozbiera potrebné dáta, ktoré by mohli byť potrebné pre analýzu, štatistiku alebo určenie ďalšieho stavu. Po tomto kroku sa

celý algoritmus vracia do kontroly ukončovacej podmienky a prípadného čakania na nový stav, ak ukončovacia podmienka nebola dosiahnutá. Výhodou DES je možnosť simulácie ako deterministických, tak stochastických systémov. Pri stochastických modeloch sa do simulácie musí zaradiť známe rozdelenie pravdepodobnosti pre dané náhodné veličiny, ktoré vplývajú na stav systému. V tomto kroku je pred prechodom do nového stavu systému vygenerovaný zoznam možných nasledujúcich stavov [58, 60].

Vo všeobecnosti môže byť DES využitá na modelovanie, simuláciu, optimalizáciu a vizualizáciu výrobných procesov. Používateľ je pomocou nej schopný vykonávať analýzy systémových charakteristík, odhaľovať úzke miesta výroby, zlepšovať využívanie zdrojov alebo predchádzať procesným chybám. Vďaka tejto vysokej miere flexibility je práve DES jednou z najvyužívanejších simulačných techník v rámci výrobných systémov.

Pojem DES vďaka vyššie spomenutým vlastnostiam úzko súvisí aj s digitálnymi dvojčatami. Ako bolo opísané v kapitole č. 2, digitálne dvojča slúži ako virtuálna kópia určitého reálneho systému, ktorý zbiera a manipuluje s dátami prijímanými z reálneho náprotivku. Tieto dáta sú následne využívané na rôzne účely, ktoré boli opísané takisto v spomínanej kapitole. Na väčšinu z týchto operácií sa využívajú práve schopnosti DES, ktoré sa javia ako najvhodnejšie. Silu prepojenia DT a DES je možné demonštrovať napríklad na prípade z článku [61]. V tejto prípadovej štúdií bol vytvorený digitálny model využívajúci diskrétnu simuláciu fabriky na výrobu prevodoviek. Tento digitálny model bol schopný prijímať dáta z reálneho podniku, na základe ktorých udržiaval aktuálny stav výroby. Navyše, na základe prijímaných dát bol schopný počítat a priebežne aktualizovať stanovené KPI a ponúkať podnety na možnú optimalizáciu výrobných procesov.

V ďalšom článku [62] sa autori zamerali na využitie digitálnych dvojčiat a diskrétnej simulácie v oblasti logistiky. V tomto prípade sa na základe dát z výroby a stochastických simulácií snažili zautomatizovať včasné naskladňovanie materiálu.

S ohľadom na časté využívanie diskrétnych simulácií existuje celá rada programov slúžiacich na tieto účely. Medzi najznámejšie komerčné softvéry patria Arena (Rockwell Automation) a Tecnomatix Plant Simulation (Siemens). Z open-source softvérov sú to potom JaamSim (JaamSim Software) alebo Salabim v programovacom jazyku Python [58].

## 4.2 Spojitá simulácia

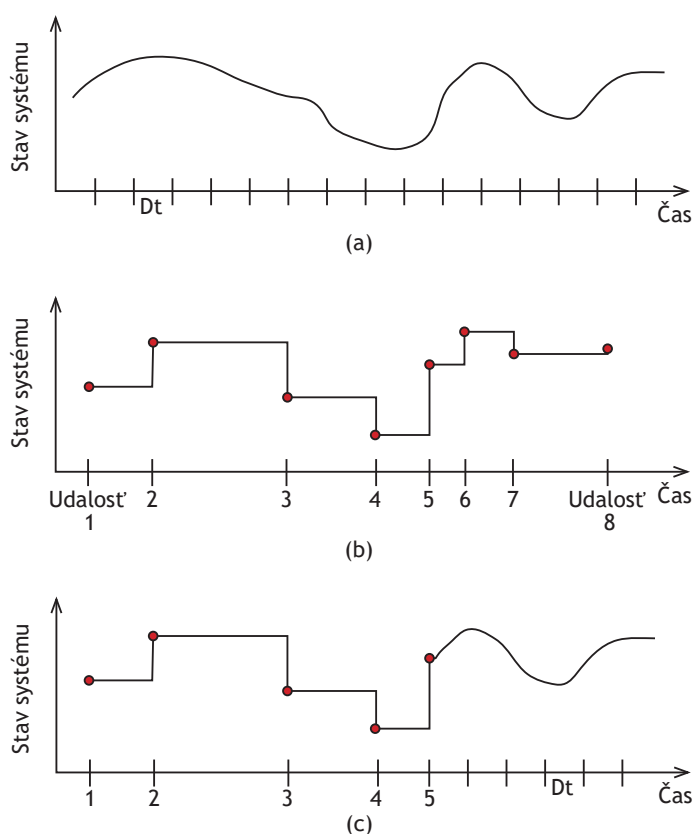
Spojité simulácie sú ďalším z možných druhov simulácie. Na rozdiel od diskrétnej simulácie, kde sa stav systému mení na základe dosiahnutia novej udalosti, v prípade spojitých simulácií sa stav systému mení po pevne stanovenom časovom úseku. Táto



simulácia vychádza z myšlienky znalosti počiatočného stavu, na základe ktorého je možné spočítať stav v nadväzujúcom okamihu s malým časovým prírastkom. Keďže časový prírastok môže byť teoreticky určený ako limitne nulový, je možné simulovať vývoj systému spojito v čase, z čoho vychádza názov tohto druhu simulácie. Tento druh simulácie je hojne využívaný najmä na potreby skúmania dynamiky systémov a ich riadenia [63].

Medzi najznámejšie softvérové nástroje na spojité simulácie patria Simulink (MATLAB) a Stella (Isee Systems) [58].

Takisto je známa kombinovaná simulácia, ktorá kombinuje DES so spojitou simuláciou. Vo výrobnom prostredí sa tento druh využíva napríklad pre simuláciu tepelných alebo chemických procesov, kedy nie je vhodné samotnú reakciu simulovať diskkrétne, avšak určité jej prvky tak simulovať idú [63]. Všetky doposiaľ spomínané typy sú zobrazené na obr. 13.



Obr. 13: Porovnanie typov simulácií, spojité simulácia (a), diskkrétne simulácia (b) a kombinovaná simulácia (c), upravené [64]

### 4.3 Ostatné druhy simulácií

Diskrétné a spojité simulácie patria k najbežnejším druhom simulácií, avšak ani zďaleka nie sú jediné. Medzi ďalšie známe simulácie patrí napríklad metóda Monte Carlo, ktorá využíva stochastický prístup na odhad možných výstupov zo systému. Ďalšou možnou metódou je modelovanie systémov pomocou agentov, ktorí sa správajú ako samostatné entity a pomocou nich sa odhaduje možný výstup systému. Žiadna z týchto metód však nie je do väčšej miery využívaná v prípade výrobných systémov a ich digitálnych dvojčiat [63, 65, 66].

## 5 Praktická část

V nasledujúcej kapitole bude postupne rozoberaná metodika zhotovenia digitálneho dvojčata vybraného výrobného systému v jednom z dostupných softvérov, ako aj finálne zhodnotenie prínosu tohto digitálneho dvojčata pre konkrétny systém, najmä v oblasti interakcie s MES daného podniku a možnosti optimalizácie výrobného procesu s využitím simulačného modulu.

### 5.1 Rozbor praktickej časti

Podkladom pre vytvorenie digitálneho dvojčata bol zvolený výrobný systém zaoberajúci sa výrobou ložísk pre industriálne účely. Jednou z hlavných motivácií pre výber tohto systému je najmä fakt, že sa jedná o skutočný výrobný systém, s ktorým bude možné porovnávať výstupy z digitálneho dvojčata. Ďalšou pridanou hodnotou je existencia a dostupnosť schémy výrobnéj haly a technologických postupov. Výroba ložísk je taktiež komplexný proces, skladajúci sa z veľkého počtu krokov. To vytvára priestor na možné hľadanie optimalizácií výrobných procesov, kedy aj malá úspora na kusovom čase môže podniku priniesť veľké zlepšenia vzhľadom na veľké objemy výrobkov. Práve takéto prostredie je vhodné pre implementáciu digitálneho dvojčata. Vzhľadom na možnosti digitálnych dvojčiat je možné identifikovať nedostatky vo výrobných procesoch. Návrhy na zlepšenie je potom možné nasimulovať a zistiť tak ich dopady na reálnu výrobu. Takto získané dáta tak môžu slúžiť samotnému podniku pre zefektívnenie výroby.

### 5.2 Softvér pre vytvorenie digitálneho dvojčata

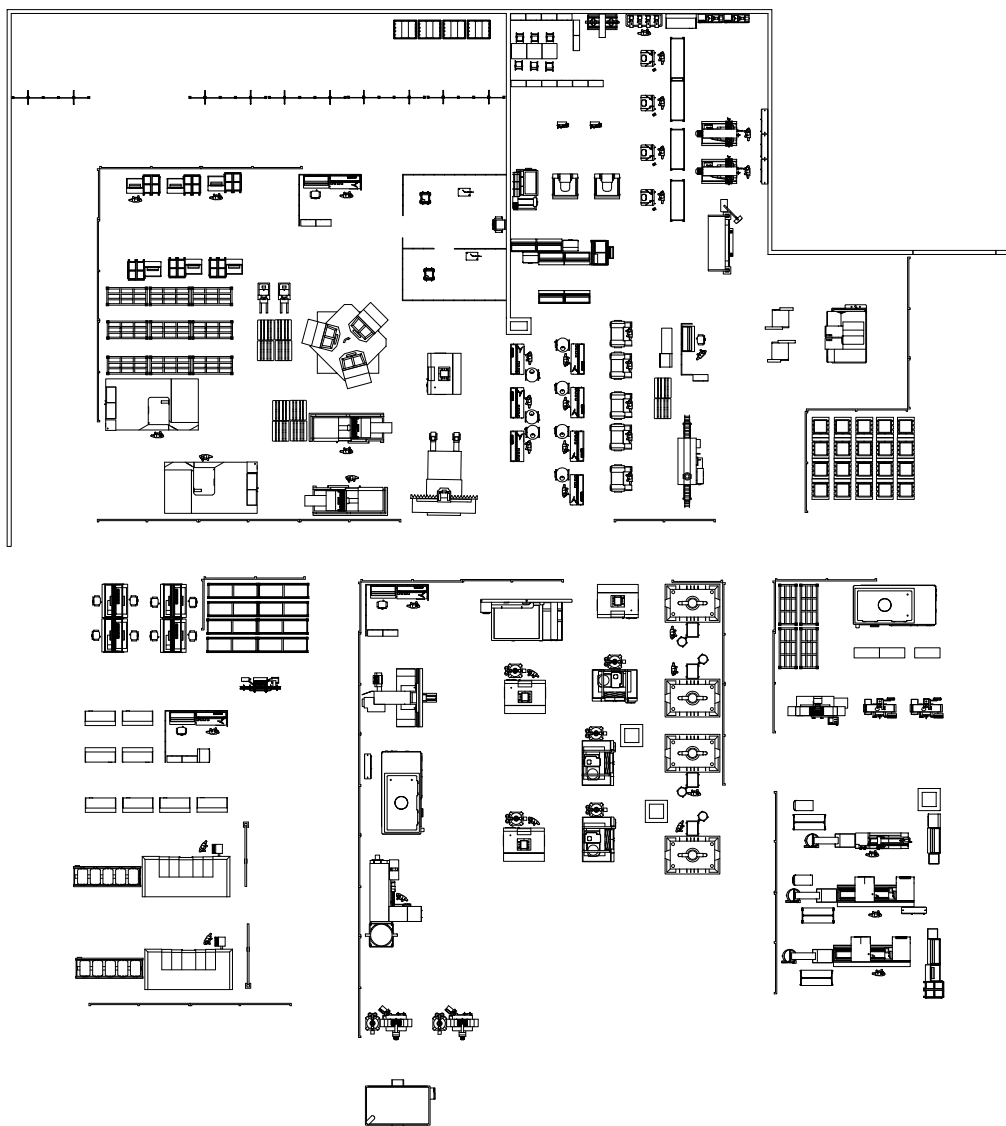
Vzhľadom na širokú škálu dostupných softvérov pre tvorbu digitálnych dvojčiat podnikov a výrobných systémov bola zhotovená rešerš (tab. 3) najbežnejšie využívaných softvérov pre tieto účely. V rámci tejto rešerše boli zahrnuté komerčné aj bezplatné produkty. Na základe potrieb tejto diplomovej práce, ktorými sú najmä možnosť diskretných simulácií alebo zastúpenie MES, bol ako použitý softvér vybraný SIM\_4\_PLAN. Jedná sa o komerčný softvér, poskytnutý vedúcim tejto diplomovej práce, medzi ktorého najväčšie výhody patrí najmä možnosť operovať v dvoch rôznych režimoch. Tvorba digitálneho dvojčata prebieha v prevádzkovom režime, v rámci ktorého je digitálne dvojča určité funkcie MES, ako napríklad odvádzanie výroby alebo plánovanie. V druhom, simulačnom režime softvér zastupuje funkciu diskretnej simulácie. V rámci tohto režimu je potom možné simulovať rôzne výrobné scenáre a skúmať ich vlastnosti, ako napríklad využitie jednotlivých strojov alebo tok materiálu výrobou.

Tab. 3: Prehľad dostupného softvéru pre tvorbu digitálnych dvojčiat

Názov a spoločnosť	Licencovanie	Typ vizualizácie	Možnosti simulácie	Hlavné funkcie
visTablet (Plavis)	Komerčné (ročné predplátne)	2D/3D	Diskrétna simulácia	Analýza a optimalizácia toku materiálu, Sankeyoy diagram, optimalizácia rozvrhnutia strojov, Analýza výkonnosti výrobného systému
Tecnomatix (Siemens)	Komerčné (ročné predplátne)	3D	Diskrétna simulácia	Sankeyho a Ganttove diagramy, jednoduchá integrácia v rámci ostatných systémov, optimalizácie s využitím neuronových sietí
JaamSim (JaamSim soft)	Open source	2D	Diskrétna simulácia	Bezplatná alternatíva ku komerčne dostupnému softvéru pre modelovanie výrobných a logistických systémov, Analýza a simulácie výrobných procesov, KPI
aP Generale (aPriori)	Komerčné (ročné predplátne)	3D	Spojité simulácie	v reálnom čase, jednoduchá integrácia v rámci podnikového ERP systému, hodnotenie efektívnosti dodavateľského reťazca
FlexSim (AUTODESK)	Komerčné	3D	Diskrétna simulácia	čase, rozsiahle možnosti DES a analytických nástrojov pre podporu prijímania rozhodnutí v oblasti výrobných procesov, Možnosť jednoduchej integrácie v rámci
SIM 4 PLAN	Komerčné	2D	Diskrétna simulácia	podnikového ERP, prevádzkový a simulačný režim, možnosti diskretných simulácií s podporou vstavaných analytických nástrojov

### 5.3 Podklady pre tvorbu digitálneho dvojčata

Jedným z najdôležitejších podkladov, poskytnutých výrobným podnikom, bola schéma výrobnjej haly. Vzhľadom na jej veľkosť a fakt, že veľkú časť zaberali nevýrobné priestory a iné výrobné segmenty podniku, bola táto schéma pretvorená v programe AutoCAD Architecture. Na základe pôvodnej predlohy bola vytvorená nová schéma, ktorá zobrazuje iba plochy patriace segmentu, ktorému bude digitálne dvojčá vytvorené. Táto upravená schéma je zobrazená na obr. 14. Z pohľadu tvorby digitálneho dvojčata je dôležitá pre realistické rozloženie strojov a medziskladov, čo je kľúčové pre logistiku, na ktorú sa softvér SIM\_4\_PLAN zameriava. Dodržanie rozloženia reálneho systému takisto zlepšuje orientáciu v digitálnom dvojčati a zjednodušuje jeho budúce úpravy.



