



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## ANALÝZA MATERIÁLOVÉHO TOKU V ZAVÁŽECÍM SYSTEMU S VYUŽITÍM POČÍTAČOVÉ SIMULACE

ANALYSIS OF MATERIAL FLOW IN THE LOADING SYSTEM PRODUCTION USING COMPUTER  
SIMULATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Loprais

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal

Urbánek

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Pavel Loprais**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Urbánek**  
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 bakalářské práce:

## **Analýza materiálového toku v zavázacím systému s využitím počítačové simulace**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Vypracování literární rešerše počítačových softwarů používaných pro modelování a simulaci materiálového toku ve výrobě. Dle navržené koncepce layoutu vytvoření počítačového simulačního modelu zavázacích okruhů včetně nastavení základních provozních parametrů s pomocí programu Plant Simulation. Vypracování detailního popisu informačních toků zavázací linky včetně implementace navržených systémů do počítačového modelu. Provedení analýzy vlivu parametrů simulačních modelů na pojednávané charakteristiky materiálových toků a informačních toků.

### **Cíle bakalářské práce:**

Literární rešerše počítačových simulací materiálového toku.  
Návrh koncepce layoutu zadané zavázací linky včetně vytvoření počítačového modelu layoutu.  
Vypracování detailního popisu informačních toků zavázací linky včetně implementace navržených systémů do počítačového modelu.  
Provedení simulačních experimentů dle navržené matice experimentů.  
Analýza vlivu parametrů simulačních modelů na vybrané charakteristiky materiálového toku.

### **Seznam doporučené literatury:**

BANGSOW, Steffen. Tecnomatix Plant Simulation. 2nd ed. New York: Springer, 2020, ISBN 978-3-030-41543-3.

PINKER, Alexander a Marco Prügelmeyer. Innovationen in der Logistik. 1. Auflage, Huss-Verlag, 2021, ISBN 978-3-948001-75-9.

NOCHE, Bernd a Mathias BÖS. Simulation der Transportverkehre. MAYER, Gottfried, Carsten PÖGE, Sven SPIECKERMANN a Sigrid WENZEL, ed. Ablaufsimulation in der Automobilindustrie [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, 2020-03-14, s. 155-171 [cit. 2020-10-06]. ISBN 978-3-662-59387-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-59388-2\_11.

WENZEL, Sigrid a Matthias WEIß. Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg, 2008. ISBN 978-354-0352-761.

ZEIGLER, Bernard P. Theory of modelling and simulation. New York: Wiley, c1976, xxii, 435 p. ISBN 04-719-8152-4.

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vypracováním literární rešerše počítačových softwarů používaných pro modelování a simulaci materiálového toku ve výrobě. Dle navržené koncepce layoutu vytvoření počítačového simulačního modelu zavázečích okruhů včetně nastavení základních provozních parametrů s pomocí programu Plant Simulation. Vypracování detailního popisu informačních toků zavázečí linky včetně implementace navržených systémů do počítačového modelu. Provedení analýzy vlivu parametrů simulačních modelů na pojednávané charakteristiky materiálových toků a informačních toků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

analýza materiálového toku, zavázečí systém, počítačová simulace, optimalizace výrobních procesů, informační tok, výrobní linka, logistika

## ABSTRACT

Bachelor thesis focuses on the elaboration of a literary review of computer software used for modelling and simulating material flow in manufacturing. According to the proposed layout concept, a computer simulation model of loading circuits will be created, including the configuration of basic operational parameters using the Plant Simulation program. The work involves a detailed description of information flows in the loading line, including the implementation of proposed systems into the computer model. An analysis will be conducted to assess the impact of simulation model parameters on the discussed characteristics of material and information flows.

## KEYWORDS

material flow analysis, loading system, computer simulation, optimization of manufacturing processes, information flow, production line, logistics

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LOPRAIS, Pavel. *Analýza materiálového toku v zavážecím systému s využitím počítačové simulace*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157280>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michal Urbánek.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Urbánka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Pavel Loprais

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Michalovi Urbánkovi za veškerou trpělivost, ochotu a cenné rady během vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu během celého mého studia.



# OBSAH

Úvod .....	9
<b>1 Počítačová simulace materiálového toku.....</b>	<b>10</b>
1.1 Teoretický základ počítačové simulace .....	10
1.2 Aplikace v průmyslu.....	10
1.3 Případové studie .....	10
1.4 Výzvy a omezení .....	11
<b>2 Počítačové softwary používané pro modelování a simulaci materiálového toku ve výrobě .....</b>	<b>12</b>
2.1 Přehled softwarů .....	12
2.1.1 FlexSim.....	13
2.1.2 AnyLogic .....	13
2.1.3 Arena Simulation Software .....	14
2.1.4 Simul8.....	15
2.1.5 Tecnomatix Plant Simulation .....	15
2.2 Vzájemné porovnání.....	16
2.3 Výběr preferovaného softwaru .....	16
2.4 Zhodnocení .....	17
<b>3 Koncepce layoutu zavážecí linky a tvorba počítačového simulačního modelu .....</b>	<b>18</b>
3.1 Koncepce layoutu pro výrobní linku LED světel .....	18
3.2 Finální layout.....	19
3.3 Tvorba počítačového simulačního modelu.....	19
3.4 Popis modelu .....	20
3.4.1 Příprava komponent.....	20
3.4.2 Pájení komponent .....	21
3.4.3 Inspekce a testování.....	21
3.4.4 Zasazení do rámu.....	22
3.4.5 Balení a expedice.....	22
3.5 Parametry a optimalizace linky .....	23
3.5.1 Zadání parametrů výrobních strojů.....	23
3.5.2 Optimalizace linky.....	24
<b>4 Informační tok .....</b>	<b>26</b>
4.1 Sledování materiálů a komponent s využitím RFID .....	26
4.1.1 Implementace do modelu.....	27
4.2 Monitorování stavu strojů a zařízení .....	28
4.2.1 Implementace do modelu.....	28
4.3 Kvalita a testovací výsledky .....	29
4.3.1 Implementace do modelu.....	29
4.4 Komunikace mezi pracovními stanicemi .....	30
4.4.1 Implementace do modelu.....	30
4.5 Sběr a analýza dat.....	31
4.5.1 Implementace do modelu.....	31
4.6 Shrnutí .....	31

---

<b>5</b>	<b>Simulační experimenty .....</b>	<b>32</b>
5.1	Matice experimentů.....	32
5.2	Vstupní parametry.....	32
5.2.1	Variace produktů.....	32
5.2.2	Procento vadných kusů .....	32
5.2.3	Poruchovost strojů.....	32
5.3	Výstupní parametry.....	33
5.3.1	Celková účinnost zařízení .....	33
5.3.2	Takt linky .....	34
5.3.3	Počet vyrobených produktů za hodinu.....	34
5.3.4	Vytížení strojů.....	34
5.3.5	Čas a počet vadných produktů .....	35
5.4	Provedení experimentu .....	35
<b>6</b>	<b>Analýza vlivu parametrů simulačních modelů.....</b>	<b>36</b>
6.1	Analýza výsledků.....	36
6.1.1	Celkový čas výroby.....	36
6.1.2	Celková efektivita zařízení (OEE) .....	37
6.1.3	Takt linky .....	37
6.1.4	Počet produktů vyrobených za hodinu.....	38
6.2	Vyhodnocení .....	39
	<b>Závěr .....</b>	<b>40</b>
	<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>44</b>

## ÚVOD

V dnešní době je optimalizace výrobních a logistických procesů klíčovou výzvou pro průmyslové podniky. Globalizace, komplexní dodavatelské řetězce a tlak na snižování nákladů nutí firmy hledat nové způsoby, jak zvýšit efektivitu. Efektivní řízení materiálového toku je zásadní pro snižování nákladů, zvyšování produktivity a zlepšování celkové efektivity výrobních systémů.

Počítačová simulace představuje cenný nástroj pro analýzu a plánování materiálových toků, umožňuje experimentování s různými scénáři a strategiemi bez zásahů do reálného provozu. Vytvářením digitálních modelů výrobních procesů lze testovat a optimalizovat různé parametry, což vede k lepšímu řízení těchto procesů. Simulace materiálového toku nabízí flexibilní a detailní přístup k modelování a testování různých scénářů v bezpečném digitálním prostředí.

Mnoho případových studií demonstruje praktickou aplikaci simulace v optimalizaci materiálových toků. Například studie v automobilovém průmyslu ukazují významná zlepšení ve využití zdrojů, snížení ztrát a zvýšení produktivity. Přestože má počítačová simulace mnoho výhod, čelí také výzvám, jako je složitost modelování, výpočetní nároky a náklady na získání a údržbu přesných dat.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na analýzu materiálového toku v zavázacím systému s využitím počítačové simulace, konkrétně programu Tecnomatix Plant Simulation. Cílem je přispět k lepšímu porozumění a řízení materiálových toků v průmyslovém prostředí a podpořit efektivní rozhodování v oblasti výrobních a logistických procesů.

# 1 POČÍTAČOVÁ SIMULACE MATERIÁLOVÉHO TOKU

V souvislosti hledání způsobů, jak zvýšit efektivitu a snížit náklady v průmyslových a logistických procesech, představuje počítačová simulace revoluční přístup k modelování a testování různých scénářů v bezpečném a kontrolovaném digitálním prostředí. Firmy tak můžou předvídat výsledky změn v materiálových tocích s přesností, která by bez počítačové simulace nebyla možná, a to bez potřeby nákladných a časově náročných fyzických experimentů. Úvodní část naznačila, že efektivní řízení materiálového toku hraje důležitou roli v optimalizaci výrobních systémů, a nyní se obracíme k počítačové simulaci jako k nástroji, který umožňuje tuto úlohu řešit s nevídanou flexibilitou a hloubkou analýzy. Následující kapitola se zaměřuje na teoretický základ počítačové simulace, objasňuje její klíčové aspekty a ukazuje, jak se stala nepostradatelnou součástí moderního průmyslového inženýrství.

## 1.1 TEORETICKÝ ZÁKLAD POČÍTAČOVÉ SIMULACE

Počítačová simulace je založena na vytváření digitálních modelů reálných nebo teoretických systémů s cílem studovat jejich chování pod různými podmínkami. Tento proces zahrnuje tři klíčové kroky: modelování systému, provádění experimentů a analýzu výsledků. Modelování systému vyžaduje definování jeho struktury, procesů a interakcí s prostředím, často s využitím matematických a logických vztahů. Provádění experimentů na digitálním modelu umožňuje testování různých možností a strategií, zatímco analýza výsledků poskytuje náhled na možné výkonnosti systému za různých podmínek [1].

Jedním z fundamentálních aspektů je koncept "digitálního dvojčete" [5], což je detailní digitální replika již existujícího, či navrhovaného fyzického systému, která dokáže predikovat chování systému před jeho skutečnou implementací nebo změnou.

## 1.2 APLIKACE V PRŮMYSLU

Simulace materiálového toku nalézá širokou aplikaci v mnoha průmyslových odvětvích především díky své schopnosti optimalizovat procesy, snižovat náklady a zkracovat dodací lhůty. V automobilovém průmyslu, letectví, zdravotnictví a mnoha dalších sektorech se používá k plánování výrobních linek, logistiky, skladování a distribuce [2]. Například v automobilovém průmyslu umožňuje simulace optimalizaci výrobních linek pro zvýšení efektivity a snížení času montáže. Velmi užitečná je také pro optimalizaci logistiky a dodavatelské řetězce, kde může identifikovat úzká místa, zlepšit tok materiálu a zvýšit celkovou efektivitu systému [6].

## 1.3 PŘÍPADOVÉ STUDIE

V praxi bylo provedeno mnoho případových studií, které jsou klíčové pro demonstraci praktické aplikace počítačové simulace v analýze a optimalizaci materiálových toků. Jedna ze studií, publikovaná v „Simulation: the practice of model development and use“ [7], zkoumá použití simulace pro optimalizaci výrobních linek ve velkém automobilovém výrobním závodě. Studie zdůrazňuje, jak simulace vedla k významným zlepšením ve využití zdrojů, snížení ztrát a zvýšení produktivity. Příkladem může být také studie představená v díle "Innovationen in der Logistik" od Pinkera a Prügelmeyera [2], která ukazuje, jak simulace pomáhá při návrhu efektivních logistických řešení pro snížení čekacích dob a zlepšení celkové efektivity v distribučních centrech. Další studie prezentovaná v "Simulation der Transportverkehrs" od Noche a Böse [3] ukazuje, jak simulace může přispět k optimalizaci dopravních toků a snížení emisí v městských oblastech.

## 1.4 VÝZVY A OMEZENÍ

I přes významné přínosy počítačové simulace čelí výzkumníci a praktici výzvám, jako je složitost modelování realistických scénářů, vysoké výpočetní nároky a náklady na získání a udržování přesných a aktuálních dat. Tato omezení mohou ovlivnit realizaci i přesnost simulace.

Jednou z hlavních výzev je komplexita při modelování realistických systémových scénářů. Simulace vyžaduje detailní modelování materiálových toků a operací v závodě, což může být výpočetně velmi náročné, zejména při modelování velkých a komplexních systémů [1].

Přestože softwary pro modelování a simulaci materiálového toku ve výrobě nabízí rozsáhlé možnosti, vyžadují také vysokou expertízu uživatele, protože model musí být nastaven a kalibrován tak, aby přesně odpovídal reálným operacím [1].

Inovace v logistice často závisí na schopnosti shromažďovat a analyzovat velké objemy dat. Zajištění přesných a aktuálních dat pro simulaci logistických operací může být nákladné a vyžaduje pokročilé technologie pro sběr a zpracování dat. V této souvislosti je důležité rozvíjet efektivní metody pro zpracování a analýzu dat, aby bylo možné maximalizovat přínosy simulace pro optimalizaci logistických procesů [2].

