



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# OPTIMALIZACE VÝROBNÍHO PROCESU VE SMYSLU PRŮMYSL 4.0

OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION PROCESS IN THE SENSE OF INDUSTRY 4.0

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Sázavský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Jakub Sázavský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenství  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

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:

## **Optimalizace výrobního procesu ve smyslu Průmysl 4.0**

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

Filozofie Průmyslu/Industry 4.0 ukazuje možné směry vývoje a nastiňuje opatření, která podpoří budoucnost ekonomiky a průmyslu ve smyslu zefektivnění výroby, minimalizování ekologické stopy, automatizaci, bezpečnosti aj. Pomocí stále se rozšiřujících IT možností začíná být standardem využívat digitální kopii továrny a jednotlivých výrobních procesů. Simulace výrobního procesu pomocí matematických metod patří v dnešní době k nepostradatelným pomocníkům při plánování výroby, rozvržení servisních odstávek, k tvorbě nové výrobní linky, atd. Cílem práce je popsat základní pojmy Průmyslu 4.0 ve vztahu k výrobnímu procesu a ukázat na vlastním zjednodušeném modelu výrobní linky její možnosti.

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je popsání problematiky výrobního procesu (typologie, struktura a fáze výrobního procesu, standardizace, činnosti spojené s výrobním procesem), filozofie Průmyslu 4.0, pojmu virtuální továrna, metod a možností digitalizace procesu. Na zjednodušeném výrobním procesu demonstrovat ukázkou digitální výrobní linky.

### **Seznam doporučené literatury:**

GROSS, Donald, SHORTLE, John, THOMPSON, James a HARRIS, Carl. Fundamentals of queueing theory. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. Wiley series in probability and statistics. ISBN 9780471791270.

RAO, Singiresu. Engineering optimization: Theory and practice. Čtvrté vydání. Hoboken: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-18352-6.

PASCUAL, D. Galar. DEPONTE, Pasquale a KUMAR, Uday. Handbook of Industry 4.0 and SMART Systems. CRC Press, 2019. ISBN 9781138316294.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Budoucnost, zejména průmyslu, je a bude definována koncepcí Průmysl 4.0. Tato práce si proto klade za cíl popsat základní pojmy Průmyslu 4.0 ve vztahu k výrobnímu procesu a ukázat na zjednodušeném modelu reálné výrobní linky jeho možnosti. Objasňuje pojmy jako výrobní proces, koncept Průmysl 4.0 a teorie front. Praktická část zahrnuje model části linky v polygrafické firmě v programu Tecnomatix Plant Simulation, určení úzkých míst, možnosti optimalizace a zhodnocení jejich dopadů. Dále pak příklad z podnikové praxe a vyvozené závěry.

### **Klíčová slova**

Průmysl 4.0, výrobní proces, chytrá továrna, digitální dvojče, simulace, optimalizace

## **ABSTRACT**

Particularly the future of industry is and will be defined by the concept of Industry 4.0. Therefore, this thesis aims to describe the basic conceptions of Industry 4.0 in relation to the production process and demonstrate the possibilities of digital twin by using simplified model of a real production line. It explains terms such as the production process, the concept of Industry 4.0 and the queueing theory. The practical part includes a model of the section of a line in the printing company by the program Tecnomatix Plant Simulation, identification of bottlenecks, possibilities of optimization and evaluation of their impacts. Then there is an example from business practice and drawn conclusions.

### **Key words**

Industry 4.0, manufacturing process, smart factory, digital twin, simulation, optimization

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SÁZAVSKÝ, Jakub. *Optimalizace výrobního procesu ve smyslu Průmysl 4.0* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132465>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Tomáš Mauder.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Optimalizace výrobního procesu ve smyslu Průmysl 4.0** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

\_\_\_\_\_  
Jméno a příjmení

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Tomáši Mauderovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této bakalářské práce.



## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Výrobní proces .....	12
1.1 Výroba .....	12
1.2 Struktura a fáze .....	12
1.3 Typologie .....	13
1.4 Standardizace .....	13
1.5 Činnosti spojené s výrobním procesem .....	15
2 Průmysl 4.0.....	17
2.1 Podstata.....	17
2.2 Chytré továrny .....	18
2.3 Chytrý produkt.....	20
3 Teorie front.....	21
3.1 Schéma příchozích zákazníků.....	21
3.2 Schéma serverů, jejich počet a zapojení .....	22
3.3 Disciplína fronty a její kapacita .....	22
3.4 Zápis, nástroje, výstupy .....	22
3.5 Simulační software .....	23
4 Praktická část.....	25
4.1 Simulační software Tecnomatix Plant Simulation.....	25
4.2 Model výrobní linky .....	28
4.3 Možnosti optimalizace .....	31
4.4 Průmysl 4.0 a POINT CZ .....	34
ZÁVĚR.....	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	40
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	41
SEZNAM TABULEK .....	42
SEZNAM PŘÍLOH .....	43



## ÚVOD

S přicházející automatizací a digitalizací do výroby začíná společností rezonovat pojem Průmysl 4.0, který tento nastupující trend a mnohé další ve svém konceptu charakterizuje. Sám jsem se několikrát setkal s tím, jaké změny Průmysl 4.0 přináší na trh práce, jaký má jeho implementace vliv na budoucnost ekonomiky a průmyslu ve smyslu zefektivnění výroby, minimalizování ekologické stopy, automatizaci, bezpečnost atd. Málokde jsem se ale dozvěděl, co samotný Průmysl 4.0 ve výrobě znamená, jak jeho implementace funguje a na základě čeho jsme schopni optimalizovat za účelem, již zmiňovaného, zefektivnění výroby. Z tohoto důvodu si tato bakalářská práce klade za cíl popsat základní pojmy Průmyslu 4.0 ve vztahu k výrobnímu procesu a ukázat na vlastním zjednodušeném modelu výrobní linky jeho možnosti. Přínosem této práce má být pochopení implementace Průmyslu 4.0 ve výrobě pro čtenáře, který má o této problematice obecné informace, ale již si není jistý tím, co samotné zavedení tohoto konceptu znamená v souvislosti s optimalizací.

Práce je standardně rozdělena na 2 části, teoretickou a praktickou. Teoretická část se věnuje obecným pojmům, které jsou pro tuto oblast a její pochopení důležité. Nejprve je tedy představen výrobní proces, jeho struktura a fáze, typologie (rozdělení dle daných charakteristik), standardizace a činnosti spojené s výrobním procesem. Následuje kapitola věnována Průmyslu 4.0, zejména jeho podstatě, chytré továrně a chytrému produktu. V teoretické části je ještě stručně představena teorie front, kdy její zákonitosti se promítají do simulací nebo jsou na ní postaveny.