Obr. 14: Schéma výrobnjej haly

Okrem schémy výrobnjej haly sú takisto podstatné výrobné postupy, ktoré stanovujú jednotlivé poradie úkonov potrebných na vytvorenie finálneho produktu, ako aj čas, koľko jednotlivé kroky trvajú, prípadne koľko zaberie nastavenie týchto strojov. Príklad takéhoto výrobného postupu je zobrazený na obr. 15.

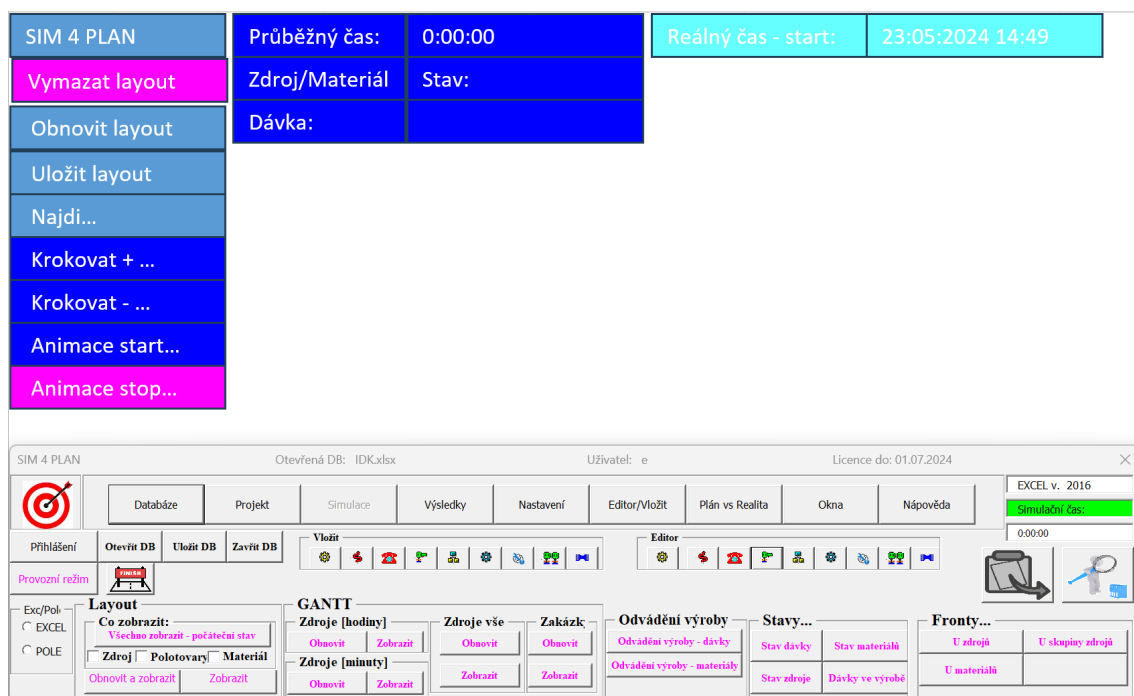
Vrg	Start	Arbeits...	W...	St...	Kurztext Vorgang	T...	SysStatus	KO...	F...	EPK	BEZ	Vorgangsm...	Rückgemel...	Rückg...	M
0010	22:00:01	01001233	0095	ZP18	WZG-VORB SEGM.01 KST.2154		RÜCK ABGS AUGB DR...						6.200	0	05^
0020	09:30:12	12002510	0095	ZP01	ODREZAT KRUZOK / ROHL.ABTREN.A LG		RÜCK ABGS DRUC FR...						6.200	6.200	05^
0021	06:00:00		0095	ZQ05	ODREZAT KRUZOK		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0030	23:40:22	95-55123	0095	ZP04	PRANIE KB2 / WASCHEN		RÜCK ABGS AUGB DR...						6.200	6.182	05^
0040	23:40:22	10029229	0095	ZQ01	LISOVANIE PROFILU / AUFWEITEN		RÜCK ABGS DRUC FR...						6.200	5.948	2345^
0050	04:35:25	12131322	0095	ZQ01	SUSTRUZENIE NAKRUZKOV + PROFILU		RÜCK ABGS DRUC FR...						6.200	5.943	115^
0060	08:06:00	01002076	0095	ZP01	100% kontrola trhlín		RÜCK ABGS DRUC FR...						6.200	4.331	215^
0070	03:01:16	10026324	0095	ZQ01	STRIH OKIENOK / TASCHEN STANZEN		RÜCK ABGS AUGB DR...						6.200	5.786	825^
0080	08:36:06	95-55123	0095	ZQ04	PRANIE KB2 / WASCHEN		RÜCK ABGS AUGB DR...						6.200	5.788	05^
0090	08:36:06	12023828	0095	ZQ01	SMIRGLOVANIE CIEL / SIETEN SCHMIRGELN		RÜCK ABGS DRUC FR...						6.200	5.786	25^
0129	06:00:00	95-14006	0095	ZP05	Prog.c.3:2000ot/min.12ks zavses/144ks kos		ABGS DRUC FREI						6.200	0	05^
0130	16:20:00	12399757	0095	ZP01	TRYSKANIE NA KOSI / SANDSTRAHLEN		RÜCK ABGS DRUC FR...						6.200	5.303	05^
0131	06:00:00		0095	ZQ05	TRYSKANIE		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0170	15:30:00	95-14499	0095	ZP04	PRANIE KB2 / WASCHEN		RÜCK ABGS AUGB DR...						6.200	6.000	05^
0180	15:30:00	85025864	0095	ZP01	HAERTEN - KALIT SAFED		RÜCK ABGS AUGB DR...						6.200	5.997	33^
0181	06:00:00		0095	ZQ05	TS - DC0*(RST**)/DD12/E235/C15M/25CMo4		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0190	06:00:00	95-14246	0095	ZP05	KONTROLA PO KALENI		ABGS DRUC FREI						6.200	0	05^
0200	14:02:00	01001198	0095	ZP26	TRNOVANIE/KRUZKOVANIE 20%		RÜCK ABGS DRUC FR...						1.240	0	05^
0201	06:00:00		0095	ZQ05	KONTROLA KRUZOK / TRN		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0210	14:02:00	12023779	0095	ZP01	100% KALIBROVANIE		RÜCK ABGS AUGB DR...						6.200	5.761	05^
0211	06:00:00		0095	ZQ05	KALIBROVANIE POVRCHU PO KALENI		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0220	06:47:31	95-55612	0095	ZP04	WASCHEN-PRANIE NA SUCHO P.P.20%		RÜCK ABGS AUGB DR...						1.240	1.180	05^
0229	04:22:00	01001469	0095	ZP26	100% KONTROLA TRHLIN P.P. / RISSPRUEFUNG		RÜCK ABGS AUGB DR...						3.100	755	05^
0230	06:00:01	12024295	0095	ZP26	100% KONTROLA TRHLIN P.P. / RISSPRUEFUNG		RÜCK ABGS DRUC FR...						3.100	0	05^
0231	06:00:00		0095	ZQ05	KONTROLA TRHLIN		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0240	06:00:01	12024295	0095	ZQ26	100% KONTROLA SIRKY		RÜCK ABGS AUGB DR...						3.100	3.511	05^
0241	06:00:00		0095	ZQ05	100% KONTROLA SIRKY		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0245	14:00:01	01001469	0095	ZP26	100% KONTROLA SIRKY		RÜCK ABGS AUGB DR...						3.100	2.250	05^
0246	06:00:00		0095	ZQ05	100% KONTROLA SIRKY		ABGS DRUC FREI PZ...						6.200	0	05^
0250	06:00:00	95-14001	0095	ZP05	STCK.KONTROLE U.ABLIEF		ABGS DRUC FREI						6.200	0	05^
0260	06:00:00	95-15151	0095	ZP05	F/V-PLAN FÜR KIR		ABGS DRUC FREI						6.200	0	05^

Obr. 15: Technologický postup výroby jedného z produktov

## 5.4 Metodika tvorby digitálneho dvojčata

Každý softvér na vytváranie digitálnych dvojčiat má svoje špecifiká. Z tohto dôvodu je vhodné popísať proces tvorby a implementácie v kontexte konkrétneho používaného softvéru, pričom sa objasnia jeho možnosti, jedinečné vlastnosti a samotné použitie. Nasledujúca časť bude preto venovaná metodike tvorby a implementácie digitálnych dvojčiat v prostredí SIM\_4\_PLAN tak, aby bolo možné zreprodukovať tento proces bez akýchkoľvek problémov.

Po inicializácii samotného programu a vytvorení projektu, do ktorého sa bude ukladať vznikajúce dvojča, sa zobrazí základný pracovný priestor. V tomto priestore bude postupne vznikať samotná schéma výrobného systému. Súčasťou pracovného priestoru je aj ovládací panel, ktorý slúži na ovládanie celého procesu od pridávania a editácie modulov až po simuláciu. Tento úvodný snímok je zobrazený na obr. 16. Je dôležité zdôrazniť, že proces tvorby prebieha v prevádzkovom režime programu. Režim, v ktorom sa program práve nachádza, je zobrazený v ľavej časti ovládacieho panela. Ak by sa používateľ snažil pridávať alebo editovať model v simulačnom režime, program ho na túto skutočnosť upozorní. Navyše sú jednotlivé režimy farebne rozlíšené, pričom farby jednotlivých režimov si môže používateľ zvoliť.

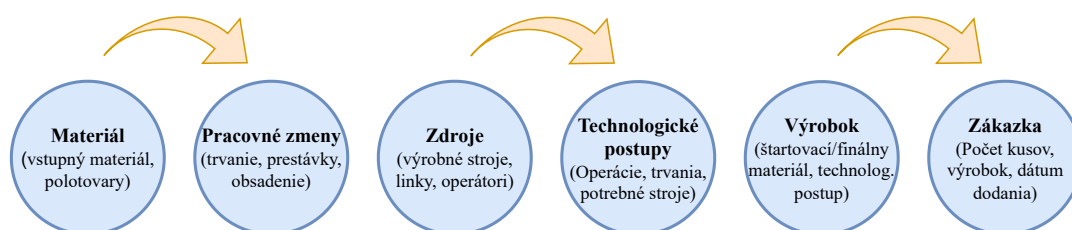


Obr. 16: Grafické rozhraní programu SIM\_4\_PLAN s oblastí pro schéma výrobného systému (horná část) a ovládacím panelom (dolná část)

Tvorba digitálneho dvojčata sa skladá z viacerých krokov. Pri ich nesprávnom poradí môže používateľ naraziť na problémy v dôsledku chýbajúcich častí, ktoré sú potrebné pre kompletizáciu modelu. Z tohto dôvodu je na obr. 17 vyobrazený odporúčaný postup spoločne s krátkym popisom, čo každý z krokov zahŕňa. Tento postup takisto reflektuje názvy jednotlivých modulov zo samotného programu tak, aby sa používateľ čo najlepšie zorientoval.

Ak používateľ zvolí iný postup tvorby, program umožňuje editovať každý z jednotlivých modulov. V prípade potreby je možné doplniť alebo upraviť potrebné parametre v ktorejkoľvek oblasti cez operačný panel a tlačidlo editácie.

### Proces tvorby modelu v SIM\_4\_PLAN



Obr. 17: Odporúčaný postup tvorby digitálneho dvojčata v SIM\_4\_PLAN

### 5.4.1 Materiál

Modul materiál, ako už názov napovedá, zhromažďuje všetky materiály, ktoré do výroby vstupujú alebo z nej vystupujú v podobe medziproduktov alebo finálnych materiálov. Tento modul má za úlohu kontrolovať množstvo materiálu na skladoch, ich postupné odoberanie v procese výroby a dopĺňanie. Medzi primárne parametre, ktoré je potrebné vyplniť pri vkladaní nového materiálu, patria:

- **Kapacita** – vyjadruje maximálne množstvo materiálu, ktoré je možné mať, napríklad z dôvodu limitácie skladoch. Kapacita nemá stanovenú jednotku, takže vzhľadom na typ výroby môže vyjadrovať množstvo v kusoch, litroch, kilogramoch alebo rôznych iných objemoch, ktoré sú pre danú výrobu najvhodnejšie.
- **Počiatočná úroveň** – odzrkadľuje aktuálne množstvo materiálu na sklade. Z tohto množstva je následne čerpané pri plnení výrobných zákaziek alebo, naopak, je jeho množstvo navyšované skrz naskladňovanie materiálu.

Obr. 18: Dialógové okno pre vkladanie materiálu

Ako ukazuje obr. 18, ako príkladný materiál bola vložená tyč, ktorá je v kontexte výroby ložísk využívaná ako vstupný materiál pre guľôčkové ložiská. Okrem spomínaných parametrov je takisto vhodné vyplniť okno popisu, do ktorého



je žiaduce popísať, na čo daný materiál slúži, prípadne v akých jednotkách je množstvo vyjadrované. Ostatné vopred vyplnené nastavenia, ktoré sa zameriavajú predovšetkým na spôsob dopĺňania materiálu, je možné upraviť podľa vlastných potrieb.

#### 5.4.2 Pracovné zmeny

Väčšina výrobných podnikov pracuje na báze zmennej prevádzky. Takáto zmenná prevádzka určuje stanovené doby, počas ktorých sa má určitá skupina zamestnancov vyskytovať v podniku. Tieto pracovné zmeny slúžia primárne na rozumné plánovanie, ktoré zabezpečuje čo najlepšie využitie pracovnej sily v podobe zamestnancov a vyťaženie zdrojov v podobe jednotlivých strojov alebo pracovísk.

V rámci programu SIM\_4\_PLAN modul pracovných zmien slúži na určenie, kedy budú jednotlivé stroje obsluhované a je možné ich považovať za aktívne, čo je podstatné z hľadiska plnenia zákaziek. Ďalším možným využitím tohto modulu je poskytovanie informácií pre prípadné pridružené systémy na správu ľudských zdrojov, kde pracovné zmeny môžu slúžiť na poskytnutie dát o odpracovaných hodinách jednotlivých zamestnancov v danej zmene, ich prípadné nadčasy alebo výnimky v pracovnom čase.

Medzi základné parametre vyplňané pre pracovné zmeny patria:

- **Pracovné dni** – tento parameter určuje, ktoré dni v týždni daná pracovná zmena má byť prítomná na pracovisku. V rámci programového rozhrania sú jednotlivé dni identifikované pomocou čísiel, kde číslo 1 značí nedeľu a číslo 7 sobotu.
- **Pracovný čas** – stanovuje základnú dobu práce v rámci jednotlivých dní. V bežnom podniku, ktorý funguje na princípe trojzmennej prevádzky, je tento čas určený práve jednou zo zmien, v základe kategorizovanej ako ranná, popoludňajšia a nočná.
- **Násobok mzdy** – tento parameter slúži pre prípady, kedy je niektorá zo zmien ohodnotená ako určitý násobok základnej mzdy. Najčastejšie to býva nočná zmena, kedy je tento násobok daný väčšinou zákonníkom práce ako forma kompenzácie pre zamestnancov.