Překonávání výzev, jako jsou komplexita modelování, výpočetní nároky nebo náklady a dostupnost dat, je klíčové pro efektivní využití počítačové simulace v průmyslu. Vyžaduje tak neustálý vývoj v softwarovém i hardwarovém inženýrství, ale také ve výzkumu operací a systémovém inženýrství.

## 2 POČÍTAČOVÉ SOFTWARE POUŽÍVANÉ PRO MODELOVÁNÍ A SIMULACI MATERIÁLOVÉHO TOKU VE VÝROBĚ

V současném průmyslovém prostředí je simulace velmi důležitá pro optimalizaci výrobních a logistických procesů. Především díky schopnosti předvídat výsledky změn v materiálovém toku, než dojde k jejich implementaci do reálného prostředí. Tato schopnost je umožněna použitím sofistikovaných softwarových nástrojů, které umožňují detailní modelování a analýzu výrobních systémů. Tyto nástroje nabízejí širokou škálu funkcí od základních simulací diskrétních událostí po komplexní modelování digitálních dvojčat. V této části se zaměříme na přehled a hodnocení klíčových softwarů dostupných na trhu, které jsou používány pro simulaci materiálového toku. Tyto softwary se liší svými specifickými charakteristikami, silnými stránkami a aplikacemi, čímž se každý z nich specializuje na různé aspekty simulace v průmyslovém inženýrství.

### 2.1 PŘEHLED SOFTWARE

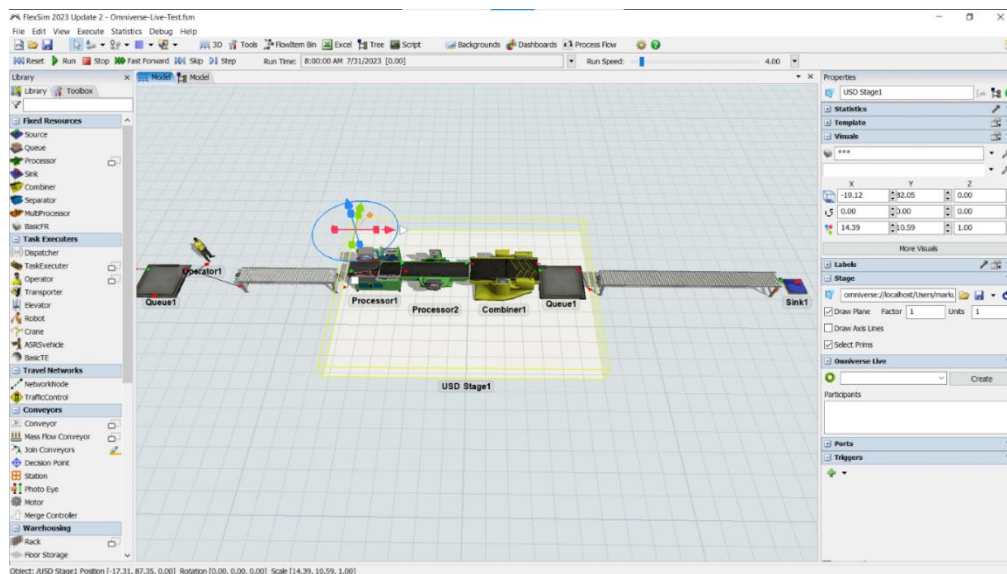
Sofistikované simulační softwary slouží jako nástroje pro modelování a simulaci materiálového toku ve výrobě. Umožňují detailně analyzovat a optimalizovat výrobní a logistické procesy. Různé softwary se specializují na různé aspekty simulace a nabízí nezbytné prostředky pro návrh a optimalizaci výrobních systémů.

Mezi klíčové softwary na trhu patří:

- FlexSim - [www.flexsim.com](http://www.flexsim.com)
- AnyLogic - [www.anylogic.com](http://www.anylogic.com)
- Arena Simulation Software - [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com)
- Simul8 - [www.simul8.com/](http://www.simul8.com/)
- Tecnomatix Plant Simulation - [plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/products/plant-simulation-software](http://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/products/plant-simulation-software)

### 2.1.1 FLEXSIM

FlexSim je vizuálně orientovaný software pro 3D simulaci, který umožňuje uživatelům modelovat složité procesy s bohatými vizuálními a analytickými možnostmi. Je speciálně navržen pro optimalizaci výrobních linek, distribučních center a zlepšení celkové efektivity operací. FlexSim je především zaměřen na analýzu, vizualizaci a optimalizaci výrobních, logistických a jiných procesů. Jeho vzhledově orientované prostředí a drag-and-drop rozhraní usnadňují modelování složitých systémů a procesů s bohatými možnostmi zobrazování [8]. Silné stránky softwaru jsou především v oblasti 3D vizualizace, což umožňuje uživatelům lépe pochopit prostorové aspekty jejich operací a identifikovat možná zlepšení. Jeho schopnost simulovat komplexní interakce a události v reálném čase poskytuje usnadňuje rozhodování o zlepšeních a inovacích.

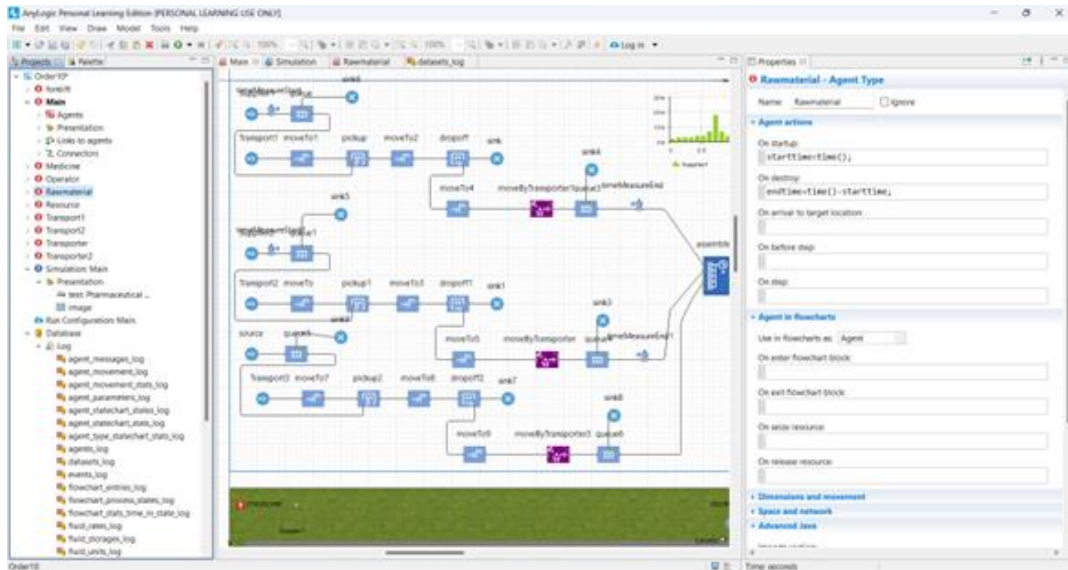


Obr. 1: Pracovní prostředí softwaru FlexSim [8]

### 2.1.2 ANYLOGIC

AnyLogic se odlišuje svou unikátní schopností kombinovat různé simulační přístupy – diskrétní události, systémová dynamika a agentní modelování. Tato flexibilita činí AnyLogic užitečným pro modelování a analýzu komplexních systémů. Je vhodný pro širokou škálu průmyslových aplikací a nabízí pokročilé možnosti pro modelování složitých systémů [9].

Jeho hlavní schopností je adaptabilita k různým typům modelovacích problémů, což uživatelům umožňuje vytvářet sofistikované a multidisciplinární modely, které mohou zahrnovat různé aspekty a dynamiky zkoumaného systému.

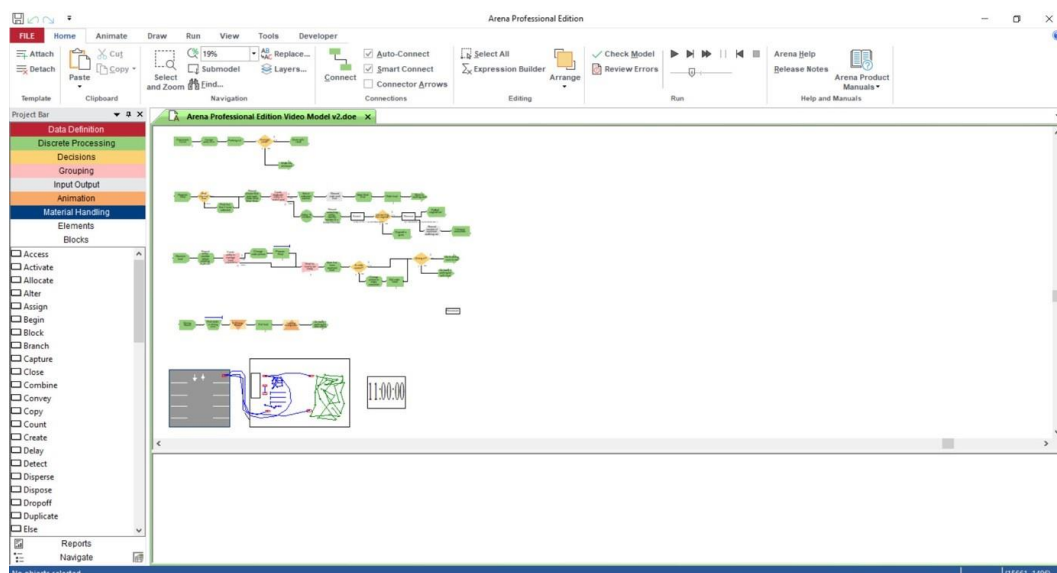


Obr. 2: Pracovní prostředí softwaru AnyLogic [9]

### 2.1.3 ARENA SIMULATION SOFTWARE

Arena Simulation Software, je široce respektovaný a používaný nástroj pro simulaci diskretních událostí, vyvinutý společností Rockwell Automation. Nabízí komplexní řešení pro modelování, simulaci a analýzu výrobních procesů, logistiky a dalších. Umožňuje uživatelům efektivně modelovat a analyzovat procesy a systémy, aby optimalizovali jejich výkon a efektivitu [10].

Arena je především známá pro svou robustnost a schopnost detailně modelovat a analyzovat velmi složité procesy. Její široké využití v průmyslu a akademické sféře má vliv také na to, že existuje rozsáhlá podpůrná komunita a bohaté soubory studijních materiálů.



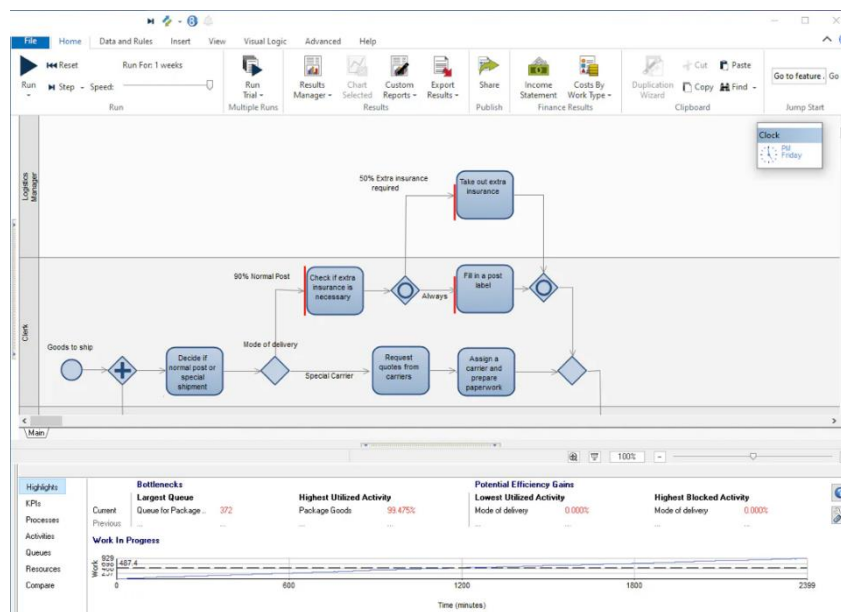
Obr.3: Pracovní prostředí softwaru Arena Simulation Software [10]



## 2.1.4 SIMUL8

Simul8 se zaměřuje na rychlé a efektivní modelování diskretních událostí s důrazem na uživatelsky přívětivé rozhraní. Je známý svými silnými nástroji pro statistickou analýzu a reportování, což umožňuje uživatelům rychle nastavit, spustit simulace a efektivně analyzovat výsledky [11].

Simul8 se vyznačuje jednoduchostí použití a rychlostí, s jakou lze s ním modely vytvářet a analyzovat. To umožňuje uživatelům efektivně experimentovat s různými scénáři a rychle dosáhnout požadovaných výsledků. Může být však omezen ve složitějších simulacích a nabízí menší rozsah knihoven ve srovnání s konkurencí.