Praktická část se z počátku zaměřuje na simulační software Tecnomatix Plant Simulation od společnosti Siemens, pomocí kterého je následně vytvořen zjednodušený model části výrobní linky v polygrafické firmě. Ten slouží k určení potřebného času na vyhotovení zakázky, kdy na základě výstupů po proběhlé simulaci jsou určena úzká místa, navrhnuté možnosti optimalizace a následně ověřen jejich dopad na výrobní proces. Tato kapitola je dále doplněna o příklad implementace Průmyslu 4.0 v podnikové praxi.

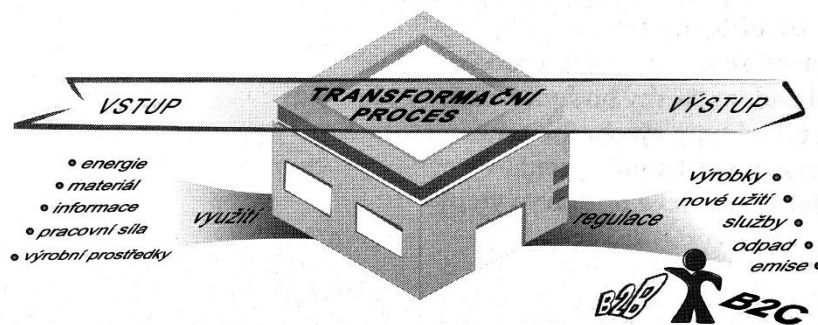
Závěr práce je věnován zhodnocení a rozebrání dosažených výsledků. Zejména jsou hodnoceny alternativy optimalizace linky v polygrafické firmě a možnosti, které digitální model nabízí.

## 1 Výrobní proces

Zařazení výrobního procesu pod konkrétní vědní disciplínu je obtížné vzhledem k tomu, že tato problematika zahrnuje nejen technické a technologické prvky samotné tvorby produktu (hmotný i nehmotný), ale i další podpůrné činnosti, které spadají do kompetence managementu a dalších oborů. Výrobní proces je tedy komplexem několika činností, které se dále odvíjí od zaměření konkrétního odvětví, ve kterém se podnik (ve smyslu právnická nebo fyzická osoba) nachází. Z tohoto důvodu budou v následujících kapitolách popsány základní pojmy, které jsou ve své podstatě univerzální.

### 1.1 Výroba

Výroba zjednodušeně znamená přeměnu vstupů na výstupy. K této transformaci jsou nezbytné faktory, které můžeme zařadit do 4 základních skupin, a to: půda (přírodní zdroje); technické prostředky; práce a informace [1]. Dle Keřkovského [2] spadají technické prostředky do kapitálu, významově je obsah této skupiny stejný a zahrnuje výrobní faktory vznikající v průběhu výroby (např. stroje), které dále slouží jako vstupy k další výrobě. Výstupem celého procesu je poté výrobek (hmotný) nebo služba (nehmotná).



Obrázek 1.1 – Obecné schéma výrobního procesu [3]

### 1.2 Struktura a fáze

Strukturu výrobního procesu rozlišujeme na **věcnou**, **časovou** a **prostorovou**. Věcná složka zahrnuje **výrobní profil podniku**, čímž je myšlen souhrn výrobních kapacit (stroje, zařízení, lidské zdroje), a **výrobní program** (vyráběné a nabízené produkty na trhu). Z pohledu spotřeby času nás bude zajímat **časové uspořádání výrobního procesu** (posloupnost operací a časy na provedení operací), **výrobní a dopravní dávky** (počet vstupů zadávaných společně), **průběžná doba výroby** (zamýšlený čas k realizaci konkrétní operace), **využití výrobních kapacit** a **prostoje pracovišť**. Pokud se budeme dívat na výrobu z prostorového hlediska, tak naším předmětem zkoumání budou jednak **materiálové toky** (rychlost, vzdálenost a plynulost přepravy), ale i **uspořádání pracovišť**, které dále popisuje kapitola 1.3 (jsou i jiné druhy nebo jejich kombinace, ale pro účely této práce poslouží tyto základní). Přejdeme-li k tvorbě produktu, tak prvním stupněm je **předzhotovující fáze**, ve které vznikají polotovary (např. odlitek, výlisek). Následuje **hlavní výrobní fáze**, ve které jsou zpracovány polotovary (např. obráběním). K tvorbě finálních produktů dochází v **dohotovující fázi** (montáž, povrchová úprava, ...). V každé ze zmíněných fází probíhají hlavní, pomocné a obslužné výrobní procesy a v širším kontextu tato etapa zapadá mezi **předvýrobní přípravu** a **povýrobní etapu** (balení a expedice) [1,2].

### 1.3 Typologie

Typologií myslíme rozdělení výroby do skupin dle konkrétního parametru. Rozdělení je nespočet, proto si v této kapitole představíme pouze pár z nich, které lze považovat za základní a je vhodné mít o nich přehled.

#### Podle množství

- *Hromadná výroba* – zaměřujeme se na jeden druh produktu (případně jeho modifikace), který vyrábíme ve velkém množství; průběh výrobního procesu se pravidelně opakuje a je stabilizován.
- *Sériová výroba* – na rozdíl od hromadné výroby se většinou vyskytuje více druhů výrobků, které se vyrábí v dávkách/sériích. Tyto série se střídají a případně opakují.
- *Kusová výroba* – velká variabilita výrobků, které jsou realizovány kusově nebo v omezeném množství; průběh výrobního procesu se neopakuje a pokud ano, tak nepravidelně [2].

#### Podle plynulosti

- *Plynulé procesy* – hovoříme o výrobě, která, až na výjimky způsobené nutnými opravami výrobních zařízení, probíhá nepřetržitě (např. zpracování ropy).
- *Přerušované procesy* – výrobu je po určitých částech možné přerušit nebo to technologický postup přímo vyžaduje [2].