V prípade vytváraného vzorového digitálneho dvojčata bola simulovaná trojzmenná prevádzka. Na obr. 19 je vyobrazený príklad rannej zmeny, ktorá vykonáva svoju prácu počas celého pracovného týždňa s pracovným časom od 6:30 a celkovou pracovnou dobou 8 hodín. Podobne ako v predchádzajúcom module je žiaduce vyplniť stručný popis pre každú zo zmien pre zvýšenie prehľadnosti. Navyše bola v module výnimiek každej zo zmien priradená 30-minútová prestávka na jedlo.

Směny

Název:   Premium Násobek mzdy:

Směna

Popis:

Den-začátek:

Čas-začátek:

Den-konec:

Čas-konec:

2	06:30:00	2	14:30:00	Y	Y
3	06:30:00	3	14:30:00	Y	Y
4	06:30:00	4	14:30:00	Y	Y
5	06:30:00	5	14:30:00	Y	Y
6	06:30:00	6	14:30:00	Y	Y

Povolit: musí se dokončit

Povolit: přesčas 1 - neděle, 2 - pondělí, 3 - úterý, 4 - středa, 5 - čtvrtek, 6 - pátek, 7 - sobota

OK Zrušit Výjimky... Zdroj... nápověda

*Pro vložení intervalu klikněte na tlačítku 'Vložit'. Pro editaci klikněte na interval.*

Obr. 19: Vytváranie pracovnej zmeny v prostredí SIM\_4\_PLAN

### 5.4.3 Zdroje

Zdroje v kontexte výrobného systému je možné chápať ako jednotlivé body, cez ktoré materiál prechádza pri procese výroby a vystupuje z neho v podobe bližšie odpovedajúcej výslednému produktu. Medzi zdroje patria jednotlivé stroje, ktoré materiál rôzne opracovávajú, kontrolujú a podobne, ale aj čisto ľuďmi vykonávané úkony, ako napríklad prestavenie strojov, ručná montáž a iné.

Pri práci so zdrojmi je väčšina parametrov systémovo vopred nastavená, avšak je možné všetky z nich upravovať podľa potrieb. Okrem základných parametrov, ako sú názov alebo popis, medzi ostatné dôležité parametre patria:

- **Pracovné zmeny** – jedná sa o priradenie pracovných zmien z predchádzajúceho kroku pre jednotlivé zdroje. Program bude na túto informáciu prihliadať pri vytváraní simulácií tak, aby nebola práca na danom stroji vykonávaná mimo stanovené časy, prípadne bude takéto časy evidovať ako nadčas pre konkrétnu zmenu.
- **Selekcia a sekvencia** – pomocou týchto dvoch parametrov je možné riadiť, v akom poradí budú odbavené rôzne druhy zákaziek zo vstupnej fronty pre konkrétny zdroj. V tomto prípade je možné uprednostňovať napríklad zákazky s vyššou prioritou alebo prihliadať na nastavenie stroja tak, aby sa zamedzilo zbytočnému prenasťavovaniu, ak jedna zo zákaziek spĺňa aktuálne nastavenia daného zariadenia.

Medzi ďalšie parametre patrí napríklad počiatočné nastavenie, ktoré reflektuje posledný typ zákazky, ktorý bol na zdroji spracovaný. Pre účely efektívneho riadenia v rámci MES je možné zaznamenať pri jednotlivých zdrojoch

takisto udalosti, ako sú poruchy alebo údržby, ktoré vyradujú stroj z bežnej prevádzky. Ďalším príkladom je priradenie typu nákladov, teda či daný zdroj je evidovaný medzi nákladmi ako zariadenie alebo ľudská práca. Pridanie zdroja je znázornené na obr. 20.

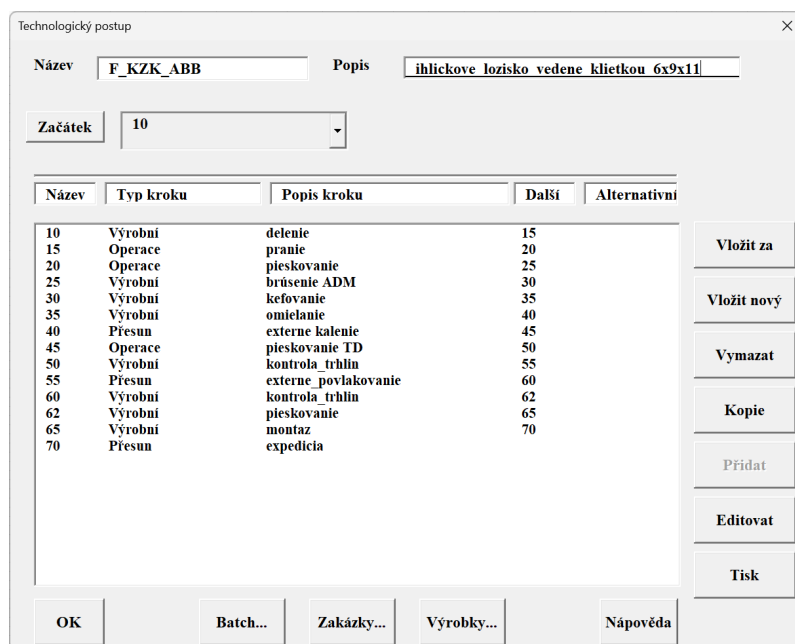
Obr. 20: Pridávanie nového zdroja

V tejto súvislosti je možné vytvárať aj tzv. skupiny zdrojov. Tie predstavujú spojenie viacerých zdrojov, ktoré sú využívané na rovnakú operáciu v rámci výrobného procesu. Ak sa v technologickom postupe priradí procesnému kroku skupina zdrojov, softvér môže na danú operáciu alokovať všetky tieto zdroje a využiť ich.

#### 5.4.4 Technologický postup

Technologický postup je z hľadiska výrobného procesu asi najkomplexnejšou a najdôležitejšou časťou. Technologický postup popisuje všetky výrobné kroky spoločne s ich sekvenciou, pomocou ktorej je možné pretvoriť vstupný materiál na hotový výrobok. V prípade programu SIM\_4\_PLAN je tvorený len dvomi parametrami, avšak jedným z nich je procesný krok. Procesný krok opisuje jeden krok v rámci výrobného procesu a je definovaný pomocou ďalších parametrov, ktoré budú uvedené vzápätí. Parametre technologického postupu sú teda:

- **Názov** – názov jednotlivých technologických postupov pre ich možnosť rozlíšenia. Často sa volí názov technologického postupu podľa výrobku, ktorý je dosiahnutý po splnení všetkých krokov v rámci tohto plánu.
- **Procesný krok** – jednotlivá operácia, ktorá je vykonaná v rámci technologického postupu pre dosiahnutie výrobku.



Obr. 21: Ukážka rozpracovaného technologického postupu s vloženými procesnými krokmi

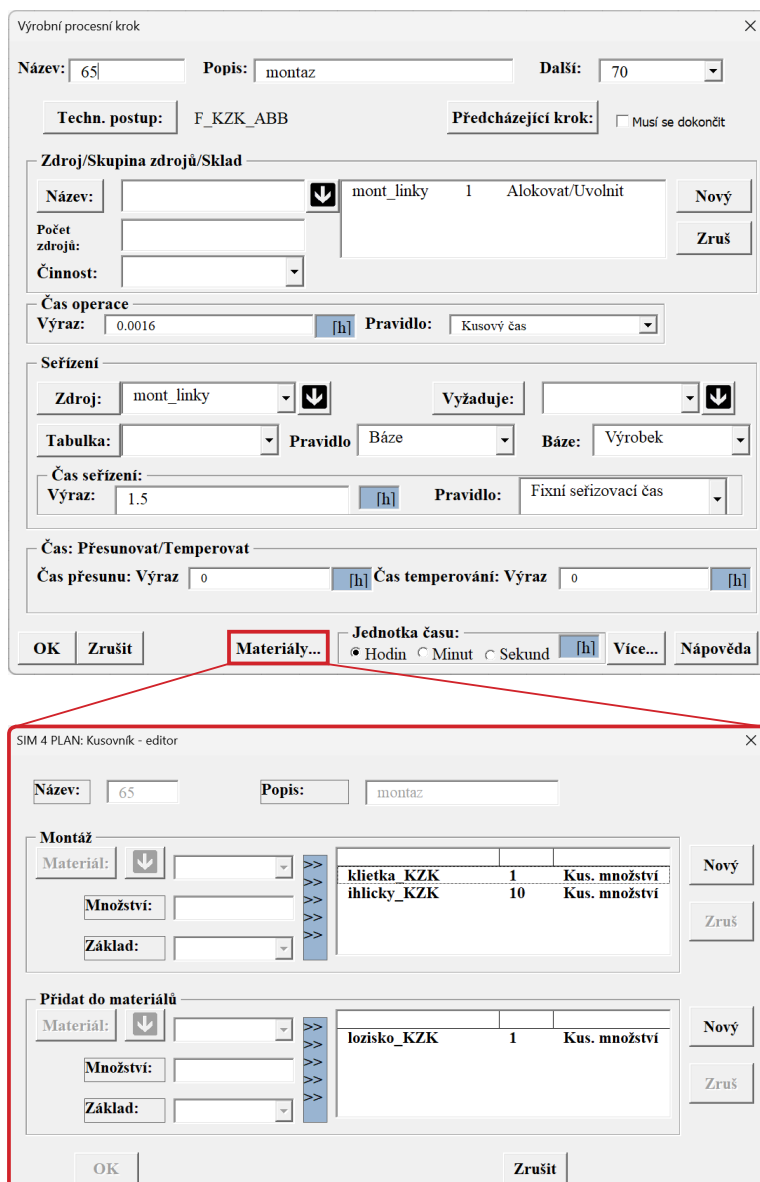
### Procesný krok

Ako už bolo spomínané, procesný krok predstavuje jednotlivé operácie v rámci nadradeného technologického postupu, ktoré je treba vykonať, aby bolo dosiahnuté pretvorenie vstupného materiálu na výrobok, prípadne medziprodukt. V rámci technologického postupu je charakterizovaný typom a svojím číslom, podľa ktorého sa jednotlivé kroky vykonávajú vo vzostupnom poradí. Procesné kroky sa delia podľa typu. Jednotlivé typy, medzi ktorými si užívateľ môže vyberať, sú:

- **Výrobný** – jedná sa o operáciu, v rámci ktorej je materiál spracovávaný. Tento typ je najkomplexnejší zo všetkých typov, najmä vďaka potrebe výberu zdrojov, na ktorých sa operácia vykonáva, prípadných dôb nastavenia pred samotnou operáciou, ako aj voľby materiálu, ktorý do operácie vstupuje alebo z operácie vystupuje.
- **Združenie** – tento typ operácie vyjadruje nutnosť združenia alebo rozdelenia dávky vo výrobe. Potreba pre združenie dávky môže nastať napríklad pri logistike, kedy je potrebné počkať na viacero dávok z výroby, kým budú presunuté k ďalšiemu kroku, alebo si to vyžaduje samotná nasledujúca operácia.
- **Presun** – typ presun zohľadňuje potrebnú dobu na presunutie materiálu naprieč pracoviskami, prípadne samotných zdrojov, čo môže zahŕňať presun stroja alebo jeho obsluhy.

- **Operácia** – typ procesného kroku, pri ktorom nedochádza k zmene materiálu. V prípade operácií sa žiaden materiál neodoberá ani nepridáva na sklady alebo medzisklady. Jedná sa teda o procesné kroky, väčšinou niekde vnútri výrobného procesu, do ktorých vstupuje rozrobený výrobok a takisto z nich aj vystupuje. V kontexte výroby ložísk medzi operácie možno zaradiť pranie, kalenie alebo brúsenie.
- **Kontrola** – typ kontrola je takmer totožný s typom operácia, s výnimkou extra parametra, ktorým je chybovosť výrobkov. Pomocou tohto parametra je, tak ako pri skutočnej kontrole, možné zachytiť zlé kusy, ktoré je následne možné buď opraviť alebo odstrániť z výrobnéj dávky. Chybovosť sa stanovuje štatisticky pomocou pravdepodobnosti alebo pri odvádzaní výroby počtom.

Na nasledujúcom obr. 22 je zobrazený výrobný procesný krok s priradenými potrebnými zdrojmi, ako aj nastaveným kusovým časom. Keďže výrobný typ procesného kroku je najkomplexnejší zo všetkých typov, ostatné typy vyobrazené nebudú s ohľadom na fakt, že sa jedná väčšinou o zjednodušené verzie výrobného typu, ktoré majú maximálne obmenené niektoré z parametrov. Navyše je na obr. 22 materiálový kusovník, ktorý je špecifický pre výrobný procesný krok a ktorý vyobrazuje reálne premeny materiálov v rámci výroby. V tomto prípade sa jedná o montáž hotového ložiska, ktoré sa skladá z osadenia ložiskového puzdra valivými elementami, ktoré sú vstupnými materiálmi, a následným výstupom je skompletizované ložisko.



Obr. 22: Dialógové okno výrobného procesného kroku (horné) spoločne s materiálovým kusovníkom (dolné)

#### 5.4.5 Výrobok

Výrobok, na rozdiel od finálneho materiálu, vyjadruje vyexpedovaný produkt, ktorý firma už nemá na sklade, ale je po vyrobení predaný zákazníkovi. Jedná sa o posledný modul v rámci procesu dvojčatenia pred skompletizovaním celého systému. Výrobok, ako finálny produkt celého výrobného procesu, obsahuje niekoľko kľúčových parametrov:

- **Technologický postup** – priraduje k danému výrobku jeden z technologických postupov, ktoré sú k dispozícii.

- **Štartovací/finálny materiál** – tento parameter umožňuje iné prepojenie materiálových kusovníkov ako je to pomocou technologického postupu. Toto je ovplyvnené faktom, že niektoré výrobky môžu mať rovnaké technologické postupy a rozdiely môžu byť len v nastavení strojov, prípadne vo vstupnom materiáli. Z tohto dôvodu je jednoduchšie vytvorenie jedného technologického postupu pri ktorom sa budú meniť materiály podľa samotného výrobku.
- **Skupina/podskupina** – bližšie stanovujú druh výrobku podľa ich nradených charakteristík.

Na obr. 23 je možné vidieť prípad, kedy je štartovací a finálny materiál špecifikovaný v procesných krokoch technologického postupu. Je to najmä z dôvodu, že tento výrobok je unikátny a žiadny podobný sa v danom výrobnom podniku nevyskytuje.

Obr. 23: Ukážka pridávania nového výrobku

#### 5.4.6 Zákazky

Posledným krokom k prepojeniu všetkých predchádzajúcich modulov sú zákazky. Zákazky predstavujú reálne požiadavky na výrobu od zákazníkov. Toto reflektuje skutočnosť v reálnom výrobnom podniku, kam prichádzajú objednávky od rôznych zákazníkov, ktoré je treba zaplánovať do výrobného procesu a poslať do výroby tak, aby boli požadované produkty včas vyrobené a vyexpedované k spomínaným zákazníkom.

Zadávanie zákaziek v prostredí programu SIM\_4\_PLAN je veľmi intuitívne s dôrazom na praktickosť. Do výrobnjej zákazky sa zadávajú nasledovné údaje:

- **Výrobok** – špecifikuje čo sa má vyrábať. Spoločne s výberom výrobku sa zadáva počet výrobkov, ktoré sa majú vyrobiť, prípadne v akých dávkach, teda po akých skupinách majú byť vyrábané.

- **Technologický postup** – určuje podľa ktorého technologického postupu bude výroba prebiehať.
- **Priorita** – stanovuje prioritu danej zákazky. Tento parameter je výhodný v prípadoch, kedy je dôležité určiť, ktorú zo zákaziek je potrebné vyrobiť skôr, napríklad kvôli strategickému zákazníkovi.
- **Vstupný/výstupný čas** – vstupný čas udáva, kedy najskôr sa zákazka môže zaradiť do vstupnej fronty do výroby. Výstupný čas zase stanovuje, dokedy by mala byť zákazka vyrobená.
- **Typ zákazky** – určuje špecifiká danej zákazky.