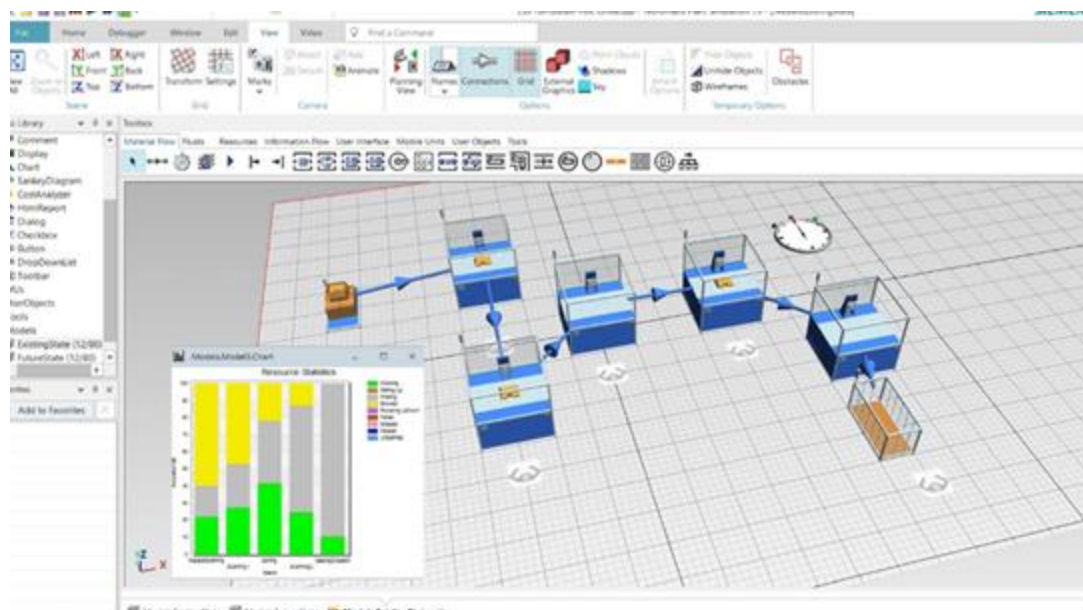


Obr. 4: Pracovní prostředí softwaru Simul8[11]

## 2.1.5 TECNOMATIX PLANT SIMULATION

Tecnomatix Plant Simulation je součástí portfolia digitální výroby společnosti Siemens a specializuje se na simulaci a optimalizaci výrobních a logistických procesů. Tento software umožňuje uživatelům virtuálně modelovat výrobní systémy, analyzovat jejich výkonnost a identifikovat oblasti pro zlepšení, snížení nákladů a zvýšení produktivity. Jeho integrace do širšího ekosystému Siemens také umožňuje snadné propojení s dalšími softwarovými řešeními a výrobními technologiemi [12].

Silnou stránkou Tecnomatix Plant Simulation je především široká škála nástrojů pro detailní analýzu a simulaci, což zahrnuje možnosti pro energetické hodnocení a simulaci udržitelnosti.



Obr. 5: Pracovní prostředí softwaru Plant Simulation [12]

## 2.2 VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ

Každý z těchto softwarů nabízí jedinečné vlastnosti a silné stránky, které je činí vhodnými pro různé typy simulací a analytických potřeb. Výběr mezi nimi by měl být řízen specifickými cíli projektu, požadavky na modelování a preferencemi uživatelů, stejně jako dostupností zdrojů a rozpočtem. FlexSim a Tecnomatix Plant Simulation jsou vynikající pro vizuálně bohaté a detailní modelování výrobních prostředí, zatímco AnyLogic poskytuje flexibilitu pro různé modelovací přístupy. Arena je silná v simulaci diskrétních událostí a je podporována rozsáhlou uživatelskou a akademickou komunitou. Simul8 nabízí rychlost a jednoduchost pro ty, kteří potřebují rychle provést simulace a analýzy.

## 2.3 VÝBĚR PREFEROVANÉHO SOFTWARE

Mezi uvedenými softwary se Tecnomatix Plant Simulation od firmy Siemens jeví jako nejvhodnější volba pro analýzu materiálového toku v zavázcím systému z několika důvodů:

Specializace na výrobní a logistické procesy: Plant Simulation je specificky navržen pro potřeby výrobního inženýrství a logistiky, což zajišťuje vysokou míru přizpůsobení a efektivity při modelování těchto konkrétních procesů [12].

Rozsáhlé možnosti analýzy: Tento software poskytuje pokročilé analytické nástroje, které umožňují detailní hodnocení výkonnosti, identifikaci úzkých míst a optimalizaci procesů v reálném čase [12].

Uživatelská přívětivost a integrace: Plant Simulation nabízí intuitivní uživatelské rozhraní a je dobře integrovatelný s dalšími softwarovými nástroji a systémy, což zjednodušuje proces modelování a zvyšuje efektivitu práce [12].

Podpora pro digitální dvojčata: Možnost vytvoření digitálního dvojčete výrobního systému umožňuje komplexní simulaci a analýzu bez nutnosti fyzických zásahů do reálného systému, což snižuje rizika a náklady spojené s testováním změn v produkci [12].

## 2.4 ZHODNOCENÍ

Z výše zmíněných důvodů považuji Tecnomatix Plant Simulation za ideální nástroj pro účely této bakalářské práce, kde je cílem provést analýzu materiálového toku v zavážecím systému s použitím počítačové simulace. Jeho schopnost detailně modelovat a analyzovat materiálové toky a informační procesy, společně s vysokou mírou přesnosti a efektivity, činí z tohoto softwaru ideální volbu pro dosažení stanovených cílů.

### 3 KONCEPCE LAYOUTU ZAVÁŽECÍ LINKY A TVORBA POČÍTAČOVÉHO SIMULAČNÍHO MODELU

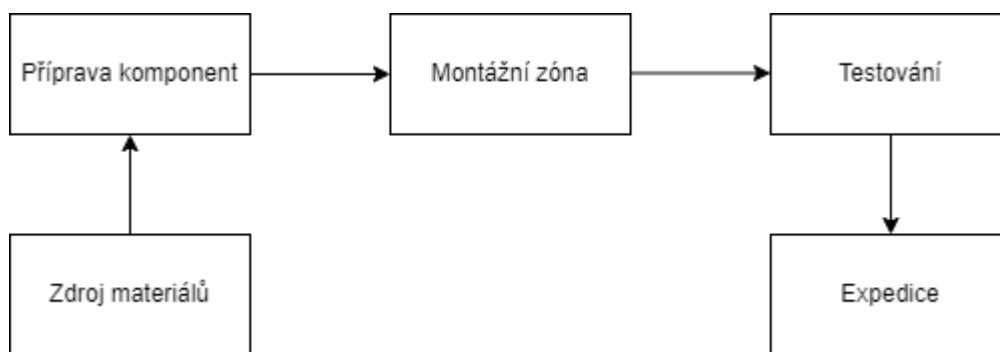
Pro detailní návrh zavážecí linky ve výrobním systému je klíčové nejprve specifikovat několik základních informací o tom, co linka bude vyrábět, jaké procesy budou zahrnuty, jaký materiál bude použit a jaké jsou požadavky na výstup.

Pro účely této práce byla zvolena výrobní linka specializovaná na výrobu LED světel. Tento typ výrobku jsem si vybral na základě technologických požadavků, které budou dobře demonstrovat výzvy spojené s efektivním plánováním výrobních procesů.

V návrhu koncepce layoutu bylo usilováno o maximalizaci efektivity toku materiálu, a především informací mezi jednotlivými kroky celkového výrobního procesu. Důraz byl kladen na minimalizaci doby jednotlivých cyklů, snížení čekacích dob mezi operacemi a zlepšení celkové produktivity.

#### 3.1 KONCEPCE LAYOUTU PRO VÝROBNÍ LINKU LED SVĚTEL

Pro výrobu specifikovaného výrobku byl použit layout, který podporuje lineární tok materiálů a minimalizuje potřebnou manipulaci. Tento přístup tak zahrnuje uspořádání výrobních strojů a stanic tak, aby se materiál postupně přesouval z jedné operace do druhé bez zbytečných zpětných pohybů a zastávek.



Obr. 6: Zjednodušený diagram výrobní linky [vlastní]

V rámci návrhu layoutu je důležité říct si proces výroby LED světel a jaké kroky tento proces zahrnuje:

1. Příprava PCB
2. Příprava komponent
3. Osazování komponent
4. Pájení
5. Inspekce a testování
6. Montáž komponent do finálního krytu
7. Balení a expedice

Výrobní linka bude navrhována s ohledem na optimalizaci toku práce a zajištění flexibility pro možné budoucí rozšíření nebo úpravy produktového portfolia.

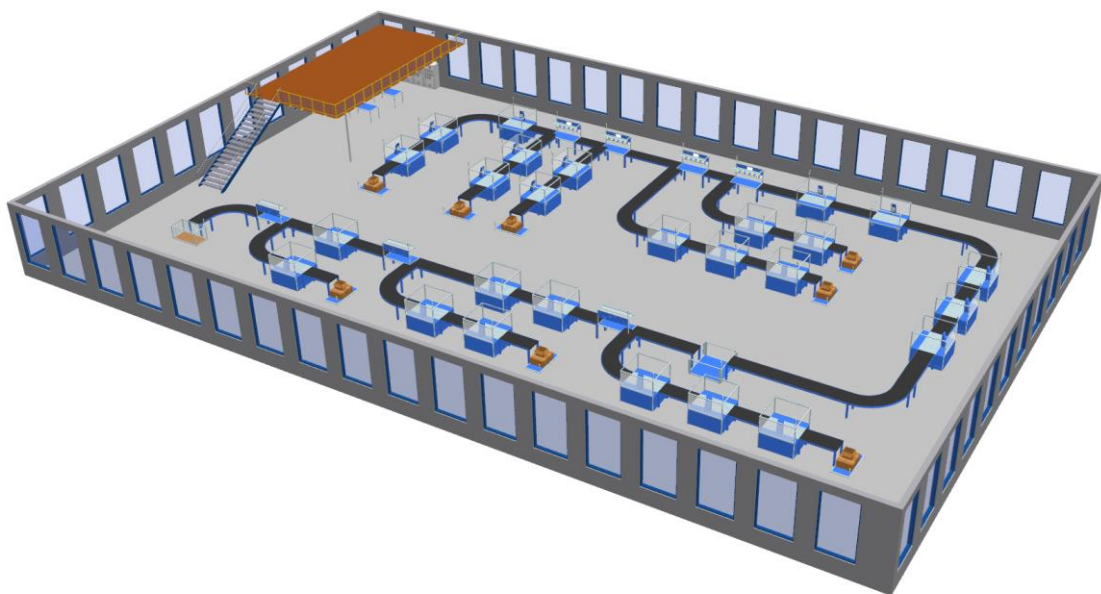
### 3.2 FINÁLNÍ LAYOUT

Dle koncepce byl vytvořen finální blokový layout (viz Příloha 1) dle kterého bude jako další krok vytvořen plnohodnotný počítačový model pro účely simulace a následné analýzy výsledků.

Jednotlivé komponenty přechází ze zdrojů na stanice (PU, PR, PK, PL), které je připraví na následné zasazení na PCB desku. Pokračují do montážních stanic (MS) kde jsou součásti zasazeny na desku. Následuje stanice (P) pro jejich pájení na desku a odtud se deska přesouvá na testovací stanice (T). Pokud výrobek v pořádku projde testováním, je zasazen do rámu, který je předchystán na stanicích tomu určených (R). Rám je poté kompletizován ve stanicích (K) a pokračuje na balení (B). Nakonec je produkt označen etiketou (E) a odchází na expedici.

### 3.3 TVORBA POČÍTAČOVÉHO SIMULAČNÍHO MODELU

Dle návrhu koncepce layoutu zavážecí linky byl pomocí programu Tecnomatix Plant Simulation vytvořen vlastní počítačový simulační model zavážecích okruhů včetně nastavení základních provozních parametrů. Model byl sestaven za použití vybraných objektů vhodných pro jeho tvorbu. Mezi ně patří Source a Drain. Zdroj (source) umožňuje vstup Mobilních jednotek (MU) do simulace. Drain je potom aktivní objekt, který jednotky pro změnu odebírá. Dále bylo použito objektu Station, ten reprezentuje výrobní stanice s kapacitou jednoho výrobku. Stanice (station) jsou propojeny pomocí objektu Conveyor, ten je použit k modelování válečkových či pásových dopravníků. Dále bylo použito EventControlleru ke spouštění a zastavování simulace a objektů Method pro tvorbu řídicích struktur pomocí programovacího jazyka SimTalk.



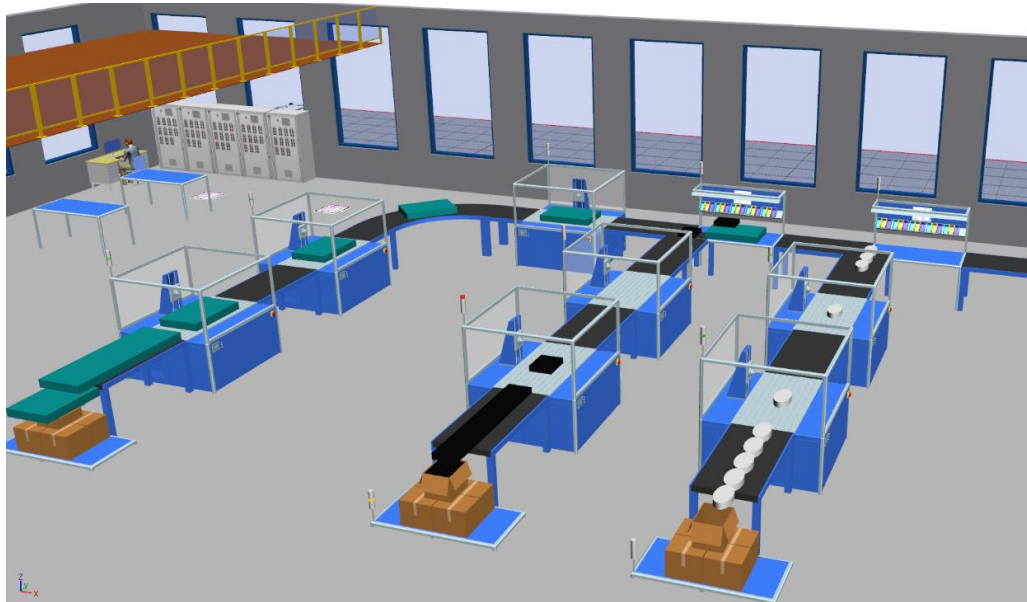
Obr. 7: Simulační model výrobní linky [vlastní]

### 3.4 POPIS MODELU

System, který byl simulován představuje, jak už bylo zmíněno, proces výroby LED světel a je rozdělen do několika okruhů podle potřeb procesů výroby finálního produktu. V diagramu layoutu (*viz. příloha 1*) jsou jednotlivé okruhy popsány a zvýrazněny pro přehlednost modelu a na obrázku (*obr.7*) je vyobrazen počítačový model vytvořen v programu Tecnomatix Plant Simulation.