#### Podle formy organizace

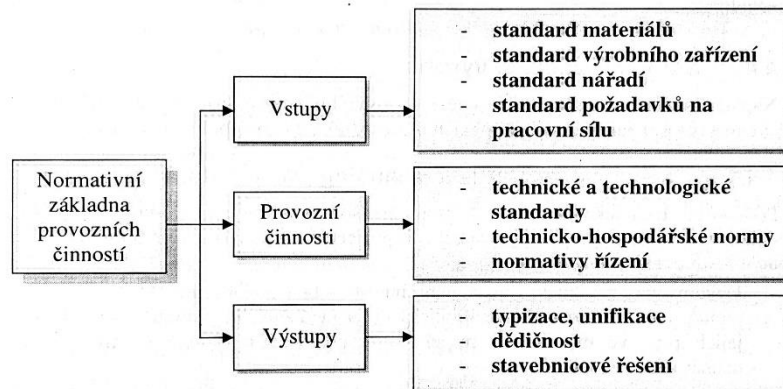
- *Proudová* – jednotlivé operace a úkony jsou uskutečňovány na specializovaných pracovištích, která jsou uspořádána za sebou tak, aby jimi mohl výrobek procházet plynule; především u hromadné výroby.
- *Skupinová* – podobně jako u proudové výroby dochází k tvorbě specializovaných uspořádaných středisek, které jsou ovšem v tomto případě obecnějšího charakteru, tedy univerzálnější (kombinace proudové a dílenské formy); především u sériové výroby.
- *Dílenská* – uspořádání pracovišť pouze technologicky (skupiny strojů se stejnou funkcí), kdy pro mezioperační přepravu jsou často vyžadovány mezisklady; zakázkově orientovaná výroba [3].

### 1.4 Standardizace

Během celého výrobního procesu (od návrhu až po prodej) dochází k rozmanitosti a nahodilosti operací, což snižuje jeho plynulost a zvyšuje náročnost. Z tohoto důvodu se snažíme o redukci možných řešení vedoucích k stanovení optimálního, tedy standartního řešení (jeho podmínky, doba platnosti a závaznosti). Přínosem standardizace je snížení nákladů, zrychlení a snížení náročnosti přípravy výroby, výroby samotné a nákupu. Dále je nezbytná pro případnou automatizaci procesů [4].

Výsledkem této činnosti jsou poté **normy** (standards), definované dle Jurové [4] jako „jednotný, časově relativně neměnný a závazný znak, nařízení nebo předpis vlastností, činitelů a činností ve výrobě a jejich kombinace“. Mohou být národní/nadnárodní (ČSN, ISO) nebo vznikat na podnikové úrovni. Plní funkci informační (o stavu a průběhu procesů), funkci míry spotřeby a proporcionality, funkci operativně řídicí a kontrolní. Metody pro jejich tvorbu mohou být: *propočtově analytické* (výpočet dle úplné a podrobné dokumentace), *zkušební* (na základě měření), *porovnávací* (s již existující normou), *statistické* (vyjádření závislosti

parametrů), *odhadové a expertizní* (v případě, že nelze zvolit žádnou z předchozích metod). Každý podnik poté má svou normativní základnu, z které čerpá [4].



Obrázek 1.2 – Struktura normativní základny provozních činností [1]

### Technické a technologické normy

Do této skupiny patří *dokumentace předmětu provozní činnosti* (specifikace vyráběných produktů – projekty, výkresy, montážní schémata, ...) a *dokumentace postupů* (technologické, pracovní, montážní, kontrolní, ...) [1].

### Technicko-hospodářské normy

V této oblasti se přesouváme k podnikovým normám, které dávají do vztahu spotřebu zdrojů na výrobu konkrétních produktů. Normy nabývají nominálních hodnot, které jsou pro každý podnik jedinečné (odvíjí se od konkrétních firemních podmínek). Metody pro jejich stanovení odpovídají metodám vyjmenovaným v kapitole 1.4. Dělíme je do 4 základních skupin: [1]

- *Normy spotřeby materiálu* – předpokladem pro tvorbu je přesně specifikovaný výchozí materiál, výsledek výrobní činnosti (součást, výrobek, výkon), předmět zkoumání (hmotnost, objem atd.) a základní technologické podmínky [1,3].
  - *Čistá spotřeba* – zahrnuje materiál nezbytně nutný (základní a pomocný).
  - *Odpad* – nevyužitý materiál, který může sloužit k jinému účelu.
  - *Ztráty* – dále nevyužitelný materiál.
- *Normy vázanosti materiálu* (jinými slovy normy zásob) – máme výrobní zásoby, zásoby nedokončené výroby a zásoby hotových výrobků. Se skladováním jsou spojené náklady a při výpadku dochází k narušení plynulosti výroby, proto zásoby dále dělíme dle jejich funkce a snažíme se určit optimální skladbu [3].
  - *Běžná (obratová) zásoba* – kryje požadavky na materiál v období mezi dvěma dodávkami. Pohybuje se mezi minimem a maximem.
  - *Pojistná zásoba* – její výše je stanovena tak, aby pokryla výkyvy v dodávkách nebo spotřebě. V některých případech se může rovnat zásobě minimální.
  - *Technická zásoba* – pokud si výrobní postup žádá zajištění jakosti materiálu (např. vysychání dřeva).
  - *Sezónní* – v případě, že spotřeba nebo zásobování probíhá sezonně a je nezbytné se předzásobit.
- *Kapacitní normy* – udávají přepočet produkce konkrétního výrobního zařízení na jednotku času (případně jinou jednotku) za předpokladu normálních podmínek, zajištění jakosti, ekonomické efektivity a dodržení podmínek bezpečnosti práce a ochrany zdraví při práci. Při užití jednotky času nás zajímá využitelný časový fond (VČF), ke kterému vztahujeme normu pracovní dané operace (NP) [1,3].

$$VČF = (\text{počet pracovních dnů} - \text{celozávodní dovolená} - \text{plánovaná údržba}) \cdot \text{provozní doba za den} \quad (1)$$

$$NP = \text{čas hlavního technologického chodu} + \text{čas pomocného tech. chodu} + \text{čas klidu} + \text{čekání stroje na obsluhu} \quad (2)$$

- *Normy spotřeby práce* – předmětem zkoumání je lidský faktor.
  - *Výkonové normy* – čas pracovníka na operaci nebo počet výkonů za čas.
  - *Norma obsluhy* – kolik strojů obsluhuje jeden pracovník nebo kolik pracovníků připadá na jeden stroj.

Při plánování výroby je poté zapotřebí pracovat s časem práce. Celkový čas pracovníka na směně bude ale delší, jelikož čas práce jen jednou z jeho složek viz schéma níže [1,3].



Obrázek 1.3 – Struktura pracovního času [1]

### Normativy operativního řízení výroby

Z pohledu výrobního procesu se jedná o nejdůležitější normy, poněvadž na jejich základě ho plánujeme tak, aby byl plynulý, ekonomicky výhodný, udržitelný, opakovatelný a došlo k efektivnímu využití lidských zdrojů, účelnému rozmístění a využití pracovišť. Máme vzorce a různé přístupy, jak níže zmíněné parametry spočítat. Smyslem této kapitoly je pouze čtenáři předat jejich základní podstatu.