The screenshot shows a dialog box titled "Zakázka" with the following fields and options:

- Název:** zakazka KZK
- Popis:** ihlickove loziska STIHL
- Počet kusů:** 10000
- Kusy v dávce:** 2500
- Priorita:** 0,000
- Výrobek:** lozisko\_KZK
- Techn. postup:** F KZK ABB
- Kusovníkový rozpad:**  Vymazat kusovníkový rozpad
- Typ zakázky:**
  - Nová
  - Ve výrobě
  - Nepotvrzená
  - Podmíněná
  - Tažná
- Vstup zakázky do výroby:** 06.05.2024 06:30
- Poslední dávka:**
  - Přidat
  - Nová
  - Kompletní
- Termín dokončení zakázky:** 30.05.2024 10:00
- Výsledky:**
  - Zakázka - plnění
  - Dávka - plnění

Buttons: OK, Zrušit

Obr. 24: Dialógové okno pre priadanie novej zákazky

Po úspešnom pridaní nových a existujúcich zákaziek je vytvorený model pripravený plniť funkciu digitálneho dvojčeta vybraného výrobného systému. Všetky funkcie, ktoré takto vytvorené digitálne dvojča umožňuje, budú bližšie popísané v nasledujúcej podkapitole.



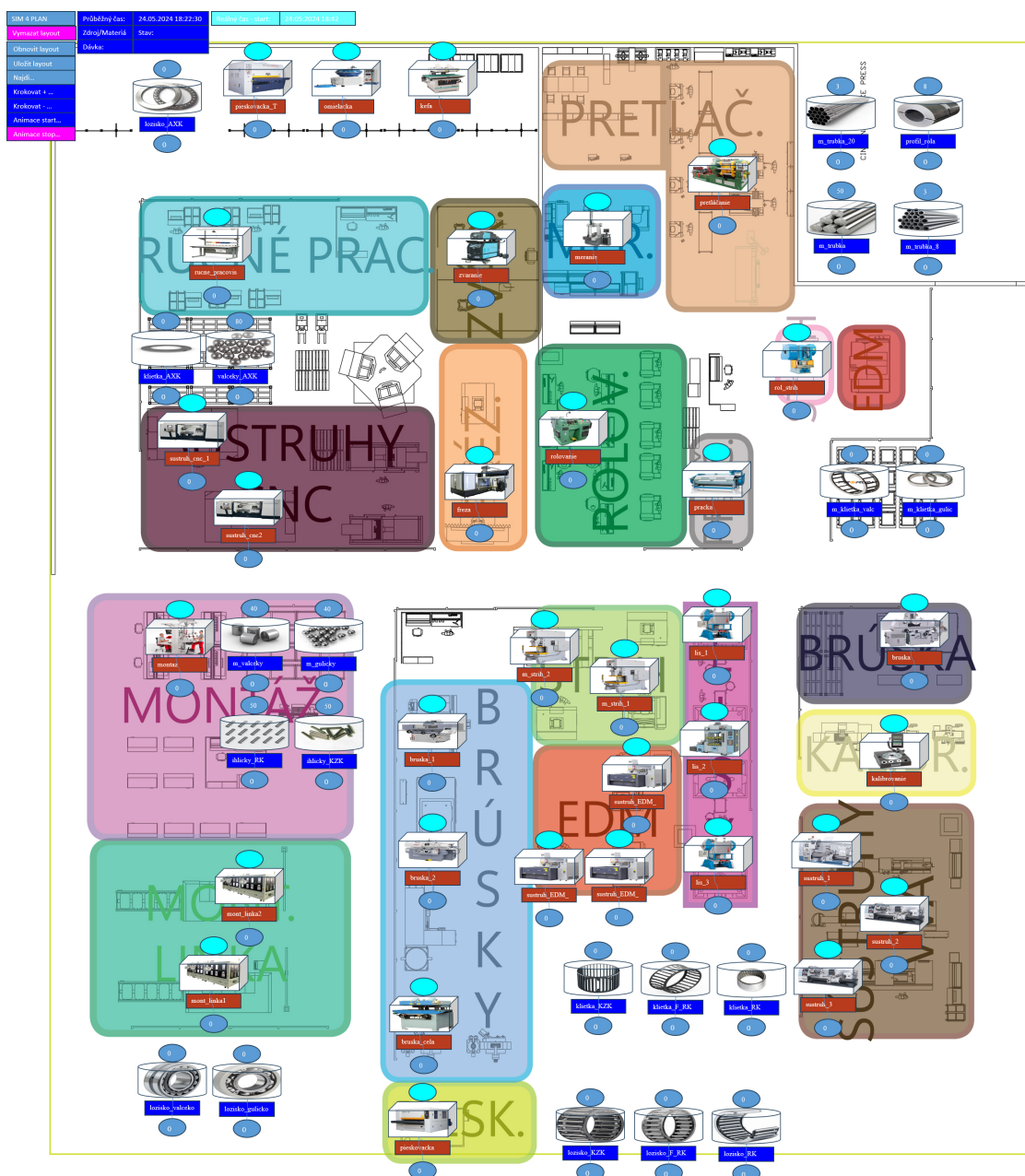
## 5.5 Výsledné digitálne dvojčča výrobného systému

Podľa metodiky tvorby digitálneho dvojčča v programe SIM\_4\_PLAN, ktorá bola opísaná v predchádzajúcej podkapitole, bolo vytvorené digitálne dvojčča vybraného výrobného systému (obr. 25). Vytvorenie digitálneho dvojčča vyžadovalo využitie 33 zdrojov a 7 skupín zdrojov. Ďalej, v rámci materiálového toku, boli vytvorené 4 materiály reprezentujúce surový materiál vstupujúci do výroby a 11 materiálov bolo využitých na reprezentáciu polotovarov. V neposlednom rade model zahŕňa aj medzisklady pre hotové výrobky, ktoré sú vyrábané podľa jedného zo 6 technologických postupov, ktoré verným spôsobom odrážajú reálny výrobný postup daných výrobkov.

Vďaka vysokej komplexnosti skutočného výrobného systému sa jeho digitálna verzia nevyhla určitým zjednodušeniam. Jedným z týchto zjednodušení bola integrácia totožných individuálnych pracovísk do jedného zástupného zdroja, ktorý zodpovedá a odráža vlastnosti všetkých jeho členov. Toto zjednodušenie sa predovšetkým týkalo pracovísk, kde viacerí zamestnanci vykonávali rovnakú činnosť na jednom mieste bez nutnosti použitia strojov, a preto z hľadiska funkčnosti nebolo potrebné vytvárať jednotlivé entity individuálne. V opačnom prípade, kedy sa na pracovisku vyskytovalo viacero strojov využívaných na identickú činnosť, boli tieto stroje všetky pridané a zlúčené do skupín zdrojov tak, aby mohli byť spoločne pridelené jednotlivým procesom v technologických postupoch.

Samotné technologické postupy boli vytvárané na základe existujúcich technologických postupov podniku. S prihliadnutím na vysoký počet produktov, ktoré fyzický podnik vyrába, a s tým spojené množstvo príslušných technologických postupov, podľa ktorých sú tieto produkty vyrábané, bolo vybraných 6 zástupcov tak, aby bola zahrnutá čo najširšia rozmanitosť týchto výrobkov. Pri výbere sa tiež zohľadňoval ročný objem výroby podľa typu tak, aby zástupcovia patrili medzi najčastejšie vyrábané typy. Tento prístup tiež zabezpečuje možnosť jednoduchej škálovateľnosti, kedy ostatné technologické postupy sú blízke k jednému z už existujúcich technologických postupov. Takto je následne možné jednoduchou úpravou existujúceho technologického postupu tieto varianty dosiahnuť.

V každom kroku tvorby digitálneho dvojčča boli zohľadnené vlastnosti ako možná škálovateľnosť, autenticita a zachovanie kľúčových vlastností. Tieto kroky viedli k vytvoreniu čo najvernejšej digitálnej kópie daného výrobného systému, čo umožňuje lepšie pochopenie a riadenie výrobných procesov. Takto vytvorené digitálne dvojčča poskytuje komplexný prehľad o stave výrobného systému a jeho efektívite s množstvom ďalších funkcií.



Obr. 25: Ukážka vytvoreného digitálneho dvojčata výrobného systému v prostredí SIM\_4\_PLAN

### 5.5.1 Funkcie digitálneho dvojčata v prevádzkovom režime

Skutočnosť, že softvér SIM\_4\_PLAN je vyvinutý v prostredí MS Excel, bežne využívanom tabuľkovom procesore naprieč väčšinou výrobných podnikov, zabezpečuje jeho jednoduchú interakciu s ostatnými podnikovými systémami. Samotné digitálne dvojčata tak vie operovať v spolupráci s MES systémom, s ktorým si vie jednoduchou cestou vymieňať potrebné dáta.

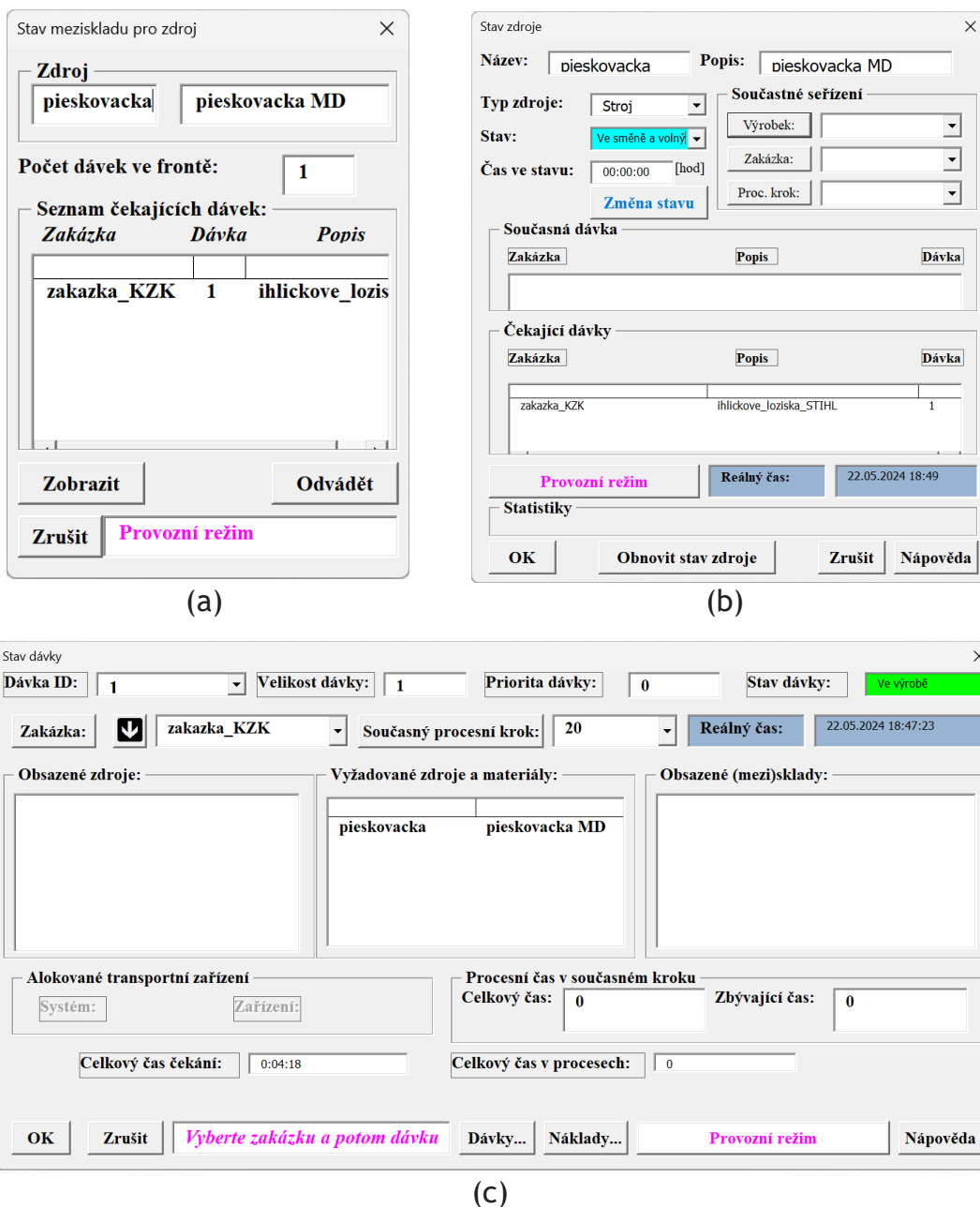
V samotnom prevádzkovom režime digitálneho dvojčata vie dokonca zastupovať niektoré z funkcií podnikového MES.

## Odvádzenie výroby

Prevádzkový režim digitálneho dvojčata odzrkadľuje aktuálny stav na prevádzkovej úrovni podniku. Aj napriek absencii výrobných sprievodiek v ich originálnej podobe, prostredie digitálneho dvojčata zabezpečuje odvádzanie výrobných operácií samotných zákaziek, spojených s evidenciou, kde sa jednotlivé dávky zákazky práve nachádzajú v rámci výrobného procesu. Samotné odvádzanie výrobných operácií prebieha v dialógovom okne, kde je používateľ schopný odvieť jednotlivé výrobné operácie danej zákazky a reflektovať jej pohyb naprieč výrobným procesom v aktuálnom čase. To prináša všetky výhody spojené s elektronickým odvádzaním výroby, akými sú informovanosť o aktuálnom stave výrobných dávok zákazky v rámci výroby, ako aj dostupnosť neskreslených dát. Tieto dáta môžu byť následne využité napríklad na porovnanie plánov voči skutočnosti, optimalizáciu výrobných procesov alebo vyhodnotenie efektivity jednotlivých zdrojov. Takisto tieto dáta môžu slúžiť pre ostatné podnikové systémy na výpočty miezd alebo riadenie údržby. Odvádzanie výroby v prostredí SIM\_4\_PLAN je zobrazené na obr. 26 nižšie.

Obr. 26: Odvádzanie výroby

Okrem samotného odvádzania výroby ponúka SIM\_4\_PLAN takisto niekoľko ďalších funkcií, ktoré s odvádzaním výroby blízko súvisia. Medzi tieto funkcie patrí výpis front pre jednotlivé zdroje. Pomocou frontov je možné kontrolovať počet dávok čakajúcich na určitý zdroj alebo materiál. Ďalšou z takýchto funkcií je kontrola stavu jednotlivých zdrojov, zákaziek alebo dávok samotných zákaziek. Tieto možnosti sú zobrazené na obr. 27.



Obr. 27: Ukážka výstupov týkajúcich sa prevádzkového režimu digitálneho dvojčata v podobe frontu zdroja (a), stavu zdroja (b) a stavu výrobnjej dávky (c)

## Plánovanie

S využitím simulačných nástrojov digitálneho dvojčata je takisto možné zastupovať funkciu plánovania. Po nasimulovaní konkrétneho výrobného procesu ponúka digitálne dvojča možnosť vytvorenia rozvrhov pre zákazky alebo samotné zdroje, na základe ktorých je možné plánovať a riadiť samotnú výrobu.