#### 3.4.1 PŘÍPRAVA KOMPONENT

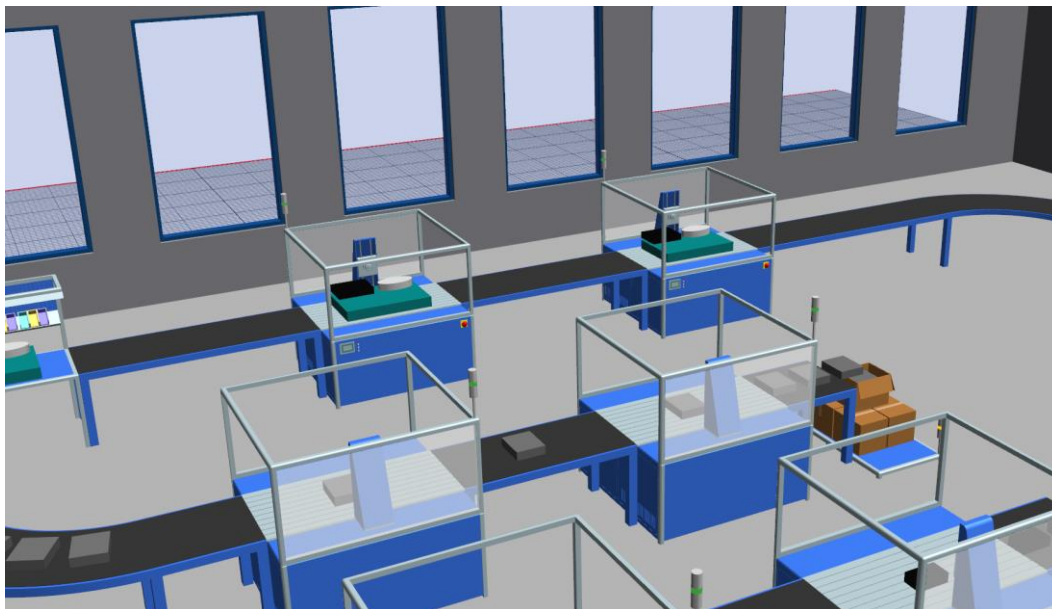
Před procesem montáže prochází jednotlivé komponenty stanicemi pro přípravu jejich následného zasazení na desku plošných spojů. Na obrázku (*obr.8*) můžeme vidět stroje (*Station*) specifikované pro jednotlivé díly. Konkrétní komponenty tak projdou určenými stanicemi a na konci jsou pomocí Assembly station spojeny dohromady a pokračují dál do výroby.



Obr. 8: Stanice pro přípravu komponent [vlastní]

### 3.4.2 PÁJENÍ KOMPONENT

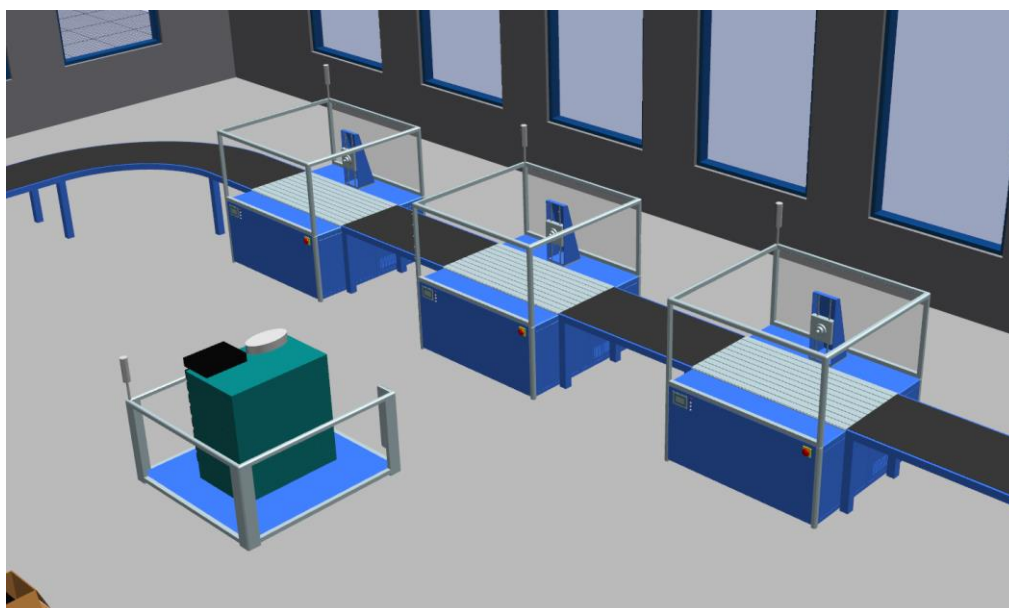
Po osazení desky plošných spojů následuje pájení všech komponent. Pájení je zprostředkováno pomocí stanic (Station), která mají přiřazeny parametry podle reálné Reflow Pece. Ta ve standartní výrobě zajišťuje správné roztavení pájecí pasty a vytvoření pevných a spolehlivých spojů.



Obr. 9: Pájecí stanice [vlastní]

### 3.4.3 INSPEKCE A TESTOVÁNÍ

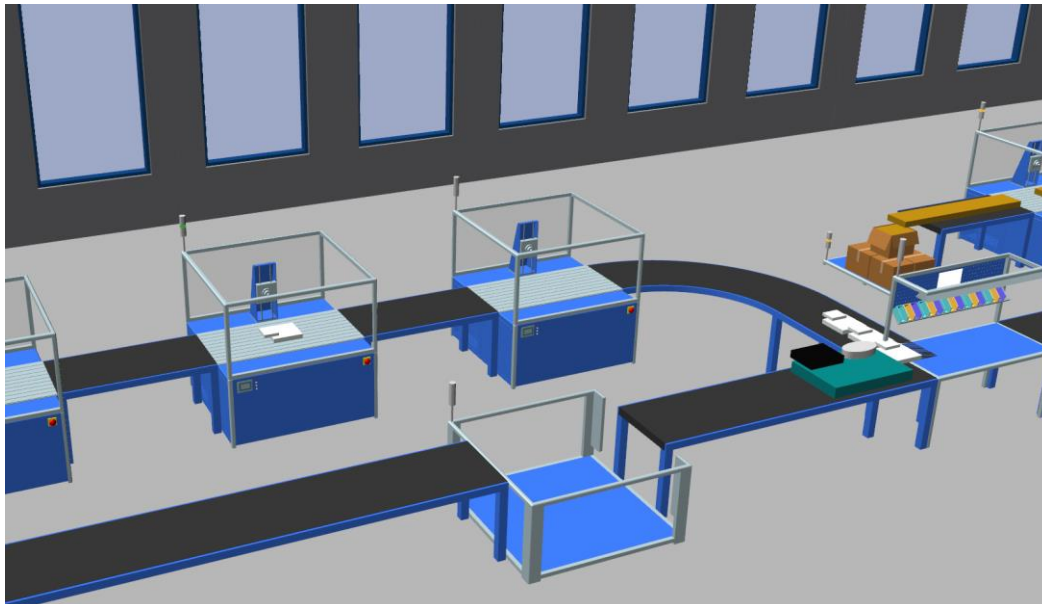
Dalším krokem v celkovém procesu výroby je inspekce a testování funkčnosti LED světla. Již hotová základní deska dorazí k testovacím stanicím. Dochází ke elektrickým testům pro ověření funkčnosti osazených obvodů a pro zjištění možných chyb spojených s pájením. Pokud jedna z testovacích stanic objeví vadu, dochází k přemístění chybného kusu do zásobníku pro něj určeného.



Obr. 10: Testovací stanice [vlastní]

### 3.4.4 ZASAZENÍ DO RÁMU

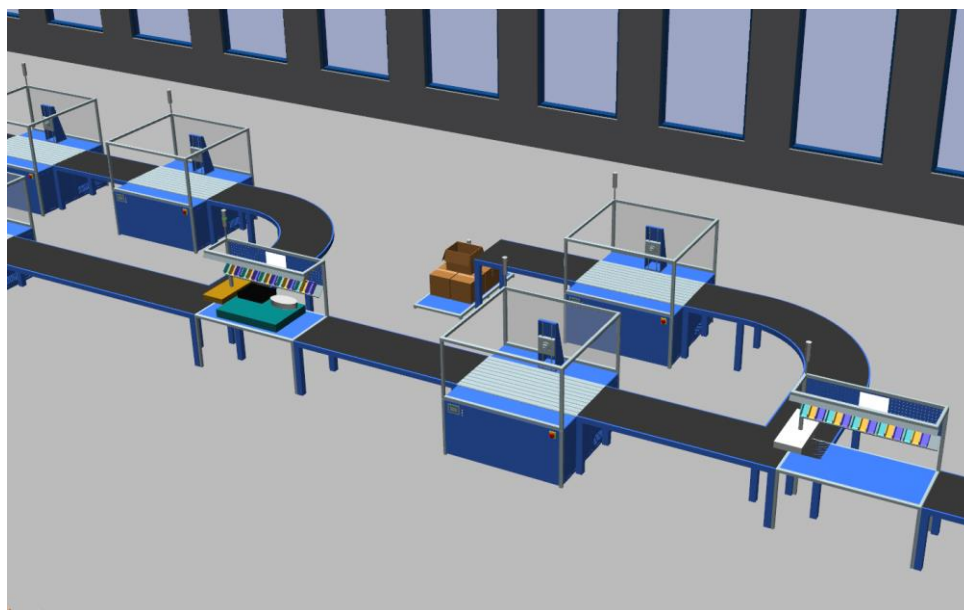
Po otestování a inspekci správného fungování následuje zasazení LED světla do rámu pro něj určeného. Rám je předpřipraven opět pomocí stanic s adekvátními parametry a pomocí Assembly station je do něj zakomponováno světlo. Z Assembly station poté přechází polotovary do stanice, kde dochází k zatěsnění rámu a následně tedy k finální kompletizaci celého produktu.



Obr. 11: Stanice určeny pro kompletizaci produktu [vlastní]

### 3.4.5 BALENÍ A EXPEDICE

Jako konečná část výroby je balení produktu do předsestavené krabice a její následné označení etiketou vytisknou na stanici. Toto je poslední krok výroby LED světla a zakončení celého procesu. Finální výrobek pak cestuje na expedici a následně k odběrateli.



Obr. 12: Stanice určeny pro balení a expedici [vlastní]

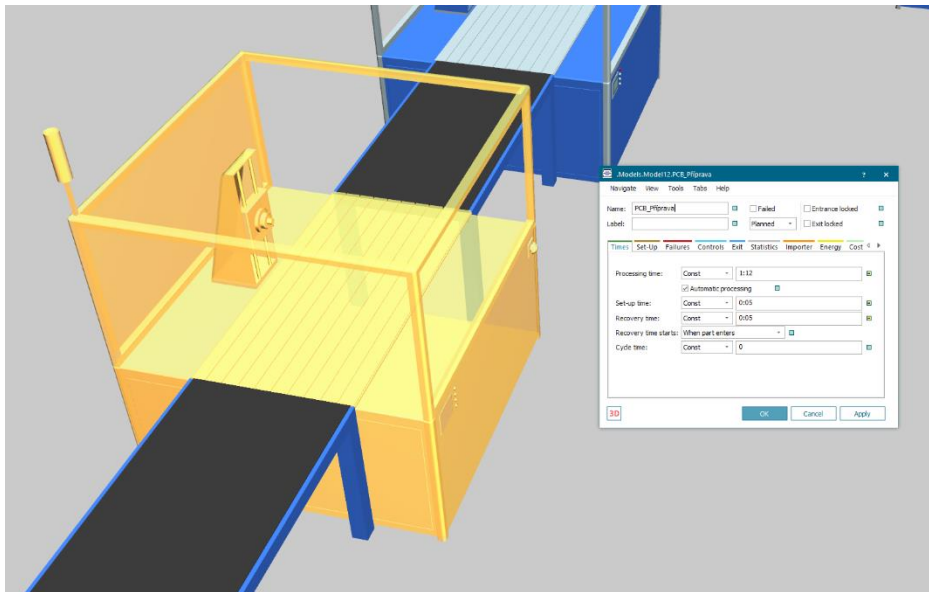


### 3.5 PARAMETRY A OPTIMALIZACE LINKY

Před implementací informačního toku a následné simulace a analýzy bylo potřeba nastavit parametry výrobních strojů a optimalizovat výrobní linku.

#### 3.5.1 ZADÁNÍ PARAMETRŮ VÝROBNÍCH STROJŮ

Pro získání relevantních výsledků simulace byl model vytvořen tak, aby co nejvíce odpovídal reálné výrobě. Byly zadány všechny potřebné časové údaje jako čas potřebný ke zpracování polotovaru a čas na přípravu stroje. Pro jednotlivé stanice tak byly nastaveny základní provozní parametry.



Obr. 13: Nastavení parametrů [vlastní]

Podobně jako časové údaje byly nastaveny parametry pro poruchovost strojů. Jednotlivým stanicím byla globálně nastavena poruchovost. Toho bylo v programu Plant Simulation dosaženo pomocí jeho řídicí struktury Method a s ní spárované tabulky „DataTable“.

```

var tab := poruchovost

var poruchovost_per: integer

for var i := 1 to tab.ydim
    poruchovost_per:=100-tab[poruchovost_typ+1,i]
if i/=4
    tab[1,i].Failures.Failure.Availability:=poruchovost_per
else
    tab[1,i].Failures.Failure1.Availability:=poruchovost_per
end
next

```

Obr. 14: Nastavení parametrů [vlastní]

Tabulka (Tab. 1) je určena pro nastavení poruchovosti strojů. V prvním sloupci nalevo jsou vypsané jednotlivé stanice. Ve zbylých sloupcích na pravé straně jsou vypsané procenta poruchovosti. Sloupce pro určení poruchovosti jsou tři, z důvodu různých variant produktů, tyto různé hodnoty pak vstupovaly do matice experimentů, kdy byl předem zvolen produkt a strojům byla automaticky načtena poruchovost určená pro danou variantu výrobku.