- *Velikost výrobní dávky* – zjednodušeně soubor výrobků současně zadávaných do výroby nebo z ní vystupujících, kdy její velikost významně ovlivňuje ekonomiku výroby. Proto nás zajímá její minimální velikost (zda vůbec vyrábět), a především ta optimální (minimální náklady a ztráty na výrobek).
- *Průběžná doba výroby* – čas od provedení první operace až po předání na sklad hotových výrobků. Skrývá v sobě čas technologických a netechnologických operací (manipulace, kontrola, ...) a dobu přerušení. Odvíjí se o toho, zda se jedná o postupný, souběžný nebo smíšený způsob předávání dávek.
- *Takt a rytmus výroby* – takt je interval mezi dvěma po sobě odcházejícími součástmi a rytmus jeho převrácená hodnota (dokončené součásti za jednotku času).
- *Normativ předstihu* – o kolik dříve musí začít dodávající pracoviště před odebírajícím, aby byl zachován plynulý tok výrobních dávek.
- *Zásoby rozpracované výroby* – v případě, že máme dvě nesynchronní linky, je nezbytné vytvořit zásoby rozpracované výroby a stanovit jejich hodnoty tak, aby byla dodržena plynulost (obratová zásoba). Mimo to může podnik držet i pojistnou zásobu [1,3].

### 1.5 Činnosti spojené s výrobním procesem

K výrobnímu procesu nemůžeme přistupovat pouze z pohledu přeměny vstupu na výstup za využití výrobních zařízení a lidských zdrojů. Pokud chceme, aby byla zajištěna plynulost, jakost

a bezpečnost produkce, musíme brát v potaz také další činnosti vstupující do tohoto systému. Opomeneme-li práci se samotným personálem (instruktáž, školení, ...) a legislativní náležitosti, tak velmi významnou oblast zastává logistika a systém údržby, kdy v současné době se tyto činnosti snažíme automatizovat, případně digitalizovat ve smyslu Průmyslu 4.0.

### **Údržba výrobních prostředků**

Cílem je zajistit provozuschopnost výrobních zařízení a předejít nečekané odstávce, která znamená narušení výrobního plánu a růst nákladů. Existují různé způsoby a systémy provádění údržby, zjednodušeně můžeme mít údržbu:

- *Po poruše* (nebo výskytu zmetků, narušení bezpečnosti práce) – neplánovaná; zahrnuje každodenní a běžnou údržbu (drobné závady, doplňování maziv, ...).
- *Prediktivní* – zahrnuje inspekci a diagnostiku; na základě získaných statistických dat zjišťujeme stav, životnost a plánujeme preventivní prohlídky.
- *Preventivní* – na základě prediktivní údržby nebo dle doporučení výrobce [5].

### **Logistika**

Logistika je samostatná vědní disciplína, která zasahuje do několika odvětví a samotných fází výrobního procesu. Obecně se jedná o zajištění plynulého a efektivního toku zboží. Z pohledu podniku zahrnuje logistiku zásobování, řešení a optimalizaci materiálových toků, logistiku distribuce (příjem na sklad, balení, expedice, doprava) a zpětnou logistiku (reklamace, obaly, recyklace, ...). V každé z těchto oblastí se dále jedná o obsáhlý komplex činností. Podstatné je, že žádný podnik se neobejde bez vlastního logistického systému a jeho propracovanost může být podstatnou konkurenční výhodou. Toto odvětví je v současné době velmi propojeno s Průmyslem 4.0, kdy na základě jeho principů vznikají samostatné autonomní systémy [4].



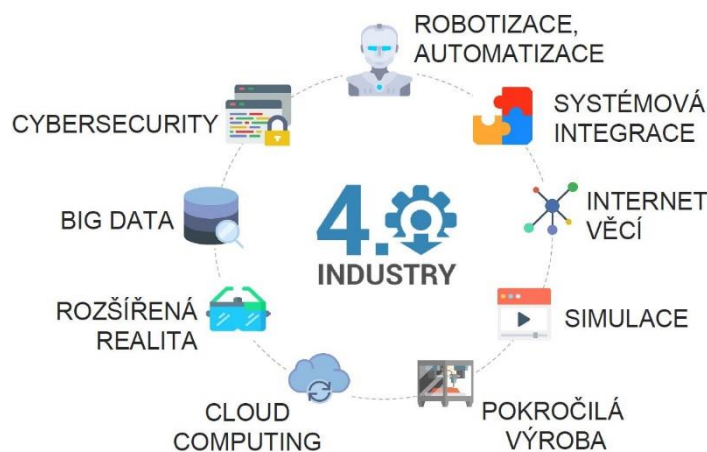
## 2 Průmysl 4.0

### 2.1 Podstata

Pojem Průmysl 4.0 byl poprvé použit v roce 2011 na veletrhu v Hannoveru v rámci programu Německé federální vlády ve spolupráci s univerzitami a soukromými společnostmi. Předmětem byl rozvoj pokročilých výrobních systémů za účelem zvýšení produktivity a efektivity národního průmyslu. Tato strategie znamená čtvrtou průmyslovou revoluci ve výrobě. Do tradičních odvětví přináší vzájemné propojení a automatizaci. Díky technologickému pokroku dochází k obrácení logiky výrobního procesu. Zjednodušeně: stroje nevyrobí produkt, ale produkt komunikuje se strojními zařízeními, aby je informoval, co přesně dělat neboli dochází k samostatné optimalizaci a konfiguraci v závislosti na parametrech zpracovávaného předmětu. Toho je docíleno pomocí propojené sítě informací ze všech částí firmy, včetně informací z dodavateľsko-odběratelského řetězce, kdy práce s daty probíhá v reálném čase. Dochází k vzniku digitálních dvojčat výrobků a linek (na jejich základě jsme schopni navrhnout optimální výrobní postup). Jedná se o skloubení digitálního a fyzického světa (pomocí senzorů na reálných zařízeních a síťových technologií zpracovávajících získaná data) do kyberneticko-fyzikálních systémů (vznik identických digitálních modelů).

Koncept průmyslu 4.0 přináší hromadné přizpůsobení vyráběných produktů dle potřeb zákazníka díky flexibilním výrobním procesům, které jsou neustále optimalizovány (nižší náklady, snížení prostojů, vyšší efektivita a energetická náročnost). Linky jsou plně automatizovány a vzájemně propojeny včetně jejich logistického zázemí. Zkracuje se vývoj a čas k uvedení na trh.

Předpoklady průmyslu 4.0 jsou internet věcí, cloudy, big data a jejich analýza, aditivní výroba, robotika, umělá inteligence, rozšířená realita a kybernetická bezpečnost. Tyto technologie, označované též jako technologie základní, umožňují vznik chytré továrny a výroby, chytrého produktu, chytrého dodavateľského řetězce, ... [6,7,8,9].