Rozvrh pro zdroj:		montaz			Od: 06.05.2024 6:30:00	Do: 16.05.2024 14:21:00	
Zakázka	Popis	Dávka	Činnost	Začátek	Konec	Nh	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	1	Operace	07.05.2024 07:30	07.05.2024 13:00	5.5	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	2	Operace	07.05.2024 13:00	07.05.2024 18:30	5.5	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	3	Operace	07.05.2024 18:30	07.05.2024 22:30	4	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	3	Operace	08.05.2024 06:30	08.05.2024 08:00	1.5	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	4	Operace	08.05.2024 08:00	08.05.2024 13:30	5.5	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	1	Operace	08.05.2024 13:30	08.05.2024 17:30	4	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	2	Operace	08.05.2024 17:30	08.05.2024 21:30	4	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	3	Operace	08.05.2024 21:30	08.05.2024 22:30	1	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	3	Operace	09.05.2024 06:30	09.05.2024 09:30	3	
zakazka_KZK	ihlickove_loziska_STIHL	4	Operace	09.05.2024 09:30	09.05.2024 13:30	4	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	1	Operace	09.05.2024 13:30	09.05.2024 14:00	0.5	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	2	Operace	09.05.2024 14:00	09.05.2024 14:30	0.5	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	3	Operace	09.05.2024 14:30	09.05.2024 15:00	0.5	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	4	Operace	09.05.2024 15:00	09.05.2024 15:30	0.5	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	1	Operace	09.05.2024 21:30	09.05.2024 22:30	1	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	1	Operace	10.05.2024 06:30	10.05.2024 10:30	4	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	2	Operace	10.05.2024 10:30	10.05.2024 15:30	5	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	3	Operace	10.05.2024 15:30	10.05.2024 20:30	5	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	4	Operace	10.05.2024 20:30	10.05.2024 22:30	2	
zakazka_RKK	ihlickove_loziska_RKK_John_DEER	4	Operace	13.05.2024 06:30	13.05.2024 09:30	3	

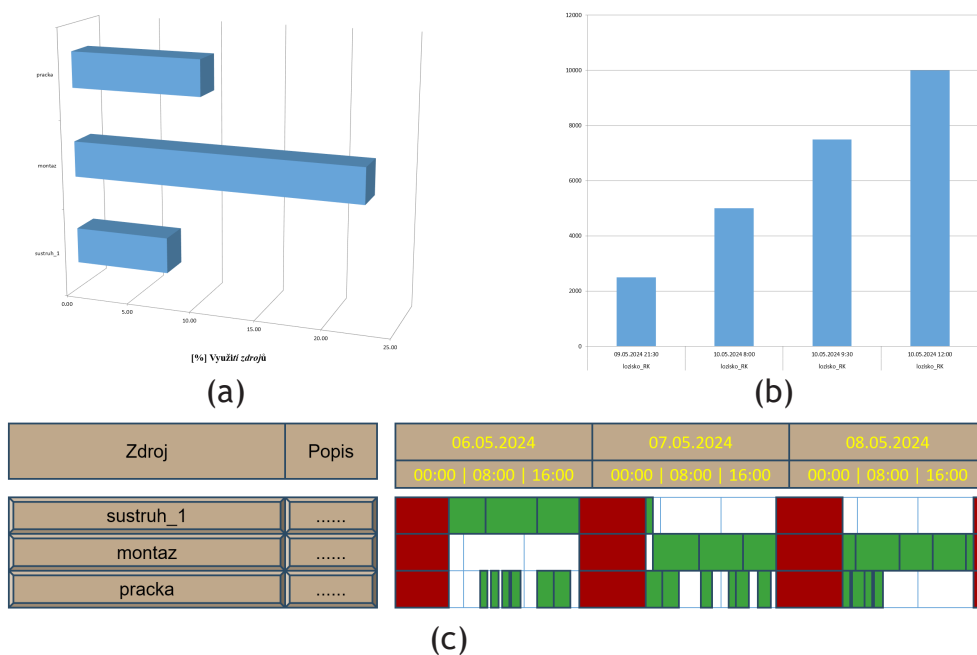
Obr. 28: Rozvrh pre zdroj

### 5.5.2 Možnosti diskretné simulácie v prostredí digitálneho dvojčata

Ako už bolo priblížené v predchádzajúcich kapitolách, simulácie v dnešnej dobe hrajú hlavnú rolu v rámci využitia digitálnych dvojčiat systémov a iných celkov. Poskytujú možnosť jednoduchého experimentovania s rôznymi scenármi s predpoveďou, ako sa daný systém bude správať v daných situáciách. Takto je možné lacno a rýchlo overiť rôzne varianty výrobných stratégií a rozhodnutí bez nutnosti realizácie týchto experimentov v reálnom svete, čo je často časovo a ekonomicky náročné. Touto cestou pomáhajú podnikom zvyšovať efektivitu a majú priamy dopad na konkurencieschopnosť.

Program SIM\_4\_PLAN tak, ako rôzne iné nástroje na tvorbu digitálnych dvojčiat, podporuje simulovanie s využitím diskretných simulácií. To sa v prípade výrobných systémov javí ako dostatočné vzhľadom na prostredie výroby, kde sú deterministicky stanovené úlohy, ktoré treba splniť k dosiahnutiu požadovaného výsledku. Tieto jednotlivé výrobné úlohy je z pohľadu simulácie možné chápať ako samostatné udalosti, kedy prechod medzi nimi nie je dôležitý z hľadiska výstupných dát, a tak nemusí byť spojený, ako je to v prípade spojených simulácií.

Využitie simulačných nástrojov v SIM\_4\_PLAN je veľmi jednoduché. Po vytvorení digitálneho dvojčata so všetkými dôležitými prvkami, ako sú zdroje, technologické postupy a výrobky, stačí pridať zákazky, na ktorých má byť simulácia vykonaná. Po prepnutí z prevádzkového módu programu do simulačného pomocou dedikovaného tlačidla je možné stanoviť časový rámec, ktorý má byť nasimulovaný, a následne simuláciu spustiť. Po odsimulovaní zvoleného obdobia je možné prejsť na analýzu výstupných dát. Samotný program ponúka širokú škálu výstupných dát. Medzi najzákladnejšie výstupy patria najmä Ganttové diagramy, percentuálne využitie zdrojov naprieč celým výrobným procesom alebo jednou pracovnou zmenou a zmeny materiálov. Vzorové výstupy sú zobrazené na obr. 29.



Obr. 29: Základné výstupy zo simulačného režimu digitálneho dvojčata v podobe využitia zdrojov (a), zmeny materiálu v čase (b) a Ganttovho diagramu pre zdroje (c)

## 5.6 Výsledky simulácie výrobného procesu digitálneho dvojčata

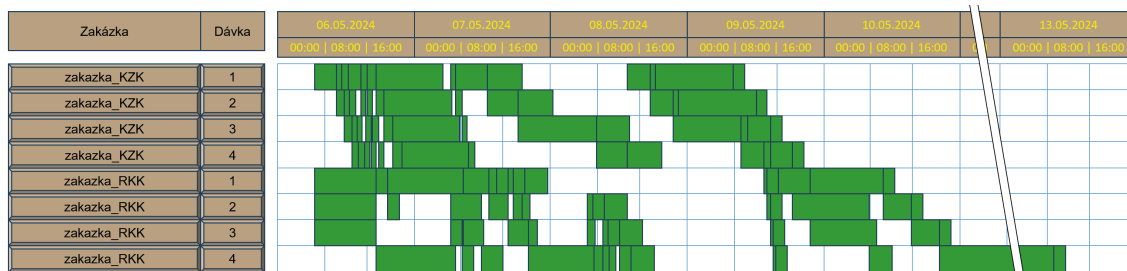
Na účely analýzy výkonnosti výrobného systému bolo potrebné odsimulovať výrobné procesy na získanie dát, ktoré môžu byť ďalej hodnotené. Na tieto účely boli vybrané dva druhy produktov, pre ktoré boli vytvorené zákazky v zodpovedajúcich množstvách a tie boli následne poslané do simulácie. Vybrané produkty sú bližšie špecifikované v tab. 4. Objemy výrobkov v jednotlivých zákazkách boli zvolené tak, aby čo najviac zodpovedali reálnym objemom prijímaným vo výrobnom podniku. To zabezpečuje čo najväčšiu vierohodnosť dát.

Tab. 4: Parametre zákaziek vstupujúcich do simulácie

Názov zákazky	Bližší popis	Celkový objem	Dávkový objem
KZK	Ihličkové ložisko 6x9x11	10000	2500
RKK	Ihličkové ložisko 20x25x28	10000	2500

Dávkové objemy v tomto prípade stanovujú, po akých veľkých skupinách bude materiál putovať naprieč výrobnými procesmi. Tento parameter má za úlohu zohľadniť kapacitné možnosti medziskladov pri jednotlivých strojoch alebo kapacitné

možnosti samotných strojov. Výstupy zo simulácie sú zobrazené na obrázkoch a tabuľkách nižšie.



Obr. 30: Ganttov diagram zákaziek

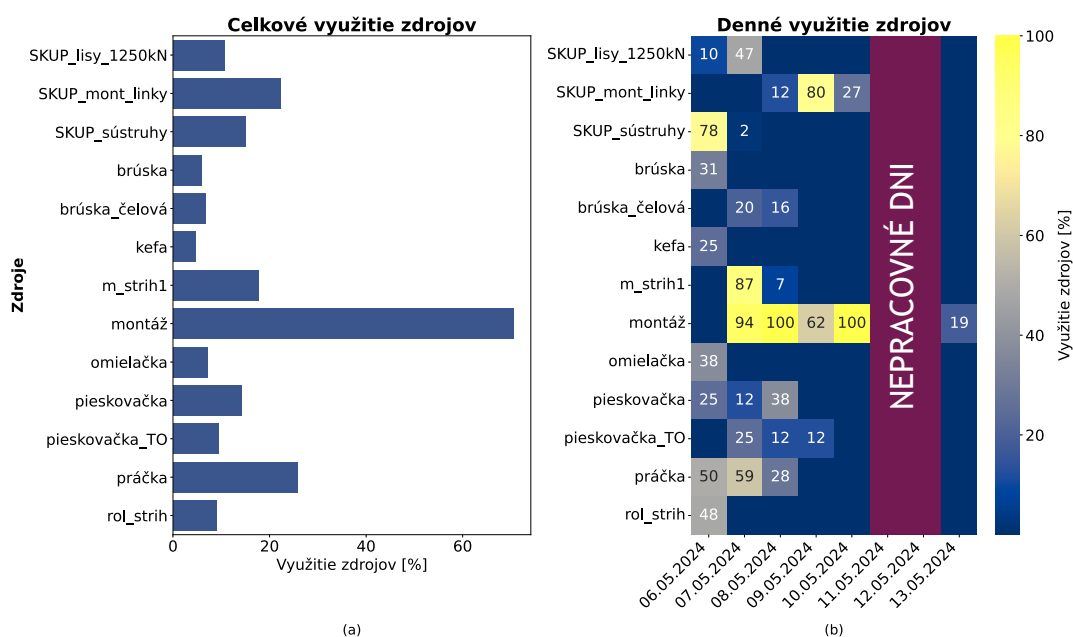
Tab. 5: Výsledné časy trvania výroby jednotlivých zákaziek

Názov zákazky	Trvanie výroby [hod]
KZK	62
RKK	85

Na obr. 30 je vyobrazený Ganttov diagram zákaziek vstupujúcich do simulácie. Ganttov diagram sa vo všeobecnosti používa ako vizuálne znázornenie naplánovaných postupností v čase. V prípade výrobného procesu ide o grafické znázornenie plánovaného výkonu jednotlivých výrobných operácií od vstupu do výrobného procesu až po posledný krok. Ganttov diagram je tiež veľmi užitočný pri analýze výrobných procesov. Keďže ide o vykreslenie postupností výrobných operácií, jednotlivé operácie by mali na seba takmer plynule nadväzovať. V prípade, že sa tak nedeje, môže Ganttov diagram ukazovať na úzke miesta výroby, ktoré je treba ďalej skúmať a analyzovať. Na obr. 30 operácie naprieč jednotlivými zákazkami na seba väčšinou plynule nadväzujú. Je tu však badateľné oneskorenie, najmä v prípade zákazky RKK naprieč všetkými dávkami. Rozdiel medzi po sebe nasledujúcimi operáciami sa na základe Ganttovho diagramu blíži takmer k 24 hodinám. Toto môže indikovať úzke miesto výrobného procesu kedy, dávky v zákazke RKK musia čakať na zdroje, ktoré sú pravdepodobne obsadené dávkami zákazky KZK.

Pre hlbšie pochopenie situácie je nutné dať do súvislosti s Ganttovými diagramami takisto hodnoty využitia zdrojov. V zásade výkonnosť hovorí o tom, ako veľmi je daný stroj využívaný za určitý stanovený časový úsek. Okrem základného výkonnostného grafu, ktorý určuje podiel času, kedy je stroj akokoľvek zaneprázdnený, sa tiež využívajú grafy, v ktorých sú jednotlivé časti ďalej delené na pracujúcu časť, dobu, počas ktorej sa stroj nastavuje apod. V spojení s Ganttovými

diagramami tvoria grafy výkonnosti užitočný nástroj na odhalovanie potenciálnych zlepšení vo výrobnom procese. Pomocou výkonnostných grafov je možné zistiť, či je niektorý zo zdrojov potenciálne preťažovaný, alebo naopak, odhaliť zdroje, ktoré by bolo možné využívať efektívnejšie, napríklad obmedzením personálu alebo zmenami vo výrobnom procese tak, aby sa výkonnosť zdroja zvýšila, ak to samotný proces umožňuje. Grafy s celkovým a denným využitím zdrojov sú zobrazené na obr. 31.



Obr. 31: Grafy celkového využitia (a) a denného využitia (b) zdrojov

Z výkonnostných grafov jasne vyplýva, že prestoje viditeľné v Ganttovom diagrame sú spôsobené preťažením montáže. Celkové využitie zdrojov na prvý pohľad ukazuje ďaleko vyššie využitie montáže ako všetkých ostatných zdrojov. Vo všeobecnosti by mali byť hodnoty využitia zdrojov rovnomerné naprieč jednotlivými zdrojmi, čo v tomto prípade neplatí. Pri detailnejšom pohľade na denné využitie zdrojov sa ukazuje, že dva dni z výrobného procesu je montáž zatažená na 100 %, čo vo všeobecnosti ukazuje na úzke miesto. To je spôsobené tým, že operácie, ktoré predchádzajú montáži, majú vyšší takt ako samotná montáž, a tak sú schopné zahliť nasledujúcu operáciu, čím efektivita celého procesu klesá.

V prípade odhalenia takéhoto úzkeho miesta je nutné prejsť k optimalizácii výrobného procesu navrhnutím zmien, ktoré majú za cieľ zabrániť vzniku takýchto prestojov. Na toto sa ideálne hodí prostredie digitálneho dvojčata, kde je možné otestovať jednotlivé koncepty a overiť ich funkčnosť. Návrh a overenie koncepčných riešení pre odstránenie úzkych miest vo vybranom výrobnom procese bude ďalej predstavené a popísané v nasledujúcej podkapitole.



## 5.7 Overenie a analýza konceptov optimalizácie výrobného procesu

Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách, medzi hlavné výhody digitálneho dvojčeta patrí jeho schopnosť simulácie rôznych návrhov bez nutnosti ich zavádzania v existujúcom výrobnom podniku, čo so sebou prináša riziká v podobe časovej a finančnej náročnosti spojené s neistotou funkčnosti týchto zmien. Simulačné nástroje digitálneho dvojčeta poskytujú komplexné riešenie na overenie takýchto návrhov a následne ich samotné prevedenie v praxi.