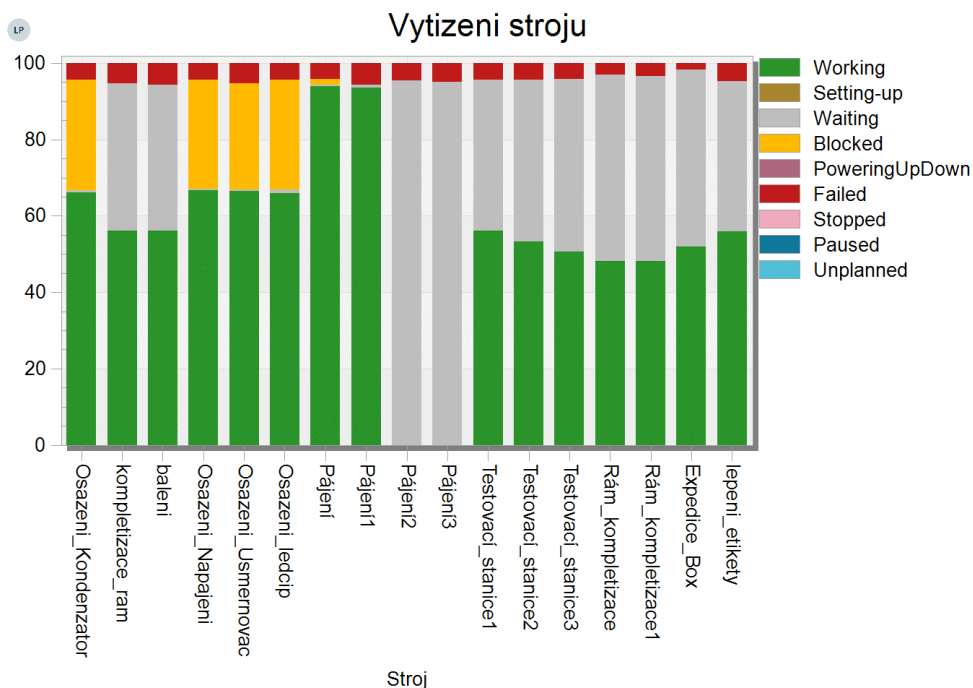
Tab. 1: Poruchovost strojů [vlastní]

	Procento poruchovosti 1	Procento poruchovosti 2	Procento poruchovosti 3
.MaterialFlow.AssemblyStation	5	7	9
.UserObjects.PCB_Příprava	3	5	7
.UserObjects.Usměrňovač_Příprava	6	8	10
.UserObjects.Zdroj_napájení_Příprava	6	8	10
.UserObjects.Pájení	5	7	9
.UserObjects.Testovací_stanice	5	7	9
.UserObjects.Rám_Příprava	8	10	12
.UserObjects.Rám_kompletizace	4	6	8
.UserObjects.Sestavni_Boxu	3	5	7
.UserObjects.Etikety	1	3	5
.UserObjects.Expedice_Box	2	2	4

### 3.5.2 OPTIMALIZACE LINKY

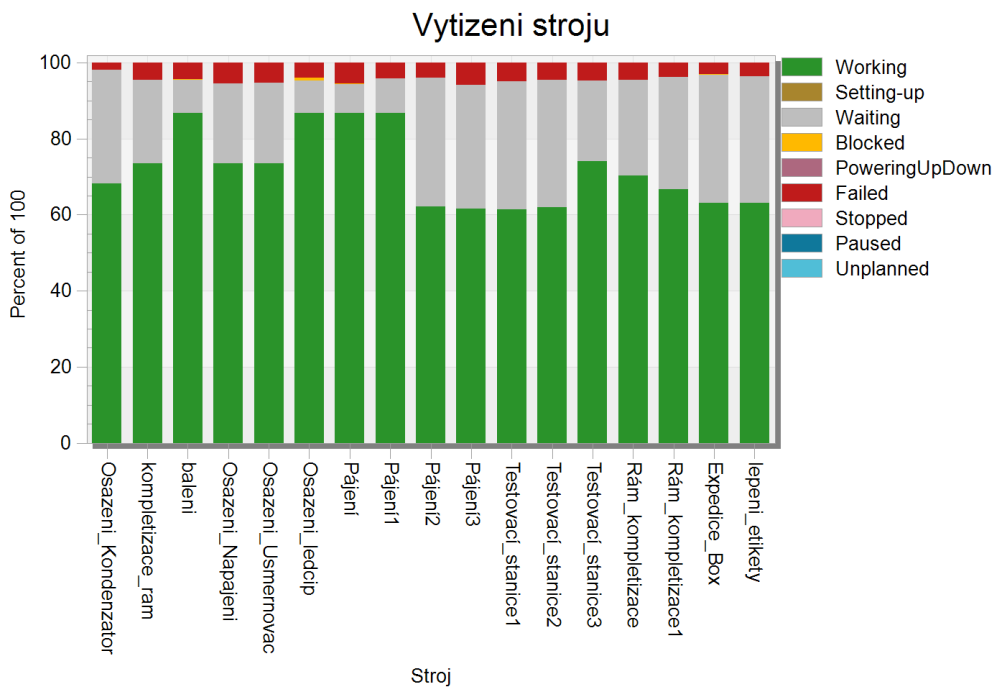
Pro správnou optimalizaci výrobní linky bylo nutno provést především analýzu všech kroků ve výrobním procesu od začátku až dokonce. Hlavním významem je možná identifikace úzkých míst, nadbytečných kroků a potenciálních oblastí pro zlepšení.

Jako první byla provedena analýza na úzká místa. Té bylo v programu dosaženo pomocí funkce „BottleneckAnalyzer“ a funkce „Chart“ pro zobrazení komplexního grafu vytížení strojů. Po prvním testu byly jako úzké místo identifikovány stanice pro pájení. Můžeme tak vidět na grafu vytížení strojů (viz obr. 15). Stroje pro pájení měly téměř nulový čekací čas a byly neustále vytíženy. Naopak stroje, které jim předcházely byly blokovány a nemohly vyrábět dál. To samé platí pro stroje, které následují po procesu pájení. K těm pro změnu zase polotovary nedocházely a strávily tak velké množství procesu výroby čekáním na výrobky.



Obr. 15: Graf vytížení strojů [vlastní]

Tento problém byl vyřešen přidáním dalších dvou pájecích stanic. Na jednotlivé stroje pak připadlo méně dílů což znamenalo celkové urychlení procesu pájení. Tímto krokem se podařilo téměř odstranit problém s blokáci strojů a na druhém konci linky zase s vysokými čekacími časy. Jde tak vidět také na grafu vytížení strojů po optimalizaci (viz obr. 16).



Obr. 16: Graf vytížení strojů po optimalizaci [vlastní]

## 4 INFORMAČNÍ TOK

Informační tok zavážecí linky se týká především pohybu informací v rámci procesu zavážení materiálu na dané lince. V kontextu mého zadání bude informační tok zavážecí linky zahrnovat veškeré informace, které jsou potřebné pro správné fungování procesu zavážení materiálu.

Informační tok zahrnuje vše od příjmu objednávek, přes plánování výroby, monitorování postupu práce, až po sledování inventáře a expedici hotových produktů. Efektivní správa tohoto toku umožňuje výrobní lince rychle reagovat na změny, minimalizovat zásoby a zvyšovat produktivitu.

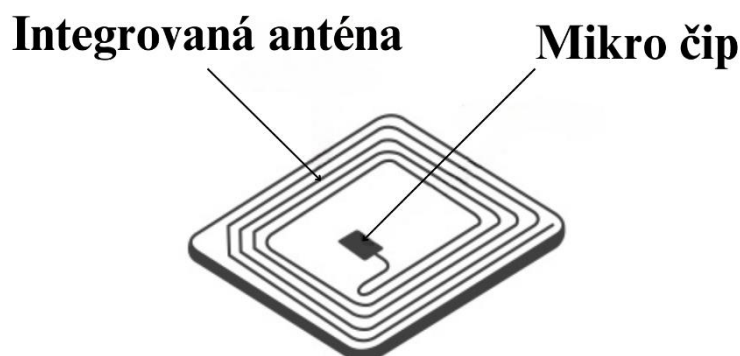
Použití Tecnomatix Plant Simulation umožní nejen simulovat fyzický tok materiálů, ale i modelovat informační tok a jeho vliv na efektivitu výrobního procesu. Simulace nám umožní vizualizovat možná úzká místa v toku informací, identifikovat příležitosti pro zlepšení a kvantifikovat dopad těchto zlepšení na celkovou efektivitu výroby. Analýza simulovaných dat poskytne cenné statistiky, které podpoří doporučení pro optimalizaci informačního toku.

Cílem této kapitoly bude poskytnout detailní popis informačních toků ve výrobním prostředí simulovaném v programu Plant Simulation. Každý segment bude prozkoumán z hlediska jeho technické realizace a dopadu na výrobní procesy.

### 4.1 SLEDOVÁNÍ MATERIÁLŮ A KOMPONENT S VYUŽITÍM RFID

Sledování materiálů s pomocí RFID tagů (Radio Frequency Identification) v průmyslové výrobě a logistice přináší mnoho výhod. Pomocí sledování RFID čipu dokážeme přesně monitorovat, kde se nachází jednotlivé komponenty na výrobní lince. To následně umožňuje lepší správu a sledování zásob a minimalizaci chyb v logistice [1]. Podobného výsledku by bylo možno dosáhnout i s využitím čárových kódů, v tomto případě by však musely jednotlivé komponenty přijít do vizuálního kontaktu s čtečkou těchto kódů. V případě RFID tagu dochází k přenosu informací bezkontaktně.

Příkladem využití automatické identifikace pomocí RFID může být automobilový průmysl. Při výrobě a konstrukci automobilů jsou jednotlivé díly opatřeny RFID tagem za účelem sledování komponent od přijetí do výroby až po montážní linku. Každý díl je tak sledován v reálném čase napříč všemi fázemi montážního procesu. Implementace této technologie nám umožňuje výrazné snížení času a nákladů na inventuru, zrychlit procesy naskladnění a vyskladnění a je schopna prakticky okamžité identifikace nedostatků nebo přebytků zásob.



Obr. 17: RFID Tag [vlastní]

#### 4.1.1 IMPLEMENTACE DO MODELU

V programu Plant Simulation je možnost vytvořit objekty, které představují komponenty s přidělenými atributy pro RFID. Na kontrolních bodech rozmístěných po výrobní lince se pak implementují senzory, které jsou schopny tyto tagy číst, aby aktualizovaly stav toku materiálu nebo spustily specifické akce (např. přesun komponenty na další pracovní stanici).

V modelu bylo této technologie využito pro zlepšení sledovatelnosti výrobního procesu. Na začátku montážní linky dochází k přípravě desky plošných spojů na následné osazování komponent. Do výroby tato deska přichází již opatřena unikátním RFID tagem, který nám umožní sledovat celou cestu napříč procesem výroby. Na vstupu jednotlivých stanic se nachází čtečka RFID tagů, která po bezkontaktním naskenování tagu okamžitě odesílá a zapisuje informace o času průchodu stanicí a lokaci produktu.

Automatického zápisu informací o dané součásti a jejího RFID tagu v programu bylo dosaženo pomocí funkce Method (viz Obr 18). Ta byla spárována s tabulkou určenou na zápis těchto dat a naprogramována pro zapisování názvu produktu, čísla tagu, názvu stanice a času, ve kterém součást prošla danou stanicí (viz Tab 2.).

```
tab := mon_vyroby --def. promenne tabulky

1,tab.ydim+1]:= @.name -- zapis nazvu produktu
2,tab.ydim]:= @.rfid_tag -- zapis tagu
3,tab.ydim]:=?.name -- zapis nazvu stanice
4,tab.ydim]:=eventController.abssimTime -- zapis datumu a casu vstupu do stanice
```

Obr. 18: Zápis informací do tabulky [vlastní]

Tab. 2: Tabulka s informacemi [vlastní]

	string 1	string 2	string 3	datetime 4
string	PCB0 nazev	RFID tag	Nazev Stanice	Datum a cas
1	PCB0_1	0001	Osazeni_Napajeni	02.01.2023 06:04:02.1416
2	PCB0_1	0001	Osazeni_Usmernovac	02.01.2023 06:04:37.0000
3	PCB0_1	0001	Osazeni_Kondenzator	02.01.2023 06:05:05.1190
4	PCB0_1	0001	Osazeni_Iedcip	02.01.2023 06:05:17.1190
5	PCB0_2	0002	Osazeni_Napajeni	02.01.2023 06:05:22.1416
6	PCB0_1	0001	Pájení	02.01.2023 06:05:30.1190
7	PCB0_2	0002	Osazeni_Usmernovac	02.01.2023 06:06:05.0000
8	PCB0_2	0002	Osazeni_Kondenzator	02.01.2023 06:06:19.0000
9	PCB0_2	0002	Osazeni_Iedcip	02.01.2023 06:06:31.0000
10	PCB0_3	0003	Osazeni_Napajeni	02.01.2023 06:06:42.1416
11	PCB0_2	0002	Pájení2	02.01.2023 06:06:44.0000
12	PCB0_1	0001	Pájení1	02.01.2023 06:07:43.1190
13	PCB0_3	0003	Osazeni_Usmernovac	02.01.2023 06:07:46.6235
14	PCB0_4	0004	Osazeni_Napajeni	02.01.2023 06:08:02.1416
15	PCB0_3	0003	Osazeni_Kondenzator	02.01.2023 06:08:07.5767

## 4.2 MONITOROVÁNÍ STAVU STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Sledování všech strojů a zařízení je velmi důležité v moderním průmyslovém inženýrství a údržbě. Tato složka, někdy nazývána také jako prediktivní údržba nebo sledování stavu zahrnuje kontinuální anebo periodické monitorování jednotlivých zařízení během jejich obvyklého provozu. Je tomu tak, aby bylo možno včas detekovat příznaky selhání a provádět údržbu před vznikem vážnějších problémů. Následně lze maximalizovat využití zařízení za pomoci sledování a analýzy provozních dat. Je tak získán přehled o využití strojů, a je možné dále optimalizovat jejich zatížení a zvětšit celkovou efektivitu montážní linky.