Obrázek 2.1 – Koncept průmyslu 4.0 [17]

### Internet věcí a kyberneticko-fyzikální systémy

Internet věcí (zkráceně IoT z angl. Internet of Things) lze dle Lee [10] popsat jako „*dynamické globální síťové prostředí, které kombinuje fyzický a reálný svět, vytvořené spojením inteligentních objektů, které detekují, identifikují a vykonávají bez lidského zásahu úkony k dalším objektům nebo lidem na webu za účelem výměny informací.*“ Jedná se o nástroj, jak přeměnit nezpracovaná data z fyzických systémů na užitečná data, která lze využít na monitorování nebo rozhodování pomocí internetu, cloud computingu a inteligentních systémů. IoT lze nalézt ve zdravotnictví, dopravě, potravinovém zásobním řetězci či v oblasti sociálních

věd. V našem případě je důležité jeho využití ve výrobě, jelikož se jedná o základní stavební kámen Průmyslu 4.0, kdy v tomto kontextu IoT umožňuje propojit senzory, roboty a zařízení.

Průmyslový IoT má svou datovou architekturu, která podporuje získání užitečných dat. Můžeme ji strukturovat do čtyř vrstev:

- *Datová vrstva* – jedná se o identifikaci zdrojů dat a získávání těch relevantních. Daty mohou být údaje ze senzorů, informace o aktivitách a umístění, obrázky a údaje týkající se operátora.
- *Aplikační vrstva* – způsob přístupu k datům pomocí distribuovaných řídicích systémů nebo vlastních datových rozhraní.
- *Bezpečnostní vrstva* – zajištění stability a bezpečnosti systémů.
- *Vrstva služeb* – platforma pro připojení ke vzdáleným zařízením a službám za využití cloudů [11].

Kromě pojmu IoT se v rámci průmyslu 4.0 můžeme setkat s pojmem kyberneticko-fyzikální systém. CPS (z angl. Cyber-Physical System) je podobný IoT, sdílí stejnou základní architekturu a principy. Kombinace a koordinace mezi fyzickými a výpočetními elementy je zde vyšší. Jedná se tedy o jakousi nástavbu IoT. Zahrnuje stroje, skladovací systémy a výrobní zařízení. Data a informace se vyměňují mezi počítačovými terminály, bezdrátovými aplikacemi a cloudy. Oproti IoT je zde více kladen důraz na výpočetní prvky než na samotné propojení [7].

## 2.2 Chytré továrny

Nové technologie přináší vznik chytrých továren (viz kapitola 2.1), které jsou efektivnější, dynamičtější a flexibilnější. V této kapitole si představíme, jak je toho docíleno.

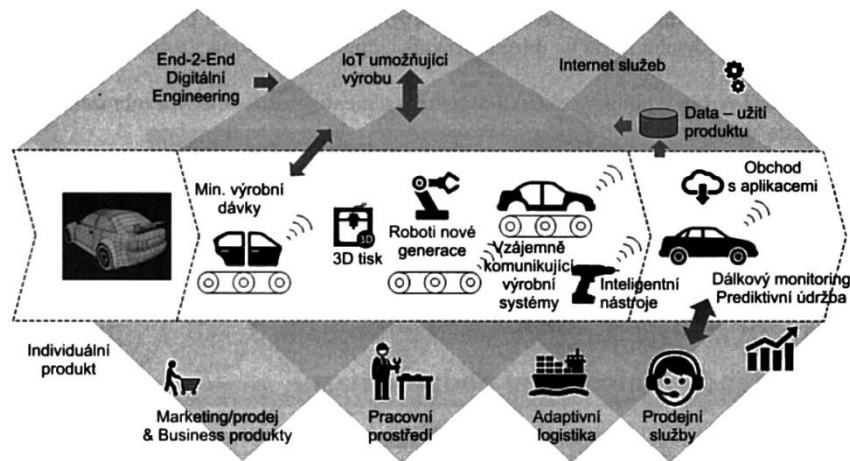
Prvním nástrojem je vertikální integrace. Ta zahrnuje pokročilé informační a komunikační systémy propojující všechny hierarchické úrovně společnosti, což umožňuje ve větší míře rozhodování bez lidského zásahu, větší transparentnost a kontrolu nad výrobním procesem. Podmínkou je digitalizace všech fyzických členů a parametrů pomocí senzorů, regulátorů a programovatelných logických kontrolérů. Získaná data jsou shromážděna pomocí softwaru SCADA (angl. Supervisory Control And Data Acquisition), předána do MES (z angl. Manufacturing Execution Systems), který je zdrojem pro ERP systém (z angl. Enterprise Resource Planning). Tok informací proudí také inverzně (z ERP do SCADA) za účelem efektivního nasazení zdrojů.

Dále je nezbytná virtualizace. Virtuální uvedení do provozu a simulace procesů usnadňuje přizpůsobení výrobní linky, přičemž dochází k imitaci kódů PLC strojů (automatizovaných) a ověřování nastavení procedur. Mluvíme zde o *virtuální továrně*. Mimo to je využívána umělá inteligence pro prediktivní údržbu či umělá inteligence pro plánování výroby.

Pro chytré továrny je typická automatizace. Mezi roboty a stroji je zajištěna machine-to-machine komunikace (jsou si schopny navzájem porozumět, což ulehčuje jejich adaptaci v lince). Dochází k automatické kontrole a identifikaci neshod (dodržování standardů).

Logistika a trasování materiálu je podporováno senzory jak v surovinách, tak i v hotových výrobcích. Zabudované senzory podporují adaptabilní systémy pružných linek, které si z nich načtou požadavky pro nezbytné akce na jejich výrobu. Flexibilní linky mohou být tvořeny autonomními modulárními stroji či aditivní výrobou (např. 3D tisk).

V rámci chytrých továren je také monitorována a zkvalitňována energetická náročnost [7,8].