Na základe predchádzajúcej časti, po analýze simulácie výrobného procesu v prostredí vytvoreného digitálneho dvojčeta, bolo odhalené úzke miesto výroby. Takéto miesto je potrebné z výrobného procesu odstrániť, aby nevznikali zbytočné prestoje, ktoré môžu zvýšiť náklady na výrobu produktu alebo spôsobiť neschopnosť dokončiť zákazky v požadovaných termínoch.

Kvôli týmto problémom budú v aktuálnej kapitole predstavené potenciálne riešenia, ktorých cieľom je odstránenie existujúceho úzkeho miesta. Jednotlivé koncepty boli overené v simulačnom prostredí digitálneho dvojčeta a spoločne s nimi bolo vypracované štatistické zhodnotenie výsledného vplyvu na výrobný proces.

Po dôslednom uvážení a vykonaní rešerše v oblasti optimalizácie výrobných procesov boli vybrané štyri varianty s cieľom optimalizácie výrobného procesu. Všetky tieto varianty sú popísané v tab. 6.

Tab. 6: Návrhy na optimalizáciu výrobného procesu

Variant	Popis variantu
1	Pridanie nového zdroja montáž
2	Pridanie nového zdroja práčka
3	Zmenšenie výrobných dávok na polovičnú hodnotu s výslednou veľkosťou dávky zodpovedajúcej 1250 ks
4	Zväčšenie výrobných dávok na dvojnásobnú hodnotu s výslednou veľkosťou dávky zodpovedajúcej 5000 ks

Prvé dva varianty sa zameriavajú na možnosť ovplyvnenia schémy výrobného systému. Takéto riešenia sú spojené s vyššou finančnou náročnosťou vzhľadom na potrebu presúvania existujúcich strojov alebo prípadnej nutnosti zaobstarania nových strojov. Prvou z možností bolo pridanie nového zdroja montáže. Toto rozhodnutie vyplýva z vysokých hodnôt vyťaženia vo výkonnostných grafoch, ako aj z faktu, že úzke miesto vzniká práve na danom zdroji.

Druhý návrh sa zameriava na pridanie nového zdroja v podobe práčky. Na základe dostupných dát z pôvodnej simulácie sa ukazuje, že druhým najviac

vyťaženým zdrojom je práve tento zdroj. Naviac, proces prania je najpočetnejšou operáciou spomedzi všetkých výrobných operácií vo všetkých technologických postupoch. Aj napriek tomu, že denné využitie tohto zdroja nedosahuje kritických hodnôt, zvýšenie spracovávaného objemu týmto zdrojom pridaním nového rovnakého zdroja by mohlo napomôcť k vyššej plynulosti naprieč výrobným procesom.

Ostatné dva návrhy boli vybrané na základe článku [67]. Autori v tomto článku sa zaoberajú simulovaním rôznych výrobných scenárov s rozdielnymi veľkosťami výrobných dávok a ich výsledným vplyvom na výrobné procesy. Na základe výstupov z tohto článku sa ukazuje, že správne zvolená veľkosť výrobných dávok môže hrať kľúčovú rolu v dosiahnutí vyššej efektivity výrobného procesu. Myšlienka optimalizácie pomocou zmeny veľkosti výrobných dávok spočíva v tom, že príliš veľké dávky môžu zablokovať zdroj na dlhú dobu, pričom zdroj, na ktorom sa vykonáva nasledujúca výrobná operácia, môže byť voľný a čakať na príchod niektorej z výrobných dávok. Takáto situácia spôsobuje následné prestoje, kedy po dokončení jednej z operácií nastáva podobná situácia na nasledujúcom zdroji, ktorý naraz spracováva veľký objem výrobkov bez ich toku naprieč výrobným procesom. V opačnom prípade môžu nastať prestoje najmä kvôli logistickým problémom, kedy nie je dosiahnuteľné, aby každý vyrobený polotovár bolo možné prepraviť k ďalšiemu zdroju. Takisto, niektoré zo zdrojov majú fixné procesné časy, a tak nenaplnenie ich kapacity môže spôsobiť ďalšie komplikácie vďaka nadmernému spúšťaniu rovnakého procesu.

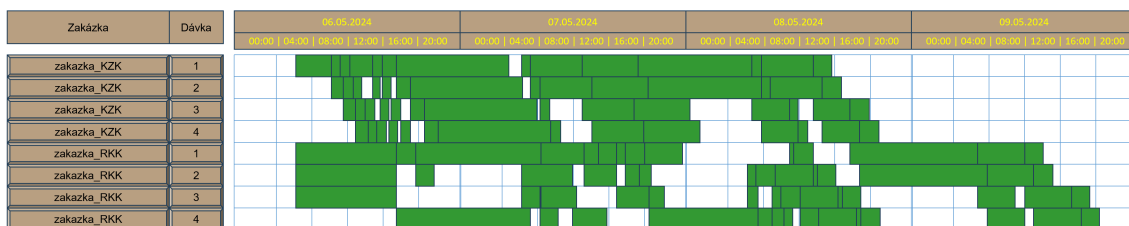
Na základe týchto zistení boli preto preskúmané varianty s väčšou a menšou veľkosťou výrobných dávok, ktoré budú priblížené v ďalšej časti. Porovnanie jednotlivých variantov bude prebiehať na základe celkového času potrebného na dokončenie oboch vstupujúcich zákaziek s prihliadnutím na využitie zdrojov, čo je dôležité najmä z ekonomického hľadiska podniku.

### 5.7.1 Výsledky variantu s pridaným montážnym zdrojom

V prípade variantu 1 s prídavným montážnym zdrojom boli pre nový zdroj použité identické parametre ako pre existujúci zdroj montáže. Tieto zdroje boli následne zoskupené do skupiny zdrojov montáže a simulácia výroby zadaných zákaziek bola spustená nanovo.

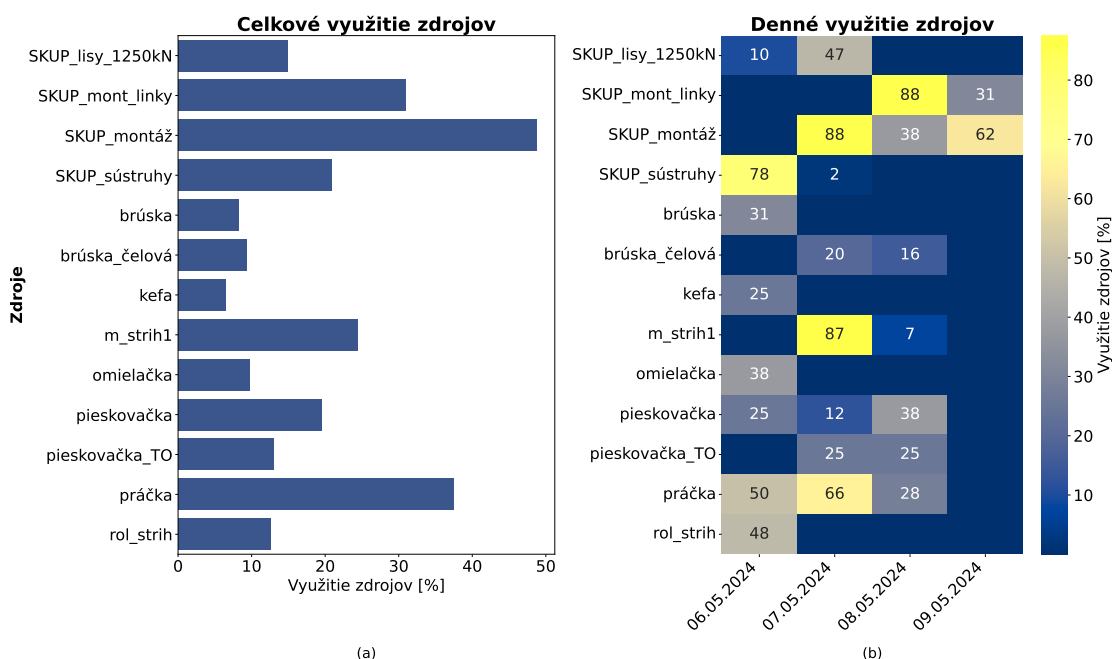
Ako ukazuje už samotný Ganttov diagram pre variant 1 (obr. 32), pridanie nového zdroja významne urýchlilo výrobný proces, s dokončením oboch zákaziek skôr o dva pracovné dni. To zodpovedá správne určeniu úzkeho miesta vo výrobnom procese a jeho adekvátnemu riešeniu. Samotný prechod výrobným procesom je v prípade všetkých zákaziek ďaleko plynulejší ako v pôvodnom riešení.

Toto tvrdenie je ďalej podporené aj výsledkami z výkonnostných grafov (obr. 33), kde celkové využitie zdrojov je oveľa rovnomernejšie, čo signalizuje



Obr. 32: Ganttov diagram pre variant s pridanou montážou

vyvážené zaťaženie zdrojov. V dennom výkonnostnom grafe sa navyše nevyskytujú dni, kedy by bol ktorýkoľvek zo zdrojov vyťažovaný na maximum, čo v praxi znamená, že sa výrobné operácie nehromadia vo fronte jedného zdroja, ale sú rozložené naprieč viacerými zdrojmi v rámci výrobného procesu. Výsledné výrobné časy potrebné k dokončeniu zákaziek sú priložené v tab.7.



Obr. 33: Výkonnostné grafy pre variant s pridanou montážou

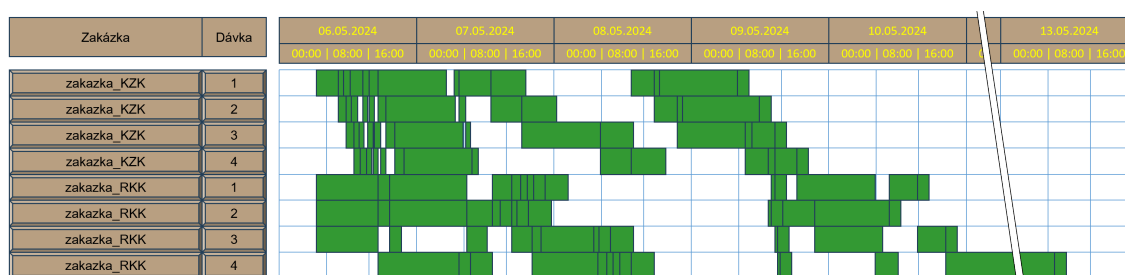
Tab. 7: Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením

Názov zákazky	Trvanie výroby [hod]	Pôvodné trvanie [hod]	rozdiel voči pôvodnému riešeniu [%]
KZK	46	62	-25
RKK	61,5	85	-27

### 5.7.2 Výsledky variantu s pridaným zdrojom práčka

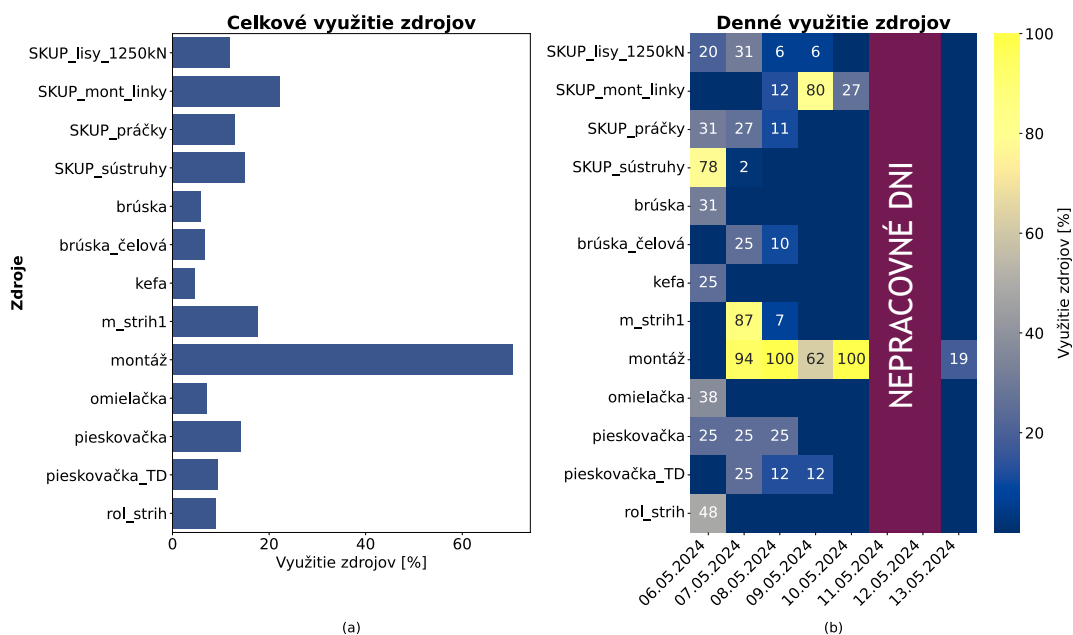
Vo variante 2 bolo simulované pridanie nového zdroja v podobe práčky. Podobne ako v predchádzajúcom prípade boli prevzaté všetky parametre nového zdroja podľa zdroja starého.

Z prvého pohľadu na Ganttov diagram na obr. 34 je zrejmé, že pridanie nového zdroja v podobe práčky nemalo zásadný vplyv na priebeh pracovného procesu v porovnaní s pôvodnými výsledkami. V období 3. dňa stále dochádza k oneskoreniam výrobných dávok v zákazke RKK. Tento fakt naznačuje, že zrýchlením procesu prania sa celkový proces neurýchli, a teda práčka ako taká pracuje dostatočne efektívne.



Obr. 34: Ganttov diagram pre variant s pridanou práčkou

Tento výsledok je ďalej podporený aj údajmi z výkonnostných grafov, kde montážny zdroj stále vyniká hodnotou vyťaženia spomedzi všetkých ostatných zdrojov, a v dennom prehľade je vidno, že vyťaženosť tohto zdroja je vyššia ako 90 % počas troch dní procesu. Jedinú zmenu, ktorú je možné badať, je zníženie vyťaženia skupiny zdrojov práčky v porovnaní s jediným zdrojom, čo však vo všeobecnosti nemá vplyv na celkový výrobný proces a znižuje efektivitu tohto zdroja.



Obr. 35: Výkonnostné grafy pre variant s pridanou práčkou

V samotnom porovnaní časových hladísk pôvodného procesu s novým je zrejmé, že k žiadnemu zlepšeniu nedošlo. To znamená, že pridaním práčky sa proces neurýchli, ale náklady na výrobu sa zvýšia z nutnosti údržby dvoch zdrojov ako aj zvýšenia potrebného obslužného personálu. Toto riešenie je preto nevhodné a zároveň zdôrazňuje výhody prvotných simulácií pred okamžitým zavádzaním zmien do praxe.