V reálné výrobě může být použito sensorových technologií pro monitorování stavu zařízení. Příkladem může být používání senzorů teploty, vibrací a akustických emisí na důležitých součástech stroje. Tyto senzory pak jsou schopny poskytnout data určená pro analýzu a předpovídání potenciálních selhání v reálném čase. V důsledku toho lze plánovat údržbu mnohem efektivněji a bez zbytečných výpadků výroby [2].

Využití lze najít také v transportních procesech, kdy se mohou podobné procesy aplikovat na sledování stavu vozidel a zařízení. Monitorují se většinou telemetrická data a GPS, což umožňuje logistickým společnostem udržovat vozidla provozuschopná a optimalizovat trasy [3].



Obr. 19: Snímač monitorování stavu stroje [13]

Na obrázku (Obr. 19) je pro ukázkou zobrazen snímač monitorování stavu od společnosti Balluff. Dokáže detekovat různé fyzikální veličiny, jako je vibrace, kontaktní teplota, okolní tlak nebo například relativní vlhkost. Tyto data následně zpracovává a poskytuje hostitelskému systému.

### 4.2.1 IMPLEMENTACE DO MODELU

Každý stroj nebo zařízení v modelu má definované atributy, které zaznamenávají jeho stav (např. zda je v provozu, má technický problém atd.). Tyto atributy jsou aktualizovány pomocí SimTalk skriptů, které mohou zahrnovat logiku pro automatické zastavení stroje v případě detekce chyby nebo jiných specifických podmínek.

### 4.3 KVALITA A TESTOVACÍ VÝSLEDKY

Automatizované testování a záznam výsledků umožňuje kontinuálně monitorovat a zajišťovat kvalitu výrobků na výrobní lince. V případě detekce defektů nebo nekvalitních výrobků pak lze rychle reagovat, což minimalizuje množství vadných produktů a zlepšuje celkovou spolehlivost výrobního procesu.

#### 4.3.1 IMPLEMENTACE DO MODELU

V momentě, kdy je deska plošných spojů osazena všemi součástmi, a ty jsou na desku napájeny, přechází výrobek do automatizovaných testovacích stanic. Ty jsou opět pomocí funkce Method naprogramovány tak, aby v momentě, kdy detekují vadný kus, odeslaly všechny jemu příslušné informace do tabulky (viz Obr. 20). Ta tak zaznamenává informace o všech vadných součástech. Opět je zde využito RFID tagu pro spolehlivé rozeznání a určení poškozených kusů. V tabulce pak můžeme vyčíst název součásti, číslo tagu, a čas, ve který byla součástka identifikována jako nevyhovující. (viz Tab. 3)

```
var tab := seznam_NOK --def. promenne tabulky

tab[1,tab.ydim+1]:= @.name -- zapis nazvu produktu
tab[2,tab.ydim]:= @.rfid_tag -- zapis tagu
tab[3,tab.ydim]:=eventController.abssimTime -- zapis datumu a casu vstupu do stani
```

Obr. 20: Method pro odeslání informací o vadném kusu [vlastní]

Tab. 3: Zápis vadných kusů [vlastní]

	string 1	string 2	datetime 3
string	PCB0 nazev	RFID tag	Datum a cas
1	PCB0_11	00011	02.01.2023 06:27:18.0031
2	PCB0_12	00012	02.01.2023 06:31:22.3103
3	PCB0_13	00013	02.01.2023 06:32:47.4638
4	PCB0_31	00031	02.01.2023 07:02:07.0044
5	PCB0_33	00033	02.01.2023 07:05:33.5539
6	PCB0_35	00035	02.01.2023 07:09:18.1093
7	PCB0_51	00051	02.01.2023 07:33:28.1416
8	PCB0_54	00054	02.01.2023 07:41:37.2743
9	PCB0_57	00057	02.01.2023 07:45:59.2743
10	PCB0_71	00071	02.01.2023 08:11:18.9909
11	PCB0_75	00075	02.01.2023 08:16:32.1046
12	PCB0_79	00079	02.01.2023 08:23:56.8983

## 4.4 KOMUNIKACE MEZI PRACOVNÍMI STANICEMI

Komunikace mezi pracovními stanicemi je důležitý prvek, co se týče efektivní koordinace a automatizace výroby. Tento aspekt je zcela zásadní pro minimalizaci času cyklů a zvýšení produktivity. Díky komunikaci mezi stanicemi jsme schopni snadněji identifikovat úzká místa a příležitosti pro zlepšení výrobních linek, což zahrnuje především synchronizaci operací a minimalizaci čekacích dob [4].

Příkladem využití takové komunikace může být opět automobilový průmysl, kdy po montáži dílů nebo celých vozidel jsou tyto produkty odesílány do testovacích stanic. Tam jsou dále prováděny různé kontroly, včetně funkčních testů, bezpečnostních kontrol a kontrol kvality. Tyto stanice jsou vybaveny komplexními diagnostickými nástroji, které mohou identifikovat problémy. Pokud se tak stane tak jsou výsledky testů automaticky zaznamenány a odeslány do systému, který okamžitě informuje relevantní montážní stanice, aby podnikly nápravná opatření [1].

### 4.4.1 IMPLEMENTACE DO MODELU

Ve modelu je možnost definovat události, které vyvolávají signály mezi různými objekty. Tyto signály mohou zahrnovat instrukce pro spuštění nebo zastavení strojů, což může simulovat sofistikované informační toky, jaké jsou obvyklé v automatizovaných výrobních systémech.

Pro demonstraci tohoto informačního toku byla pomocí funkce Method (viz obr. 21) naprogramována linka tak, aby zastavila při výrobě posledního kusu. Znatelné procento polotovarů neprojde celým výrobním systémem, protože jsou v průběhu vyhodnoceny jako vadné. Linka, která by měla zadanou výrobu 1000 kusů by tak nikdy nedokázala stoprocentně uspokojit poptávku. V modelu tak tedy dojde k zastavení linky až v momentě, kdy expedicí projde poslední kus z celé dávky. Díky této metodě také nadvyrobíme jen minimální potřebnou zásobu a nedochází k akumulaci velkého množství zboží, které drží kapitál.

```
if drain.numIn=1000
    cas_vystupu:= eventController.simtime
    eventController.stop
    OEE_vypocet
end
```

Obr. 21: Method pro zastavení výroby [vlastní]



## 4.5 SBĚR A ANALÝZA DAT

Sběr dat z operací umožňuje detailní přehled o výkonnosti, produktivitě a možných problémech na výrobní lince. Získáváme tak tady detailní přehled o výrobních metrikách.

Následná analýza sběrných dat poskytuje informace potřebné pro strategické rozhodování a identifikaci oblastí pro zlepšení.

### 4.5.1 IMPLEMENTACE DO MODELU

Data jsou sbírána a ukládána do tabulek v průběhu simulace. Tato data jsou poté analyzována pomocí nástrojů dostupných v Plant Simulation, jako jsou statistiky, grafy a reporty, nebo mohou být exportována pro další zpracování. Ukázkou této problematiky mohou být grafy z kapitoly 3.5.2, optimalizace linky.

## 4.6 SHRUTÍ

Každý z těchto implementovaných informačních toků v simulaci v programu Plant Simulation představuje strategický krok ke zvýšení efektivity, snížení nákladů a zlepšení kvality výrobních procesů. Použitím těchto technologií lze nejen zlepšit operace na výrobní lince, ale také získat hlubší porozumění dynamice a potenciálním úskalím v celém výrobním procesu.

## 5 SIMULAČNÍ EXPERIMENTY

Simulační experimenty jsou nezbytným nástrojem k analýze a optimalizaci všech výrobních systémů. Umožní zkoumat, jak se systém chová pod vlivem různých podmínek. Také umožní identifikovat potenciální problémy a případně hledat jejich efektivní řešení. K tomu pomůže definování matice experimentů. Ta slouží jako nástroj, který nám umožňuje systematické plánování a provádění simulačních experimentů. Můžeme s její pomocí efektivně kombinovat různé úrovně proměnných [1].

### 5.1 MATICE EXPERIMENTŮ

Pro správné sestavení matice experimentů je nutné identifikovat klíčové proměnné (vstupy), které mají největší potenciální dopad na výkonnost systému. Pro každou proměnnou bylo potřeba určit různé hodnoty, které byly testovány. Následně byly vytvořeny různé kombinace proměnných pomocí experiment manageru v programu Plant Simulation.

### 5.2 VSTUPNÍ PARAMETRY

Byly zvoleny celkem tři vstupní parametry, které mohou v reálné výrobě značně ovlivnit proces výroby a výrobní linku jako celek. Do matice experimentů pak vstupovaly proměnné jako různé varianty produktů, procento vadných kusů a poruchovost strojů

#### 5.2.1 VARIACE PRODUKTŮ

Prvním vstupním parametrem je variace produktu. V simulačním modelu byly nastaveny tři různé varianty produktů a ty se od sebe liší v času pájení. Zvoleno tak bylo, protože tento proces zabere v celkové výrobě nejvíce času a byl tak vyhodnocen jako klíčový pro celou výrobu. Tento vstup nám ukáže, jak linku ovlivní časově nejnáročnější proces a jaký bude mít vliv na následující stanice.

#### 5.2.2 PROCENTO VADNÝCH KUSŮ

Jako další vstupní parametr je procento vadných kusů. V reálné výrobě je na procento vadných kusů kladen velký důraz. Velké procento vadných kusů ovlivňuje kvalitu finálních produktů, zvyšuje celkové náklady na výrobu a také znamená větší množství odpadu. Tento vstup tak bude sloužit k demonstraci nezbytnosti zajištění vysoké kvality z důvodů snížení výrobních nákladů, zvýšení efektivní kapacity výrobní linky a udržitelnosti výrobního procesu.

#### 5.2.3 PORUCHOVOST STROJŮ

Třetím a posledním vstupním parametrem byla zvolena poruchovost strojů. Ta přímo ovlivňuje dobu, po kterou jsou stroje schopny fungovat bez výpadku. Vyšší poruchovost znamená častější přerušení provozu, což snižuje celkovou dostupnost a využití zařízení. Naopak její snížení zvyšuje efektivní využití strojů a umožňuje plynulejší výrobu. Díky provedení experimentů s různými procenty poruchovosti strojů dokážeme poukázat na to, jak poruchy omezují kapacitu výrobní linky a snižují produktivitu celého zařízení.

### 5.3 VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Výstupní parametry byly zvoleny na základě použitelnosti a relevance v reálné výrobě. Všechny výstupy jsou důležitými ukazateli efektivity systému a správného fungování výrobní linky. Jako výstupy byla tedy zvolena celková účinnost zařízení, takt linky, počet vyrobených kusů za hodinu a vytížení strojů. Na základě zvolených vstupů, byly pak jako výstupy nastaveny také čas procesu výroby a počet vadných kusů.

#### 5.3.1 CELKOVÁ ÚČINNOST ZAŘÍZENÍ

Celková účinnost zařízení neboli OEE je jedním z hlavních výstupních parametrů. Jedná se o důležitý ukazatel, široce používaný v oblasti průmyslového inženýrství a skládá se ze tří hlavních faktorů – dostupnost, výkon a kvalita.

Dostupnost měří procento času, kdy je zařízení skutečně v provozu ve srovnání s plánovaným provozním časem. Bere v úvahu všechny druhy prostoje, a to včetně plánovaných i neplánovaných zastávek. OEE bylo vypočítáno dle literatury [14].

$$Dostupnost = \frac{Skutečný\ provozní\ čas}{Plánovaný\ provozní\ čas} \quad (1)$$

Výkon měří, jak rychle zařízení pracuje ve srovnání s jeho maximální možnou rychlostí. Tento faktor bere v úvahu ztráty způsobené zpomalením výroby a menšími zastávkami.

$$Výkon = \frac{Skutečný\ výstup}{Maximální\ možný\ výstup} \quad (2)$$

Kvalita měří procento dobrých výrobků, které splňují požadované standardy ve srovnání s celkovým počtem vyrobených kusů.

$$Kvalita = \frac{Počet\ dobrých\ kusů}{Celkový\ počet\ vyrobených\ kusů} \quad (3)$$

Finální hodnota se pak vypočítá jako součin těchto tři faktorů. Konečný vzorec pak vypadá následovně.

$$OEE = Dostupnost \times Výkon \times Kvalita \quad (4)$$

Výsledkem je celková účinnost výrobní linky v procentech, kdy ideální celková účinnost je 100%.