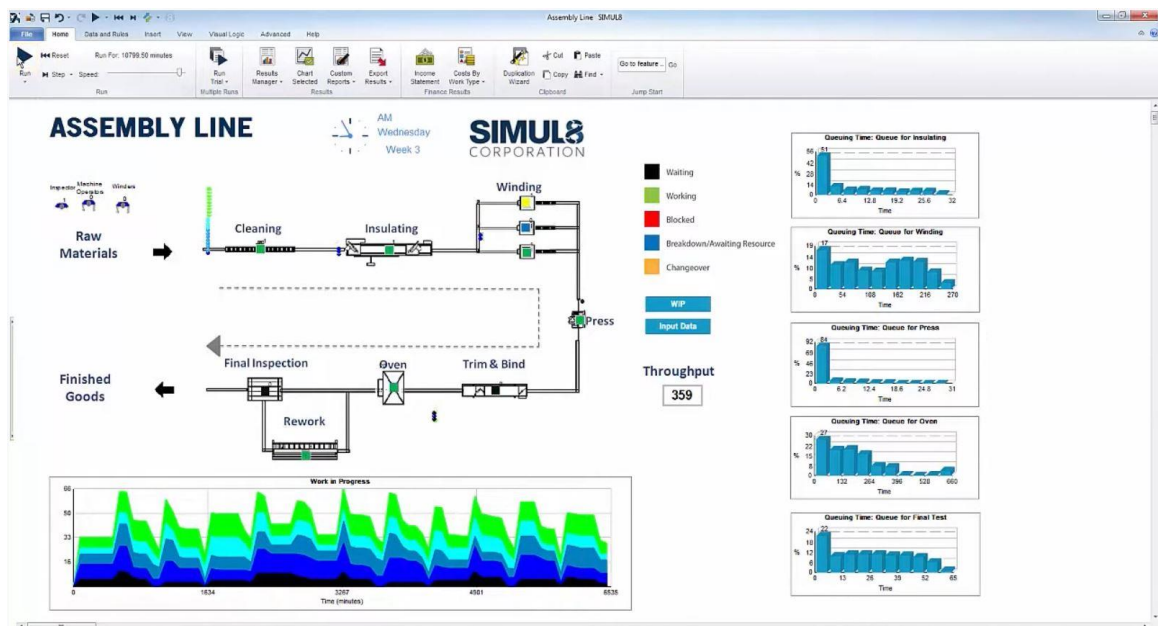
Obrázek 2.2 – Princip chytré továrny [4]

### Digitální linka

Digitální linka nebo také virtuální továrna je, jak již bylo zmíněno, součástí chytré továrny. Architektura je taková, že potřebujeme vhodný *datový model*, který reprezentuje produkční systémy, zdroje, procesy a produkty. Ten je doplněn o *softwarovou aplikaci*, která data organizuje a umožňuje k nim přístup. Nakonec zde máme *softwarové nástroje* (simulační, např. ARENA, Siemens Digital Industries Software, Simul8), jenž umožňují synchronizaci skutečných a virtuálních reprezentantů.

Datový model obsahuje informace o produkčním cíli podniku, operátorech, strojích, dopravních a logistických zařízeních, výrobě, montáži, transportu a manipulaci, budovách a jejich dispozicích. Pokrývá veškeré zaznamatelné prvky výrobního procesu.

Softwarové nástroje nabízí výrobní simulace (vytvoření digitálního dvojčete uvažované/reálné linky), kdy na základě výstupů upravujeme proces do optimální podoby (přesnost, efektivita, stabilita, jakost). Dále tyto nástroje umožňují design a vizualizaci produkčního systému (zasazení strojů, obsluhy a dalších zdrojů do 3D modelů pracovišť) [8].



Obrázek 2.3 – Ukázka simulace v sw společnosti Simul8 [18]

### 2.3 Chytrý produkt

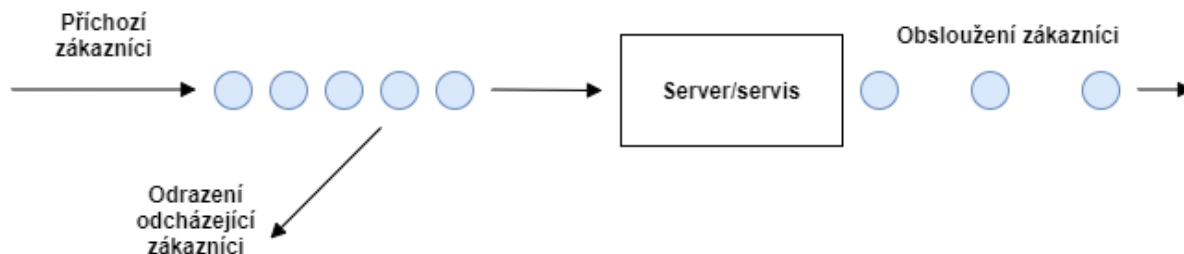
Produkty ve smyslu Průmyslu 4.0 naplňují několik aspektů, které vycházejí z principů a technologií zmíněných v předchozích kapitolách. Výrobky nabízejí konektivitu jak vzájemnou, tak s jinými objekty. Mohou být vzdáleně ovládány či monitorovány prostřednictvím digitálních rozhraní, a to jak uživatelem, tak i autonomně pomocí umělé inteligence. Samozřejmostí jsou optimalizační funkce. Přínos je nejen pro výrobce (porozumění zákazníkům, vývoj nových modelů), nýbrž i pro uživatele (optimální personalizace, užitečná data, větší efektivita, bezpečnost). Zajímavým příkladem jsou chytré inhalátory, které jsou vybaveny monitorovacími senzory, jenž sbírají data v reálném čase. Analyzované údaje jsou poté poskytovány jednak pacientům, tak i jejich lékařům [8,9].



Obrázek 2.4 – Chytrý inhalátor FindAir ONE [26]

### 3 Teorie front

Výrobní proces se neobejde bez tvorby front, proto je nezbytné pochopit jejich podstatu a problematiku. Vezmeme-li to obecně, tak fronty vznikají na místech, kde poptávka po servisu převyšuje jeho možnosti být dostupným pro všechny příchozí. Důsledkem jsou postupně přicházející objekty do řady, ve které čekají na servis/službu. Ty, které frontu neopustí předčasně, jsou následně obslouženy a odcházejí.



Obrázek 3.1 – Schéma tvorby fronty [13]

Zákazníkem (vstupem) může být podobně jako u výrobního procesu hmotný i nehmotný objekt. Například zákazník obchodu s potravinami čekající na zaplacení u pokladny, email čekající na zpracování serverem a odeslání adresátovy, karoserie automobilu čekající na nalakování. Serverem je objekt poskytující službu (zaměstnanec obchodu, software, lakovna). Problémem ovšem je, že pouze v některých konkrétních příkladech dochází k ideálnímu odbavování zákazníků při stejných požadavcích a podmínkách. Vrátime-li se k příkladu s obchodem, tak žádný zákazník není odbaven za stejný čas, vzhledem k rozmanitosti sortimentu, velikosti nákupů, různých možností platby a dalších aspektů. Pokud by byl čas odbavení shodný (příklad výrobního zařízení), tak další překážkou jsou náhodné příchody do fronty. Proto byla vyvinuta teorie front, která poskytuje modely pro predikci chování systémů za účelem naplnění služby pro náhodně vznikající poptávku (ale ne nepřírozenou).