Tab. 8: Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením pre variant 2

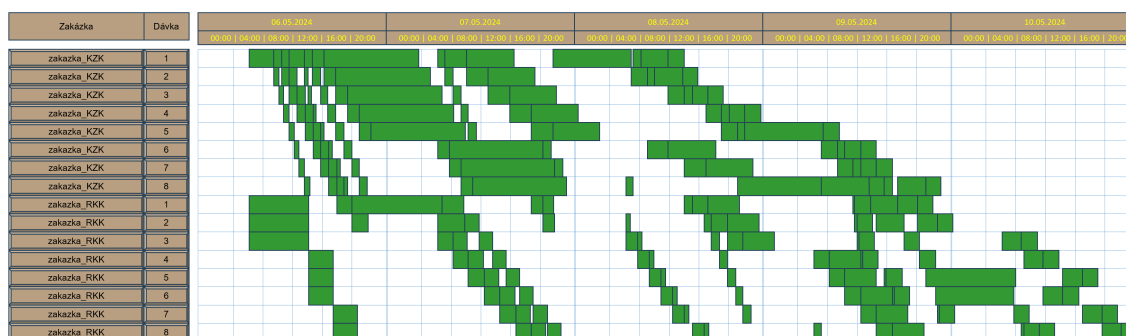
Názov zákazky	Trvanie výroby [hod]	Pôvodné trvanie [hod]	rozdiel voči pôvodnému riešeniu [%]
KZK	62	62	0
RKK	85	85	0

### 5.7.3 Výsledky variantu s veľkosťou dávky 1250 ks

Variant 3 zahŕňal zmenu výrobného množstva z pôvodných 2500 ks na 1250 ks. Do výroby tak vstupoval väčší počet dávok po menších množstvách. Ako článok [58] naznačuje, práve menšie dávky majú potenciál lepšieho rozloženia dávok naprieč výrobnými operáciami, čo môže viesť ku kratším výrobným časom a vyššej efektívnosti strojov.

To je ovplyvnené najmä tým, že menšia dávka vie byť rýchlejšie vyrobená a tak dodaná zdroju, na ktorom nasleduje ďalšia operácia.

Samotný Ganttov diagram toto tvrdenie podporuje, keďže upravený výrobný proces s menšími dávkami trval kratšie v porovnaní s procesom s pôvodnou veľkosťou dávok. Na základe obr. 36 je však jasné, že tento proces má potenciál byť ešte ďalej optimalizovaný. Aj napriek lepšiemu toku materiálu naprieč výrobou, najmä v prípade dávok zákazky KZK, je stále badateľné, že v prípade zákazky RKK dochádza k vzniku veľkých prestojov, ktoré sú pravdepodobne spôsobené čakaním v zástupe na uvoľnenie zdrojov.



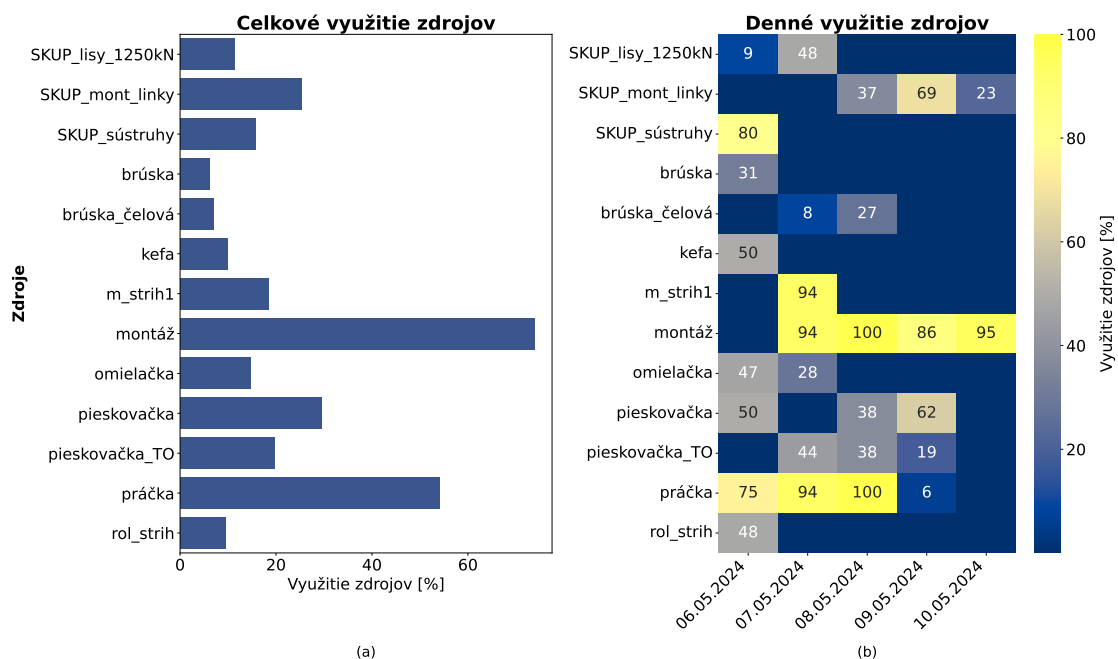
Obr. 36: Ganttov diagram simulácie s veľkosťou dávky 1250 ks

Podobne ako v prípade Ganttovho diagramu, výkonnostné grafy v rámci tejto simulácie naznačujú preťažovanie hneď dvoch zdrojov, kde montáž má využitie blízke 90 % počas štyroch dní, a zároveň aj zdroj práčka je vyťažený nad 90 % počas dvoch dní. V porovnaní s ostatnými zdrojmi je tento rozdiel viditeľný aj na samotnom celkovom vyťažení zdrojov. Samotná vyššia vyťaženosť zdrojov nie je zlým signálom, avšak nevyváženosť medzi vyťažením jednotlivých zdrojov ukazuje, že niektoré zdroje môžu spomaľovať celkový výrobný proces.

S prihliadnutím na výrobné časy je vidieť jasná úspora oproti pôvodnému procesu. Fakt, že táto úspora je dosiahnuteľná pomocou zmeny veľkosti dávok, ponúka jednoduché riešenie na zlepšenie celkového výrobného procesu. V tomto prípade je však dôležité zohľadniť aj fakt vysokého využitia niektorých zdrojov.

Tab. 9: Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením pre variant 3

Názov zákazky	Trvanie výroby [hod]	Pôvodné trvanie [hod]	rozdiel voči pôvodnému riešeniu [%]
KZK	64,25	62	+3
RKK	81,25	85	-4

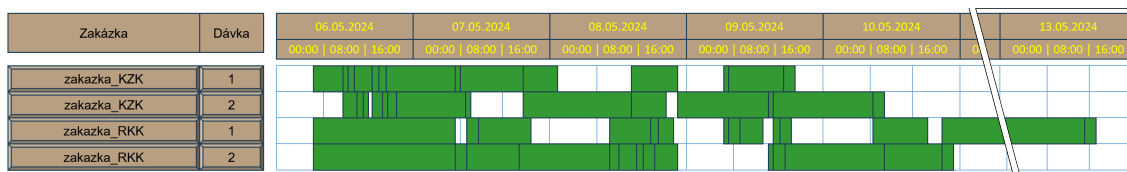


Obr. 37: Výkonnostné grafy pre variant s veľkosťou dávky 1250 ks

### 5.7.4 Výsledky variantu s veľkosťou dávky 5000 ks

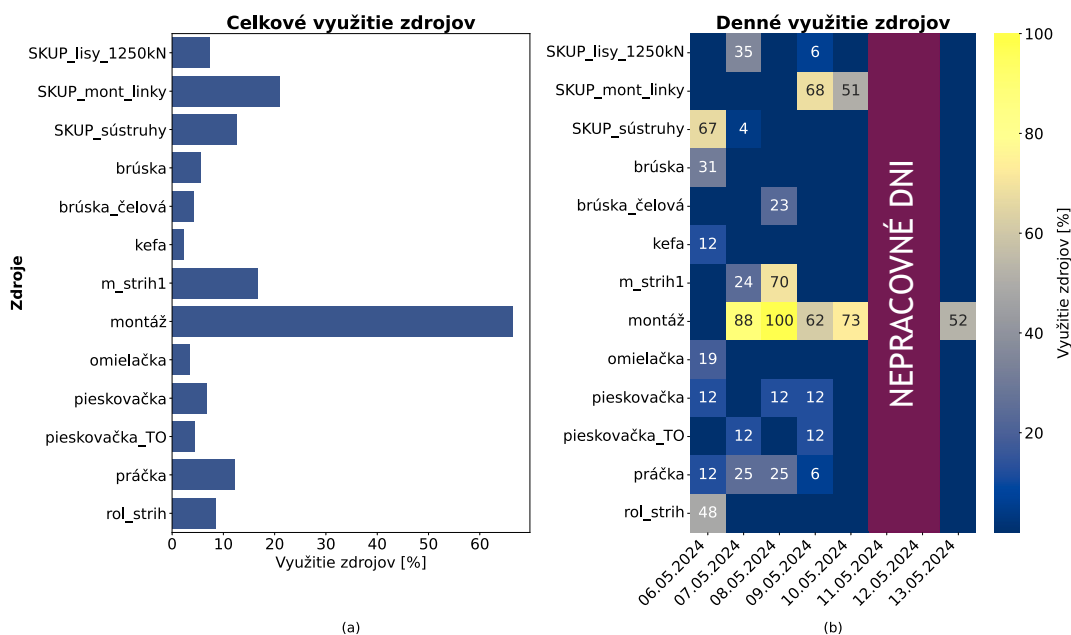
S odkazom na článok z predchádzajúcej časti, pre kompletne zhodnotenie vplyvu veľkosti dávky na celkový výrobný čas je potrebná simulácia aj zväčšených výrobných dávok.

V rámci analýzy Ganttovho grafu tohto prípadu je vidieť, že premena materiálu a teda prechod jednotlivými výrobnými operáciami je v prípade všetkých zákaziek pomerne plynulý v porovnaní s ostatnými variantmi. Ako je však takisto zreteľné, celkový výrobný čas je negatívne ovplyvnený, a to minimálne v prípade zákazky RKK.



Obr. 38: Ganttov diagram pre variant s veľkosťou dávky 5000 ks

Výkonnostné grafy ukazujú vysoké, ale rovnomernejšie rozložené využitie zdroju montáž. S ohľadom na celkové využitie zdrojov však montáž stále jednoznačne vystupuje spomedzi všetkých zdrojov čo naznačuje jej nadbytočné zataženie v porovnaní s inými zdrojmi.



Obr. 39: Výkonnostné grafy pre variant s veľkosťou dávky 5000 ks

Samotné časové hľadisko neprináša v prípade zväčšenia výrobnéj dávky žiadne zlepšenie. Predĺženie výrobnéj doby nastalo v oboch prípadoch, a tak väčšia dávka neukazuje na žiadne prínosy pre celkový výrobný proces.

Tab. 10: Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením pre variant 4

Názov zákazky	Trvanie výroby [hod]	Pôvodné trvanie [hod]	rozdiel voči pôvodnému riešeniu [%]
KZK	68,33	62	+10
RKK	90,33	85	+6



## 6 Záver

V rámci diplomovej práce boli stanovené štyri ciele, každý z nich pozostávajúci z viacerých menších cieľov.

V teoretickej časti bola vytvorená rozsiahla literárna rešerš, ktorá sa týkala popisu, tvorby a aplikácie digitálnych dvojčiat s dôrazom na výrobný sektor. Ďalej boli rozoberané podnikové úrovne automatizácie, v rámci ktorých sa vyčlenil výrobný informačný systém, jeho funkcie a možnosti integrácie s digitálnym dvojčatom výrobného systému. Záverom boli priblížené typy simulácií spoločne s ich aplikáciami v podobe simulačných nástrojov digitálnych dvojčiat.

Experimentálna časť bola zameraná na tvorbu a využitie digitálneho dvojčata vybraného výrobného systému, konkrétne zaoberajúceho sa výrobou ložísk. Po rešerši dostupného softvéru pre tvorbu digitálnych dvojčiat bol vybraný softvér SIM\_4\_PLAN. Nasledovalo vytvorenie metodiky tvorby digitálneho dvojčata vo vybranom softvéri. Zároveň s metodikou vzniklo aj samotné digitálne dvojča výrobného systému, ktoré bolo ukázané spoločne s jeho funkciami prevádzkového ako aj simulačného režimu.

Pomocou simulačných nástrojov digitálneho dvojčata bol nasimulovaný výrobný proces dvoch druhov výrobkov, ktorý bol následne analyzovaný. Analýza na základe poskytnutých výsledkov priniesla zistenie, že v rámci výrobného procesu vzniká úzke miesto výroby, ktoré bolo potrebné odstrániť.

Boli preto navrhnuté štyri varianty optimalizácie pôvodného výrobného procesu so snahou o odstránenie úzkeho miesta. Každému variantu bolo vytvorené príkladné digitálne dvojča so zapracovanými návrhmi na optimalizáciu týkajúce sa buďto úpravy zdrojov výrobného podniku alebo úpravy veľkosti výrobných dávok. Simulácie týchto návrhov priniesli výsledky, kedy v dvoch prípadoch došlo k zrýchleniu výrobného procesu. Ako najperspektívnejší sa javil variant pridania zdroja, na ktorom vznikalo samotné úzke miesto z dôvodu preťaženia.

Takto vytvorené digitálne dvojča prinieslo pozitívne výsledky aj pre samotný výrobný podnik a teda aj reálny praktický prínos.



## LITERATÚRA

- [1] GRIEVES, M. a VICKERS, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*. Springer. 2017, s. 85–113. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4). [cit. 2024-05-15].
- [2] TAO, F., ZHANG, M. a NEE, A. Y. C. *Digital twin driven smart manufacturing*. Academic press, 2019. ISBN 9780128176313.
- [3] KAGERMANN, H., WAHLSTER, W. a HELBIG, J. *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry*. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. München, Germany: acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013. Dostupné z: [http://forschungsunion.de/pdf/industrie\\_4\\_0\\_final\\_report.pdf](http://forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_final_report.pdf).
- [4] *ISA95, Enterprise-Control System Integration* [online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95>.
- [5] *Architektura a vrstvy ISA-95 | Siemens Software* [online]. [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: <https://www.sw.siemens.com/cs-CZ/technology/isa-95-framework-layers/>.
- [6] BOSCHERT, S. a ROSEN, R. Digital twin—the simulation aspect. *Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers*. Springer. 2016, s. 59–74. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5). [cit. 2024-05-15].
- [7] SINGH, M., FUENMAYOR, E., HINCHY, E. P., QIAO, Y., MURRAY, N. et al. Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*. MDPI. 2021, zv. 4, č. 2, s. 36. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>. [cit. 2024-02-02].
- [8] GLAESSGEN, E. a STARGEL, D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. 2012, s. 1818. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>. [cit. 2024-02-02].
- [9] ERRANDONEA, I., BELTRÁN, S. a ARRIZABALAGA, S. Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*. Elsevier. 2020,

- zv. 123, s. 103316. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>. [cit. 2024-02-03].
- [10] KRITZINGER, W., KARNER, M., TRAAR, G., HENJES, J. a SIHN, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *Ifac-PapersOnline*. Elsevier. 2018, zv. 51, č. 11, s. 1016–1022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>. [cit. 2024-02-03].
- [11] JAIN, V., LUTHRA, N. a SAINI, D. Digital twin technology: An evaluation. In: *Digital twin technology*. CRC Press, 2021, s. 1–21. ISBN 9781003132868.
- [12] NEGRI, E., FUMAGALLI, L. a MACCHI, M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia manufacturing*. Elsevier. 2017, zv. 11, s. 939–948. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>. [cit. 2024-02-03].
- [13] TAO, F., XIAO, B., QI, Q., CHENG, J. a JI, P. Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*. Elsevier. 2022, zv. 64, s. 372–389. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>. [cit. 2024-02-03].
- [14] LO, C., CHEN, C.-H. a ZHONG, R. Y. A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*. Elsevier. 2021, zv. 48, s. 101297. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>. [cit. 2024-02-03].
- [15] JAVAID, M., HALEEM, A. a SUMAN, R. Digital twin applications toward industry 4.0: a review. *Cognitive Robotics*. Elsevier. 2023, zv. 3, s. 71–92. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>. [cit. 2024-02-03].
- [16] *Viac o Priemysle 4.0* [online]. [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: <https://priemyselstyrinula.sk/viac-o-priemysle-4-0/>.
- [17] *Čo je smart factory? | SAP* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.sap.com/sk/products/scm/what-is-a-smart-factory.html>.
- [18] *Priemysel 4.0 – Bud' FIT* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://casopis.fit.cvut.cz/tema/priemysel-4-0/>.
- [19] *Základné prvky Industry 4.0* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://industry4.sk/o-industry-4-0/principy/>.
- [20] *Implementing Data-Driven Manufacturing in Northeast Ohio* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://smartmanufacturingcluster.org/resources/implementing-data-driven-manufacturing-in-northeast-ohio/>.