V programu Plant Simulation byl tento výstup implementován opět pomocí řídicí struktury Method.

```

var d,v,q : real
var tab := poruchovost

var poruchovost_prumer: integer
for var i := 1 to tab.ydim
  poruchovost_prumer:=poruchovost_prumer + tab[poruchovost_typ+1,i]
next
poruchovost_prumer:=poruchovost_prumer/tab.ydim

d:= ((eventController.simtime-(eventController.simtime*poruchovost_prumer/100))/eventController.simtime)--*100
v:= ((.UserObjects.Pájení.proctime*1000)/eventController.simtime)--*100
q:=(Drain.numIn/(Drain.numIn+NOK_buffer.numMU))--*100

OEE:=(d*v*q)*100

```

Obr. 22: Výpočet OEE v programu Plant Simulation [vlastní]

### 5.3.2 TAKT LINKY

Dalším výstupem byl zvolen takt linky. Ten udává tempo výroby, tedy čas, který je potřebný k výrobě jednoho kusu produktu. Tento výstup je důležitý pro rovnoměrné rozdělení pracovní zátěže mezi jednotlivé pracovní stanice. Informace o této veličině pomáhají především při strategickém a operativním rozhodování o výrobě a rozvoji výrobní kapacity. Takt linky byl vypočítán dle literatury [15].

$$\text{Takt linky} = \frac{\text{Čas výroby}}{\text{Počet vyrobených kusů}} \quad (5)$$

### 5.3.3 POČET VYROBENÝCH PRODUKTŮ ZA HODINU

Třetím výstupem je ukazatel výkonosti PPH neboli počet vyrobených produktů za hodinu. PPH je jednoduchý ukazatel, který lze snadno vypočítat a sledovat. Dá se použít jako prostředek pro srovnání různých výrobních linek a pomáhá při plánování kapacity a při rozhodování o potřebě zvýšení nebo snížení výrobní kapacity. PPH bylo vypočítáno podle literatury [16].

$$PPH = \frac{\text{Počet vyrobených produktů}}{\text{Počet hodin}} \quad (6)$$

### 5.3.4 VYTIŽENÍ STROJŮ

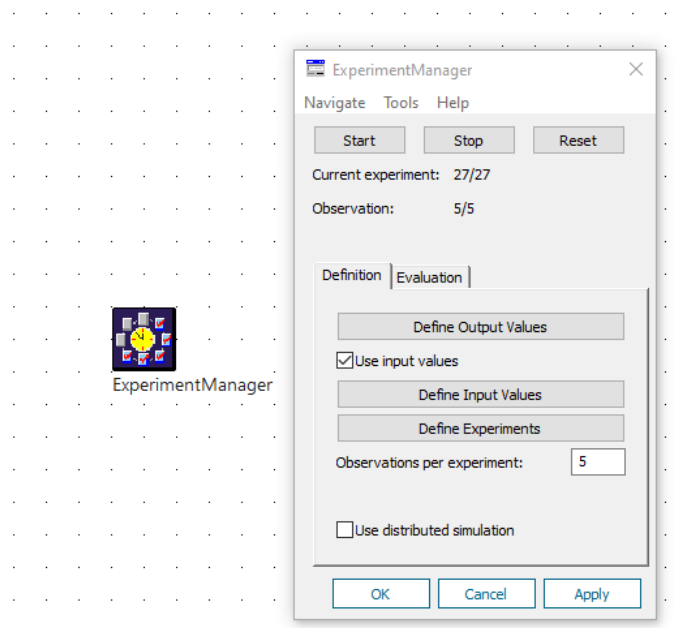
Jako další výstup byl určen ukazatel vytížení strojů. Tento ukazatel poskytuje přehled o tom, jak často a jak intenzivně jsou jednotlivé stroje používány. Zvolen byl z toho důvodu, že pomáhá identifikovat nevyužité nebo nedostatečně využitá stoje. To následně umožňuje lepší plánování pro maximalizaci efektivity. Ukazatel vytížení strojů byl již použit při optimalizaci linky, kdy pomohl k identifikaci úzkých míst a umožnil tak zavést opatření k jejich odstranění.

### 5.3.5 ČAS A POČET VADNÝCH PRODUKTŮ

Poslední dva výstupy byly na základě již definovaných vstupů zvoleny jako čas a počet vadných produktů. Tyto dvě veličiny budou přímo ovlivněny všemi definovanými vstupy, a to procentem vadných kusů, variací produktů a poruchovostí strojů. Je ale důležité je vzít v potaz. Údaj o celkové době výroby je klíčovou informací pro komplexní přehled o procesu výroby. Stejně tak je i u počtu vadných kusů.

## 5.4 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Na základě definování všech vstupních a výstupních parametrů byla sestavena matice experimentů. K simulaci všech možných variant bylo využito nástroje Experiment Manager v programu Plant Simulation. Experiment Manager je nástroj určený pro plánování a analýzu simulačních experimentů. Umožňuje testovat logistické procesy prostřednictvím různých scénářů.



Obr. 23: Experiment manager v programu Plant Simulation [vlastní]

Do nástroje byly nadefinovány všechny vstupy a výstupy stanovené v předchozí kapitole. Ty byly v programu předem nastaveny pomocí řídicích struktur Method a DataTable. Dále nadefinováno pět opakování jednotlivých simulací pro dosažení co nejrelevantnějších hodnot. Po úspěšném nadefinování všech hodnot byla simulace resetována a následně od začátku spuštěn Experiment Manager. Ten provedl potřebný počet experimentů a vygeneroval dokument se všemi hodnotami.

## 6 ANALÝZA VLIVU PARAMETRŮ SIMULAČNÍCH MODELŮ

Po určení všech potřebných parametrů byly pomocí již zmiňovaného Experiment Manageru provedeny příslušné experimenty. Ty se skládaly ze tří hlavních vstupů a šesti výstupů. Celkem tak bylo simulováno 27 variant výroby. Pro dosažení co nejrelevantnějších hodnot byly tyto simulace ještě pětkrát opakovány, takže celkový počet simulací 135. Jednotlivé výsledky jsou tedy průměrem pěti simulovaných hodnot.

Cílem experimentu bylo otestovat, jak se linka bude chovat za různých podmínek. Obecně by v reálné výrobě experiment dokázal odhalit kde v procesu dochází k největším zpožděním nebo omezením. Taky nám umožní dozvědět se, jak dané změny ovlivní výkon linky a následně může sloužit jako vzdělávací nástroj pro zaměstnance, aby lépe pochopili, jak různé faktory ovlivňují výrobní proces.

### 6.1 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Výsledná matice experimentů (viz příloha 2) obsahuje všechny variace simulace a v této kapitole se na ni budu odkazovat.

#### 6.1.1 CELKOVÝ ČAS VÝROBY

Z hodnot v tabulce experimentů lze vyčíst, že procento vadných kusů (`root.procento_NOK`) má opravdu významný vliv na celkový čas výroby (`root.cas_vystupu`). S rostoucím procentem vadných kusů se celkový čas výroby vždy jen zvyšoval. To je způsobeno především tím, že vadné kusy musí být vždy identifikovány a následně vyřazeny, linka pak musí za tyto vadné kusy vyrábět další, což automaticky zvyšuje čas potřebný k dokončení výroby. Pro ukázkou se můžeme podívat na produkt číslo 1 a časy jeho výroby při různých procentech vadných kusů.

Produkt 1:

Při 1 % vadných kusů byl čas výroby přibližně 84,502 sekund.

Při 3 % vadných kusů se čas zvýšil na 89,385 sekund.

Při 5 % vadných kusů dosáhl čas až 95,071 sekund.

Takový trend naznačuje lineární nárůst času výroby při vyšším procentu vadných kusů. Tento efekt se dále projevuje napříč všemi typy produktů.

Celkový čas výroby byl také do značné míry ovlivněn poruchovostí strojů. Tento efekt nebyl tak výrazný jako vliv procenta vadných kusů ale stále patrný. U produktu 1, kdy byl počet vadných kusů (`root.procento_NOK`) nastaven na 3 %, zůstával čas konstantní pro všechny typy poruchovosti. To naznačuje, že při nízkém procentu vadných kusů typ poruchovosti nemá výrazný vliv na čas výroby. Při vyšším procentu vadných kusů je však vliv poruchovosti patrnější.

### 6.1.2 CELKOVÁ EFEKTIVITA ZAŘÍZENÍ (OEE)

Celková efektivita zařízení (root.oee) je měřena v procentech. Pokud by procento OEE dosáhlo 100 %, v praxi by to znamenalo perfektní výrobu. To znamená, že každý z faktorů zasahujících do výpočtu OEE by dosáhl svého maxima a výroba by tak byla kompletně bez zmetků, rychlost výroby by byla co nejrychlejší a probíhala by bez přerušení.

Cílem pro mnohé společnosti je dostat se na hodnotu 85 %, avšak typická úroveň je okolo 60 % OEE [14]. Z experimentu vidíme, že se OEE snižuje především s rostoucím procentem vadných kusů. Vyšší procento vadných kusů totiž znamená více ztraceného času a zdrojů, to pak automaticky vede ke snížení celkové efektivity. Pro příklad můžeme uvést produkt číslo 2.

Produkt 2:

Při 1 % vadných kusů byla OEE 73 %.

Při 3 % vadných kusů klesla na 71 %.

Při 5 % vadných kusů dále klesla na 69.8 %.

Můžeme tedy říci, že snižování procenta OEE je přímým důsledkem vysokého procenta vadných kusů. To je zapříčiněno tím, že je pak více času věnováno řešení problému spojených s vadným kusy, a to přímo snižuje efektivitu zařízení.

Charakteristika OEE se také mírně snižuje s rostoucí poruchovostí strojů. Vyšší poruchovost vede k častějším výpadkům a opravám, což opět snižuje celkovou efektivitu. Vidět tak lze produktu číslo 2 s třemi procenty vadných kusů, kdy OEE klesá ze 73 % na 71 % s rostoucím typem poruchovosti.

### 6.1.3 TAKT LINKY

Takt linky (root.takt), což je čas potřebný k výrobě jednoho kusu produktu, se opět prodlužuje s rostoucím procentem vadných kusů. Tento nárůst je způsoben tím, že výroba musí zahrnovat dodatečné operace spojené s vadnými kusy. Vidět tak můžeme například u produktu číslo 3.

Produkt 3:

Při 1 % vadných kusů byl takt linky přibližně 104,370 sekund.

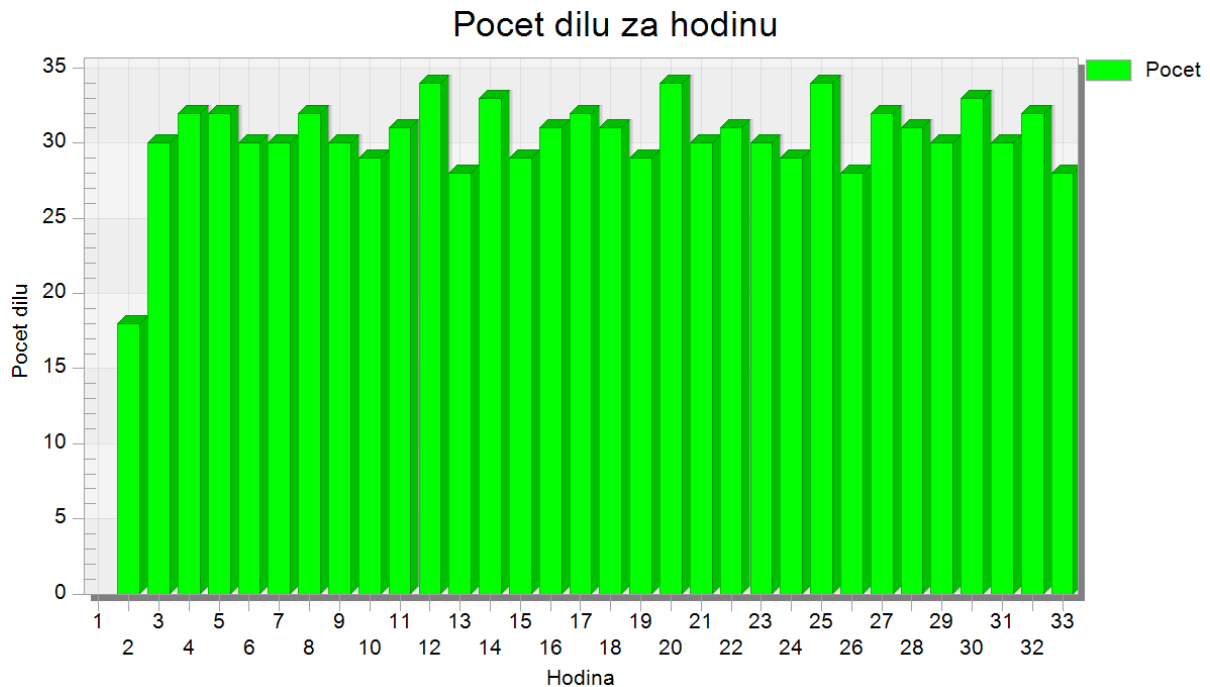
Při 3 % vadných kusů se zvýšil na 111,034 sekund.

Při 5 % vadných kusů dosáhl až 118,059 sekund.

Takt linky se mění se také s různými typy poruchovostí, ale to jen minimálně. Například u produktu 2 při nastavených třech procentech vadných kusů zůstává takt linky konstantní pro všechny typy poruchovosti. Tento jev naznačuje, že hlavním faktorem ovlivňujícím takt linky je procento vadných kusů, zatímco typ poruchovosti má menší vliv.

#### 6.1.4 POČET PRODUKTŮ VYROBENÝCH ZA HODINU

Produkce za hodinu (root.pph) je ukazatelem výkonnosti výrobní linky. Hodnoty tohoto ukazatele vyšly konzistentní napříč různými experimenty, jak jde vidět v grafu (viz obr.24).



Obr. 24: Graf pro charakteristiku PPH [vlastní]

U produktu 1 byla produkce za hodinu konstantní, 30,3 kusů za hodinu. Stejně tak bylo i u produktu 2 a u produktu 3 byla produkce za hodinu mírně nižší a to 29,6 kusů za hodinu. Vzhledem k tomu že hodnoty PPH zůstávají relativně stabilní napříč různými experimenty, můžeme říct, že výrobní linka udržuje stabilní úroveň produkce navzdory změnám v procentech vadných kusů a typů poruchovosti.



## 6.2 VYHODNOCENÍ

Byla provedena komplexní analýza materiálového toku v zavážecím systému pomocí simulačního programu Plant Simulation. Bylo provedeno 27 experimentů s různými kombinacemi vstupních parametrů, včetně typu produktu, poruchovosti strojů a procenta vadných kusů. Na základě těchto experimentů byly analyzovány klíčové výstupní parametry.