Abychom mohli daný systém popsat, potřebujeme znát tyto charakteristiky: *schéma příchozích zákazníků, schéma serverů, disciplínu fronty, kapacitu systému, zapojení serverů a počet fází služby* [13].

#### 3.1 Schéma příchozích zákazníků

V ideálním případě je proces příchodu objektů deterministický (při vždy stejných požadavcích a podmínkách). V ostatních případech je proces stochastického charakteru řídicího se rozdělením pravděpodobnosti popisujícího časy mezi po sobě jdoucími zákazníky, kdy vzorec se může v průběhu času měnit (nestacionární příchod entit) nebo zůstávat neměnný (stacionární). Podstatné dále je, zda objekty přicházejí do fronty současně v dávce (její velikost může být také určena rozdělením pravděpodobnosti) či jednotlivě. Mimo to musíme znát reakci objektů při vstupu do systému. Zda ve frontě vydrží bez ohledu na její délku, nebo je-li příliš dlouhá, rozhodnou se do ní nevstoupit. Případně do fronty vstoupí, ale po určitém časovém úseku se rozhodnou ji opustit. Pokud je front více, mohou zákazníci přecházet z jedné do druhé [13].

Ještě než začneme aplikovat vhodné rozdělení pravděpodobnosti, tak musíme na množině všech elementárních jevů definovat **náhodnou veličinu  $X$**  jako reálnou funkci, jež každému jevu přiřadí reálné číslo. Podle oboru hodnot, kterých mohou elementární jevy nabývat, rozdělujeme náhodnou veličinu na *diskrétní* (konečná nebo nekonečná posloupnost) a *spojitou* (otevřený nebo uzavřený interval). Pro popis pravděpodobnostního chování náhodné veličiny využíváme **distribuční funkci  $F(x)$** , která přiřazuje každé hodnotě  $x_i$  náhodné veličiny  $X$  pravděpodobnost  $P(X \leq x)$ . Mezi charakteristiky polohy náhodných veličin patří například **střední hodnota  $E(X)$** . Potřebné jsou i charakteristiky variability jako **směrodatná odchylka**

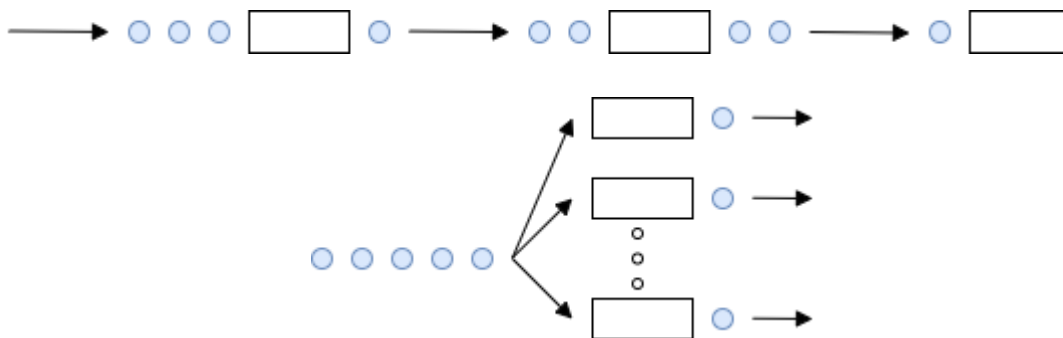
$\sigma(X)$  nebo **rozptyl**  $D(X)$ . Na základě těchto a dalších funkcí jsme poté schopni určit vybrané rozdělení pravděpodobnosti. Mezi častá rozdělení v rámci teorie front se řadí například **geometrické, Poissonovo, exponenciální** či **hyperexponenciální** [14,15].

### 3.2 Schéma serverů, jejich počet a zapojení

Obdobně jako v případě příchodu objektů do fronty může být čas věnovaný serverem zákazníkovi deterministický nebo stochastický (popsán pravděpodobnostním rozdělením stacionárním/nestacionárním). Obsluha může být postupná či současná (zpracování dávky najednou). Tvořící se fronta server neovlivní, nebo naopak ovlivní, kdy dojde k jeho zrychlení/zahlcení.

Od druhu služby se bude odvíjet počet servisních fází. Příklad s obchodem potravin je reprezentantem *jednofázového systému* (fronta u pokladny). *Multifázovým* pak výroba karosérie automobilu, kdy před jejím nalakováním musí projít ještě několika středisky, kde je svařena, je upraven povrch atd. Pokud je v soustavě více středisek, tak dochází k jejich zapojení.

Zapojení serverů dělíme na *sériové, paralelní* nebo jejich *kombinaci*. Při sériovém uspořádání prochází entita obslužnými aparáty postupně v přesně daném pořadí (seřazeny za sebou). Opakem je paralelní uspořádání, kdy si zákazník může vybrat jakýkoliv server za předpokladu, že servery fungují nezávisle na sobě (seřazeny vedle sebe). Kombinace těchto druhů zapojení v praxi vzniká na základě technologického postupu, snaže o zkrácení doby výroby či větší efektivity [13].



Obrázek 3.2 – Sériové a paralelní zapojení serverů [13]

### 3.3 Disciplína fronty a její kapacita

Disciplína fronty může být chápána jako ochota blokováných zákazníků zůstat ve frontě. Ti se mohou rozhodnout při obsazenosti systému do něj nevstoupit, opustit jej po uplynutí určitého času nebo čekat ve frontě nezávisle na čase [16].

Dále je pod tímto pojmem myšlen způsob, jakým jsou entity (objekty obsažené v systému/modelu) vybírány z fronty ke zpracování. Mezi nejjednodušší principy patří **FIFO** (first in, first out), kde první příchozí vstupuje do obsluhy také jako první. Opakem je **LIFO** (last in, first out). V něm poslední příchozí vstupuje do obsluhy jako první. **Prioritní přístup** přiděluje objektům ve frontě na základě volených parametrů prioritu, kdy s nejvyšší jsou vybírány přednostně. Přijatelný je i zcela **náhodný výběr**.

Kapacita fronty se dělí na *neomezeno* a *omezenou*, u které příchozí zákazník do ní nemůže vstoupit do okamžiku, než se uvolní místo [13,15].

### 3.4 Zápis, nástroje, výstupy

Pro popis procesu čekání ve frontě byl D. G. Kendallem vytvořen jednoduchý zápis ve formátu  $a/b/c$ . První znak vyjadřuje pravděpodobnostní rozdělení pro příchody (např.: M – exponenciální, G – obecné, D – deterministické). Na pozici  $b$  dosazujeme rozdělení servisních

časů. Počet serverů určuje číslice na místě  $c$  ( $1,2,3,\dots,\infty$ ). Složitější modely jsou doplněny o další charakteristiky. Konkrétně o maximální systémovou kapacitu ( $1,2,3,\dots,\infty$ ) a disciplínu fronty (např. FIFO). Notace je poté tvaru  $a/b/c/d/e$ .