- [21] CAMARINHA MATOS, L. M., HEIJENK, G., KATKOORI, S. a STROUS, L. *Internet of Things. Technology and Applications*. Springer Nature, 2022. ISBN 9783030964665.
- [22] *What is IoT in Manufacturing and How to Use it — Katana* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://katanamrp.com/iot-in-manufacturing/>.
- [23] ALLA, A. a NAFIL, K. Gamification in IoT application: A systematic mapping study. *Procedia Computer Science*. Elsevier. 2019, zv. 151, s. 455–462. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.062>. [cit. 2024-02-11].
- [24] ASHTON, K. et al. That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*. Hauppauge, New York. 2009, zv. 22, č. 7, s. 97–114.
- [25] EVTODIEVA, T., CHERNOVA, D., IVANOVA, N. a WIRTH, J. The internet of things: possibilities of application in intelligent supply chain management. *Digital transformation of the economy: Challenges, trends and new opportunities*. Springer. 2019, s. 395–403. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11367-4\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11367-4_38). [cit. 2024-02-11].
- [26] SOORI, M., AREZOO, B. a DASTRES, R. Digital twin for smart manufacturing, A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. Elsevier. 2023, s. 100017. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>. [cit. 2024-02-11].
- [27] EROL, T., MENDI, A. F. a DOĞAN, D. The digital twin revolution in healthcare. In: IEEE. *2020 4th international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*. 2020, s. 1–7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9255249>. [cit. 2024-02-13].
- [28] VALLÉE, A. Digital twin for healthcare systems. *Frontiers in Digital Health*. Frontiers. 2023, zv. 5, s. 1253050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fdgth.2023.1253050>. [cit. 2024-02-13].
- [29] *15 Digital Twin Applications/ Use Cases by Industry in 2024* [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://research.aimultiple.com/digital-twin-applications/>.
- [30] TUEGEL, E. J., INGRAFFEA, A. R., EASON, T. G. a SPOTTSWOOD, S. M. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*. Hindawi. 2011, zv. 2011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2011/154798>. [cit. 2024-02-15].

- [31] MILLWATER, H., OCAMPO, J. a CROSBY, N. Probabilistic methods for risk assessment of airframe digital twin structures. *Engineering Fracture Mechanics*. Elsevier. 2019, zv. 221, s. 106674. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106674>. [cit. 2024-02-120].
- [32] JIANG, F., MA, L., BROYD, T. a CHEN, K. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*. Elsevier. 2021, zv. 130, s. 103838. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103838>. [cit. 2024-02-20].
- [33] CHENG, R., HOU, L. a XU, S. A review of digital twin applications in civil and infrastructure emergency management. *Buildings*. MDPI. 2023, zv. 13, č. 5, s. 1143. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/buildings13051143>. [cit. 2024-02-20].
- [34] DO AMARAL, J., DOS SANTOS, C., MONTEVECHI, J. a DE QUEIROZ, A. Energy Digital Twin Applications: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier. 2023, zv. 188, s. 113891. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113891>. [cit. 2024-02-21].
- [35] *What is digital-twin technology? | McKinsey* [online]. [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-digital-twin-technology>.
- [36] *Industry 4.0 and the digital twin Manufacturing | Deloitte* [online]. [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/kr/Documents/insights/deloitte-newsletter/2017/26\\_201706/kr\\_insights\\_deloitte-newsletter-26\\_report\\_02\\_en.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/kr/Documents/insights/deloitte-newsletter/2017/26_201706/kr_insights_deloitte-newsletter-26_report_02_en.pdf).
- [37] THELEN, A., ZHANG, X., FINK, O., LU, Y., GHOSH, S. et al. A comprehensive review of digital twin—part 1: modeling and twinning enabling technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. Springer. 2022, zv. 65, č. 12, s. 354. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4>. [cit. 2024-03-10].
- [38] SEGOVIA, M. a GARCIA ALFARO, J. Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*. MDPI. 2022, zv. 22, č. 14, s. 5396. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s22145396>. [cit. 2024-03-10].
- [39] MARMOLEJO SAUCEDO, J. A. Design and development of digital twins: A case study in supply chains. *Mobile Networks and Applications*. Springer. 2020, zv. 25, č. 6, s. 2141–2160. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11036-020-01557-9>. [cit. 2024-03-10].

- [40] PSAROMMATIS, F. a MAY, G. A literature review and design methodology for digital twins in the era of zero defect manufacturing. *International Journal of Production Research*. Taylor & Francis. 2023, zv. 61, č. 16, s. 5723–5743. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2101960>. [cit. 2024-03-11].
- [41] SCHOLTEN, B. *The road to integration: A guide to applying the ISA-95 standard in manufacturing*. Isa, 2007. ISBN 9780979234385.
- [42] ÅKERMAN, M. *Implementing Shop Floor IT for Industry 4.0*. Gothenburg, Sweden, 2018. PhD thesis. Chalmers University of Technology. ISBN 978-91-7597-752-2. Dostupné z: <https://research.chalmers.se/en/publication/502937>.
- [43] *Beyond the Pyramid: Using ISA95 for Industry 4.0 and Smart Manufacturing* [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.isa.org/intech-home/2021/october-2021/features/beyond-the-pyramid-using-isa95-for-industry-4-0-an>.
- [44] SAUL, L. *MES, ISA-95, MES-11, cMES, NAMUR – Why So Many Standards? | Tulip* [online]. 2018 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://tulip.co/blog/mes-isa-95-mes-11-cmes-namur/>.
- [45] KLETTI, J. *Manufacturing Execution Systems—MES*. Springer, 2007. ISBN 978-3-540-49744-8.
- [46] JULIE, F., STEPHEN, C., R., T. S., ROBERT, D., GORDON, K. et al. *MES Explained: A High Level Vision* [online]. 1997 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <http://www.cpdee.ufmg.br/~luizt/seixas/PaginaII/Download/DownloadFiles/pap6.pdf>.
- [47] *Časopis Automa Funkční model MES* [online]. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/funkcni-model-mes-2001\\_04\\_33532\\_2108/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/funkcni-model-mes-2001_04_33532_2108/).
- [48] COSTA DIAS, J. E. da, CASTRO FILHO, F. G. de, ANDRADE, A. A. de a FACÓ, J. F. B. The strategic role of mes systems in the context of industry 4.0. In: Springer. *Interdisciplinary Conference on Innovation, Design, Entrepreneurship, And Sustainable Systems*. 2018, s. 52–61. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55374-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55374-6_6). [cit. 2024-03-20].
- [49] *History of the MESA Models | MESA International* [online]. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://mesa.org/topics-resources/mesa-model/history-of-the-mesa-models/>.

- [50] *Sprievodky* [online]. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://help.k2.cz/k2gaia/02/sk/Pruvodky.htm>.
- [51] *Sběr dat z výroby v reálném čase - BARTECH* [online]. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.bartech.cz/project/sber-dat-v-realnem-case/>.
- [52] *Odvádžanie výroby* [online]. [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://help.k2.cz/k2gaia/02/sk/43430.htm>.
- [53] SAMIR, K., KHABBAZI, M. R., MAFFEI, A. a ONORI, M. A. Key performance indicators in cyber-physical production systems. *Procedia CIRP*. Elsevier. 2018, zv. 72, s. 498–502. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.036>. [cit. 2024-04-06].
- [54] KIKOLSKI, M. Determination of ISO 22400 Key Performance Indicators using Simulation Models: The Concept and Methodology. In: *MODELSWARD*. 2020, s. 92–99. Dostupné z: <https://doi.org/10.5220/0009175800920099>. [cit. 2024-04-08].
- [55] KIBIRA, D., BRUNDAGE, M. P., FENG, S. a MORRIS, K. Procedure for selecting key performance indicators for sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. American Society of Mechanical Engineers. 2018, zv. 140, č. 1, s. 011005. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.4037439>. [cit. 2024-04-10].
- [56] MARK, D. *28 Manufacturing Metrics that Actually Matter (The Ones We Rely On)* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://blog.lnsresearch.com/blog/bid/188295/28-manufacturing-metrics-that-actually-matter-the-ones-we-rely-on>.
- [57] *OEE (Overall equipment effectiveness)* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/oee-overall-equipment-effectiveness-celkova-efektivnost-zarizeni>.
- [58] NASSEHI, A. a URGO, M. *Simulation of Manufacturing Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. 1570–1573 s. ISBN 978-3-662-53120-4.
- [59] BANKS, J., II, J., NELSON, B. a NICOL, D. *Discret-Event System Simulation*. Prentice Hall, január 2010. ISBN 9780136062127.
- [60] FISHMAN, G. S. *Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis*. Springer, 2001. ISBN 978-1-4419-2892-4.



- [61] HUYNH, B. H., AKHTAR, H. a LI, W. Discrete event simulation for manufacturing performance management and optimization: a case study for model factory. In: IEEE. *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*. 2020, s. 16–20. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080394>. [cit. 2024-04-14].
- [62] AGALIANOS, K., PONIS, S., ARETOULAKI, E., PLAKAS, G. a EFTHYMIU, O. Discrete event simulation and digital twins: review and challenges for logistics. *Procedia Manufacturing*. Elsevier. 2020, zv. 51, s. 1636–1641. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.228>. [cit. 2024-04-14].
- [63] KOŠTURIÁK, J., GREGOR, M., MIČIETA, B. a MATUSZEK, J. *Projektovanie výrobných systémov pre 21. storočie*. Žilina, Slovakia: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2000. 397 s. ISBN 80-7100-553-3.
- [64] HELAL, M. *A Hybrid System Dynamics-Discrete Event Simulation Approach to Simulating the Manufacturing Enterprise*. 2008. Dizertačná práca. University of Central Florida. Dostupné z: <https://stars.library.ucf.edu/etd/3782/>.
- [65] SMITH, J. S. Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of manufacturing systems*. Elsevier. 2003, zv. 22, č. 2, s. 157–171. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(03\)90013-6](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(03)90013-6). [cit. 2024-04-14].
- [66] LEITÃO, P., BARBOSA, J. a TRENTESAUX, D. Bio-inspired multi-agent systems for reconfigurable manufacturing systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Elsevier. 2012, zv. 25, č. 5, s. 934–944. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.09.025>. [cit. 2024-04-14].
- [67] KIKOLSKI, M. Study of production scenarios with the use of simulation models. *Procedia Engineering*. Elsevier. 2017, zv. 182, s. 321–328. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.102>. [cit. 2024-05-10].



## ZOZNAM OBRÁZKOV

1	Ukážka dátového toku v digitálnom modeli, vlastná tvorba podľa [10] . . .	18
2	Dátový tok v digitálnom tieni, vlastná tvorba podľa [10] . . . . .	19
3	Dátový tok v digitálnom dvojčati, vlastná tvorba podľa [10] . . . . .	20
4	Percentuálne zastúpenie digitálnych dvojčiat naprieč sektormi, vlastná tvorba podľa [13] . . . . .	21
5	Najdôležitejšie aspekty chytrej továrne, upravené [20] . . . . .	22
6	Princíp prediktívnej údržby s využitím digitálneho dvojčata . . . . .	25
7	Proces tvorby digitálneho dvojčata, upravené [36] . . . . .	30
8	Automatizačná pyramída, vlastná tvorba podľa [42] . . . . .	35
9	Model MES s jednotlivými funkčnými skupinami a interagujúcimi systémami, vlastná tvorba podľa [46] . . . . .	36
10	Kolaboratívny MES model s upravenými funkčnými skupinami a interagujúcimi systémami, vlastná tvorba podľa [49] . . . . .	39
11	Elektronická sprievodka v softvéri K2 [50] . . . . .	41
12	Modelový diagram KPI, upravené [53] . . . . .	44
13	Porovnanie typov simulácií, spojitá simulácia (a), diskrétna simulácia (b) a kombinovaná simulácia (c), upravené [64] . . . . .	49
14	Schéma výrobnéj haly . . . . .	53
15	Technologický postup výroby jedného z produktov . . . . .	54
16	Grafické rozhranie programu SIM_4_PLAN s oblasťou pre schéma výrobného systému (horná časť) a ovládacím panelom (dolná časť) . . . .	55
17	Odporúčaný postup tvorby digitálneho dvojčata v SIM_4_PLAN . . . . .	55
18	Dialógové okno pre vkladanie materiálu . . . . .	56
19	Vytváranie pracovnej zmeny v prostredí SIM_4_PLAN . . . . .	58
20	Pridávanie nového zdroja . . . . .	59
21	Ukážka rozpracovaného technologického postupu s vloženými procesnými krokmi . . . . .	60
22	Dialógové okno výrobného procesného kroku (horné) spoločne s materiálovým kusovníkom (dolné) . . . . .	62
23	Ukážka pridávania nového výrobku . . . . .	63
24	Dialógové okno pre priadanie novej zákazky . . . . .	64
25	Ukážka vytvoreného digitálneho dvojčata výrobného systému v prostredí SIM_4_PLAN . . . . .	66
26	Odvádzanie výroby . . . . .	67

27	Ukážka výstupov týkajúcich sa prevádzkového režimu digitálneho dvojčata v podobe frontu zdroja (a), stavu zdroja (b) a stavu výrobnéj dávky (c) . . . . .	68
28	Rozvrh pre zdroj . . . . .	69
29	Základné výstupy zo simulačného režimu digitálneho dvojčata v podobe využitia zdrojov (a), zmeny materiálu v čase (b) a Ganttovho diagramu pre zdroje (c) . . . . .	70
30	Ganttov diagram zákaziek . . . . .	71
31	Grafy celkového využitia (a) a denného využitia (b) zdrojov . . . . .	72
32	Ganttov diagram pre variant s pridanou montážou . . . . .	75
33	Výkonnostné grafy pre variant s pridanou montážou . . . . .	75
34	Ganttov diagram pre variant s pridanou práčkou . . . . .	76
35	Výkonnostné grafy pre variant s pridanou práčkou . . . . .	77
36	Ganttov diagram simulácie s veľkosťou dávky 1250 ks . . . . .	78
37	Výkonnostné grafy pre variant s veľkosťou dávky 1250 ks . . . . .	79
38	Ganttov diagram pre variant s veľkosťou dávky 5000 ks . . . . .	79
39	Výkonnostné grafy pre variant s veľkosťou dávky 5000 ks . . . . .	80

## ZOZNAM TABULIEK

1	Popisná tabuľka KPI podľa štandardu ISO 22400 . . . . .	43
2	Výber najbežnejšie používaných KPI v priemysle s odkazom na MESA	45
3	Prehľad dostupného softvéru pre tvorbu digitálnych dvojčiat . . . . .	52
4	Parametre zákaziek vstupujúcich do simulácie . . . . .	70
5	Výsledné časy trvania výroby jednotlivých zákaziek . . . . .	71
6	Návrhy na optimalizáciu výrobného procesu . . . . .	73
7	Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením . . . . .	75
8	Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením pre variant 2 .	77
9	Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením pre variant 3 .	78
10	Výrobné časy zákaziek a porovnanie s pôvodným riešením pre variant 4 .	80