Z analýzy výsledků je zřejmé, že čas výstupu je výrazně ovlivněn procentem vadných kusů a poruchovostí strojů. Vyšší úroveň těchto parametrů způsobuje zpoždění ve výrobním procesu, což prodlužuje celkový čas potřebný k dokončení výroby. Tento trend je patrný napříč všemi testovanými produkty a úrovněmi poruchovosti. Optimalizace výrobního procesu by měla zahrnovat opatření ke snížení vadných kusů a zvýšení spolehlivosti strojů.

OEE je kritickým ukazatelem efektivity výrobního procesu. Výsledky ukazují, že zvýšení procenta vadných kusů a poruchovosti strojů vede ke snížení OEE. Tento pokles efektivity je způsoben zvýšenou potřebou oprav, údržby a zpracování vadných kusů, což ovlivňuje dostupnost, výkon a kvalitu výrobního procesu. Efektivní strategie údržby a řízení kvality jsou klíčové pro udržení vysoké úrovně OEE.

Takt linky je citlivý na změny v procentech vadných kusů a poruchovosti strojů. Delší takt linky znamená, že výroba jednoho kusu trvá déle, což snižuje celkovou produktivitu výrobní linky. Efektivní plánování a řízení výrobních operací jsou nezbytné pro udržení optimálního taktu linky. Implementace opatření ke snížení vadných kusů a zvýšení spolehlivosti strojů může pomoci udržet optimální takt linky a zvýšit celkovou efektivitu výrobního procesu.

Produkce za hodinu klesá s rostoucím procentem vadných kusů a poruchovostí strojů. Tento pokles produktivity naznačuje, že vyšší úroveň těchto parametrů snižuje schopnost výrobní linky dosahovat vysoké úrovně výstupu. Optimalizace výrobního procesu by měla zahrnovat opatření ke snížení vadných kusů a zvýšení spolehlivosti strojů, aby se zvýšila celková produktivita.

Výsledky tohoto experimentu poskytují přehled o vlivu klíčových vstupních parametrů na výstupní parametry výrobního procesu. Optimalizace výrobního procesu vyžaduje pečlivé řízení procenta vadných kusů a poruchovosti strojů, protože tyto faktory mají významný dopad na čas výstupu, OEE, produkci za hodinu a takt linky. Implementace strategií prevence poruch a zajištění kvality je klíčová pro dosažení optimální efektivity a produktivity výrobního procesu. Výsledky experimentů poskytly cenné informace pro rozhodování o optimalizaci veškerých výrobních operací a plánování budoucích zlepšení. Efektivní řízení těchto parametrů pak může vést k výraznému zlepšení celkové výkonnosti a konkurenceschopnosti výrobního systému.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zaměřila na komplexní analýzu materiálového toku v zavážecím systému pomocí počítačové simulace, s využitím programu Tecnomatix Plant Simulation od firmy Siemens. Bylo dosaženo všech stanovených cílů, které zahrnovaly literární rešerši počítačových simulací materiálového toku, návrh koncepce layoutu zavážecí linky a vytvoření počítačového modelu layoutu, vypracování detailního popisu informačních toků zavážecí linky včetně implementace navržených systémů do počítačového modelu, provedení simulačních experimentů dle navržené matice experimentů a analýzu vlivu parametrů simulačních modelů na vybrané charakteristiky materiálového toku.

Byla provedena literární rešerše, která pokryla teoretické základy počítačové simulace, její aplikace v průmyslu a konkrétní případové studie. Rešerše poskytla vhled do současných možností a výzev spojených s modelováním a simulací materiálového toku ve výrobních procesech. Na základě navrženého layoutu byl vytvořen detailní počítačový simulační model zavážecí linky v programu Tecnomatix Plant Simulation, který zahrnoval všechny klíčové procesy, stanice a dopravníky, a umožnil simulaci a analýzu materiálového toku. Byl vypracován detailní popis informačních toků, který zahrnoval sledování materiálů a komponent pomocí RFID, monitorování stavu strojů, automatizované testování kvality a komunikaci mezi pracovními stanicemi. Tyto informační toky byly implementovány do simulačního modelu a umožnily komplexní analýzu jejich vlivu na efektivitu výrobního procesu.

Byla sestavena matice experimentů, která zahrnovala různé kombinace vstupních parametrů, jako jsou typ produktu, poruchovost strojů a procento vadných kusů. Celkem bylo provedeno 27 experimentů, z nichž každý byl opakován pětkrát pro zajištění statistické spolehlivosti výsledků. Byla provedena detailní analýza výsledků simulačních experimentů a bylo zjištěno, že klíčové výstupní parametry, jako je čas výstupu, celková efektivita zařízení (OEE), čas výroby, produkce za hodinu (PPH) a takt linky, jsou významně ovlivněny procentem vadných kusů a poruchovostí strojů.

Tato práce splnila všechny stanovené cíle a také přinesla cenné poznatky pro optimalizaci výrobních procesů pomocí počítačové simulace.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BANGSOW, Steffen. Tecnomatix Plant Simulation. 2nd ed. New Your: Springer, 2020, ISBN 978-3-030-41543-3.
- [2] PINKER, Alexander a Marco Prügelmeier. Innovationen in der Logisitk. 1. Auflage, Huss-Verlag, 2021,ISBN 978-3-948001-75-9.
- [3] NOCHE, Bernd a Mathias BÖS. Simulation der Transportverkehre. MAYER, Gottfried, Carsten PÖGE, Sven SPIECKERMANN a Sigrid WENZEL, ed. Ablaufsimulation in der Automobilindustrie [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, 2020-03-14, s. 155-171 [cit. 2020-10-06]. ISBN 978-3-662-59387-5.
- [4] WENZEL, Sigrid a Matthias WEIß. Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg, 2008. ISBN 978-354-0352-761.
- [5] ZEIGLER, Bernard P. Theory of modelling and simulation. New York: Wiley, c1976, xxii, 435 p. ISBN 04-719-8152-4.
- [6] KELTON, W. David, Nancy B. ZUPICK, Nate IVEY a Randall P. SADOWSKI. *Simulation with arena*. Seventh edition. Dubuque: McGraw Hill, 2023. ISBN 0073401315.
- [7] ROBINSON, Stewart. *Simulation: the practice of model development and use*. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ: John Wiley, c2004. ISBN 0470847727.
- [8] FLEXSIM SOFTWARE PRODUCTS, INC. FlexSim®. *FlexSim* [online]. 1993 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.flexsim.com/#clients>
- [9] THE ANYLOGIC COMPANY. AnyLogic. THE ANYLOGIC COMPANY. *AnyLogic* [online]. b.r. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.anylogic.com>
- [10] ROCKWELL AUTOMATION. Arena Simulation Software. *Arena Simulation Software* [online]. b.r. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>
- [11] SIMUL8 CORPORATION. Simul8. *Simul8* [online]. b.r. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.simul8.com>
- [12] SIEMENS. Tecnomatix. SIEMENS. *Plant Simulation* [online]. b.r. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/products/plant-simulation-software/>

- [13] Jeden senzor - mnoho možností. *Balluf* [online]. 2023, 2024(1), 1 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.balluff.com/cs-cz/monitorovani-stavu-stroje/jeden-senzor-mnoho-moznosti>
- [14] OEE - Celková efektivita zařízení. *Daily Automation* [online]. 2023, 2024(3), 1 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.dailyautomation.sk/oee-celkova-efektivnost-zariadenia>
- [15] Jaká je vaše výrobní kapacita? *Průmyslové Inženýrství* [online]. 2019 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.prumysloveinzenyrstvi.cz/2019/04/24/jaka-je-vase-vyrobni-kapacita>
- [16] Calculator Academy. *Calculator Academy* [online]. 2023 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://calculator.academy/units-per-hour-calculator/>

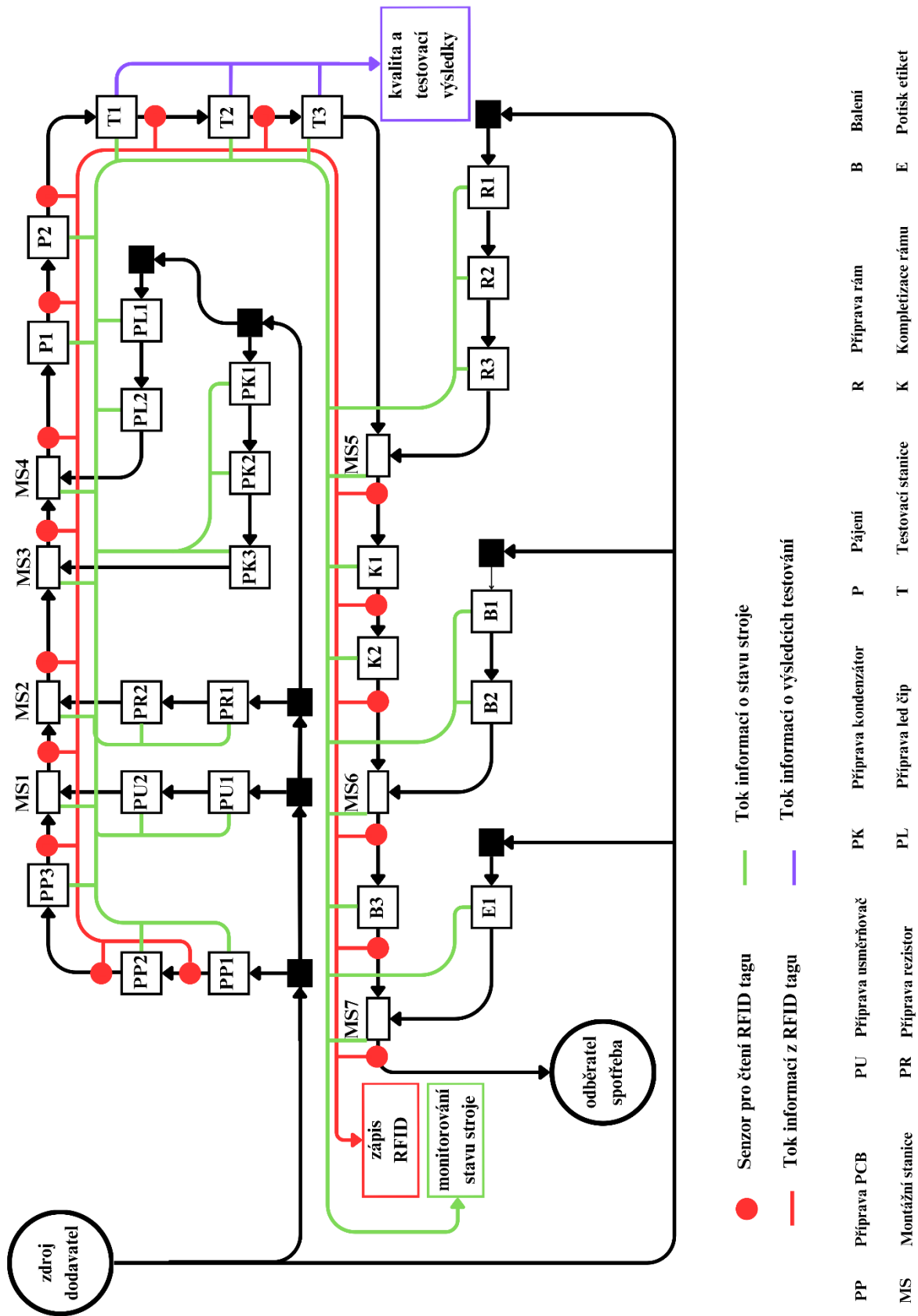
## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PCB	Deska plošných spojů
MU	Mobile Unit
RFID	Radio Frequency Identification
PPH	Products Per Hour
OEE	Overall Equipment Effectivness

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Diagram layoutu
Příloha 2	Matice experimentů

P 1 – Diagram layoutu [zdroj: vlastní]



## P 2 – Matice experimentů [zdroj: vlastní]

Experiment	root.produkt	root.Poruchovost_typ	root.procento_NOK	root.cas_vystupu	root.oe	root.NOK_buffer.numMU	root.pph	root.takt
Exp 01	1	1	1	84501.6282396112	65	35.2	30.303	84.501
Exp 02	1	1	3	89384.9829555614	65	99	30.303	89.384
Exp 03	1	1	5	95070.5321617726	65	168	30.303	95.071
Exp 04	1	2	1	84501.6282396112	64	35.2	30.303	84.501
Exp 05	1	2	3	89384.9829555614	63.2	99	30.303	89.384
Exp 06	1	2	5	95070.5321617726	63	168	30.303	95.070
Exp 07	1	3	1	84501.6282396112	62	35.2	30.303	84.501
Exp 08	1	3	3	89384.9829555614	62	99	30.303	89.384
Exp 09	1	3	5	95070.5321617726	62	168	30.303	95.071
Exp 10	2	1	1	94324.0680648036	73	35	30.303	94.324
Exp 11	2	1	3	100178.180900346	73	99	30.303	100.178
Exp 12	2	1	5	106478.787725658	72.4	168	30.303	106.478
Exp 13	2	2	1	94320.4547113833	71	35	30.303	94.321
Exp 14	2	2	3	100178.180900346	71	99	30.303	100.178
Exp 15	2	2	5	106478.787725658	71	168	30.303	106.478
Exp 16	2	3	1	94320.4547113833	70	35	30.303	94.320
Exp 17	2	3	3	100178.180900346	69.8	99	30.303	100.178
Exp 18	2	3	5	106478.787725658	69.4	168	30.303	106.478
Exp 19	3	1	1	104370.184257635	80.8	35	30.303	104.372
Exp 20	3	1	3	111033.511213837	81	99.2	30.303	111.033
Exp 21	3	1	5	118059.111122615	80	168	29.527	118.059
Exp 22	3	2	1	104370.259993755	79	35	30.303	104.371
Exp 23	3	2	3	111033.511213837	79	99.2	30.303	111.033
Exp 24	3	2	5	118059.111122615	79	168	29.527	118.059
Exp 25	3	3	1	104370.259993755	77	35	30.303	104.371
Exp 26	3	3	3	111033.511213837	77	99.2	30.303	111.035
Exp 27	3	3	5	118059.111122615	77	168	29.527	118.059