K řešení charakterizovaného systému existují analytické prostředky zahrnující sadu postupů a vzorců směřujících k požadovaným výstupům. Máme zde schémata např. pro systémy M/M/1, M/G/1 atd. V rámci analytických přístupů je ještě nutné zmínit **Littleho pravidlo**. Tento důležitý vztah dává do souvislosti průměrný počet zákazníků v systému  $E(L)$ , průměrnou dobu pobytu  $E(S)$  a průměrný počet zákazníků vstupujících do systému za jednotku času  $\lambda$ . Předpokladem je, že kapacita servisu je postačující pro zákazníky.

$$E(L) = \lambda E(S) \quad (3)$$

Pokud ovšem analytické modely selžou nebo je jejich řešení příliš náročné, přistupujeme k simulacím za využití simulačního softwaru.

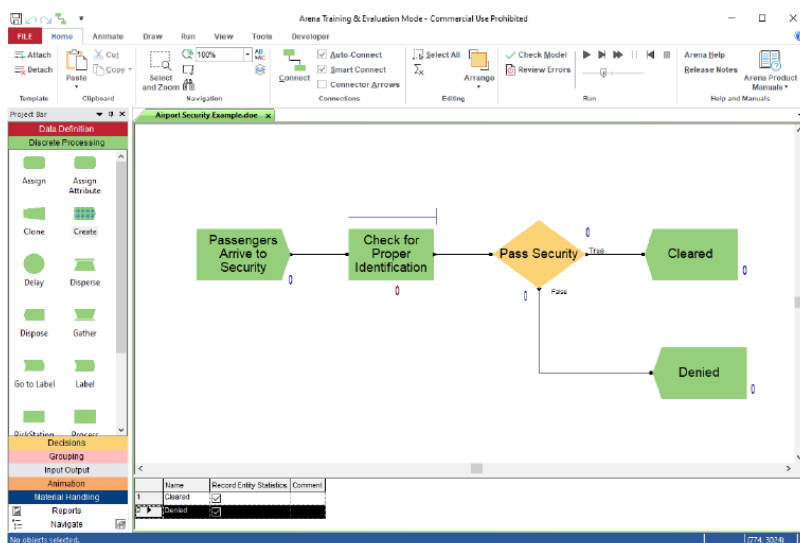
Požadovaným výstupem jsou především *měřítka výkonu*, jako například *průměrná doba čekání ve frontě* nebo *průměrná doba odbytu* [13,15].

### 3.5 Simulační software

Na trhu existuje široká škála softwaru umožňujícího simulace procesů v business sféře. V této kapitole budou představeny tři z nich. Zástupci dalších programů jsou: Witness, ProModel, SimEvents, AnyLogic, Visual Components a další. Jejich funkce a principy jsou podobné popsaným níže.

#### Arena

Pomocí simulačního softwaru Arena společnosti Rockwell Automation jsme schopni modelovat procesy od dodavatelského řetězce přes výrobu, logistiku, distribuci, skladování až po systém služeb. Komplexní systém simulujeme diskrétně neboli jako řadu přesně definovaných a uspořádaných událostí. Program Arena obsahuje knihovnu předdefinovaných stavebních bloků, možnost výběru rozdělení pravděpodobnosti, definici cest entit, statistickou analýzu a generování zpráv. Vizualizace výsledků (náklady, propustnost, časy cyklů a využití, ...) probíhá ve 2D nebo 3D. Jsme jednoduše schopni identifikovat úzká místa (tvorba front, přetížení serverů). Program dobře spolupracuje s aplikacemi od Microsoftu, jako jsou například Visio a Excel [19].



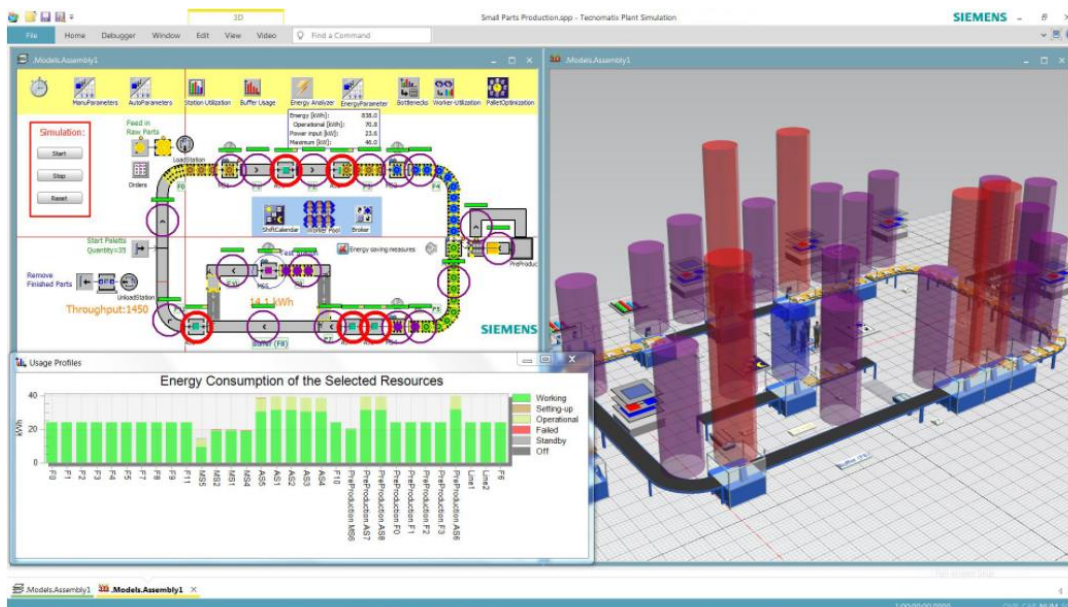
Obrázek 3.3 – Ukázka modelování security line na letišti [19]

## Simul8

Základní princip tohoto simulačního software je podobný jako v případě Arena. Opět umožňuje modelovat širokou škálu procesů pomocí inteligentních stavebních bloků, volby distributivních funkcí a dalších nástrojů. Na rozdíl od Areny se nejedná pouze o desktop aplikaci, ale pracuje i v prohlížeči. Na tvorbě simulací lze pracovat týmově. Program dále umožňuje synchronizovat simulace s reálnými daty. Simul8 zvládá nejen diskrétní události, ale i spojité (např. tok vody) či jejich kombinace [20]. Ukázka simulace u kapitoly 2.2 Chytré továrny.

## Tecnomatix Plant Simulation

Program od firmy Siemens sloužící k analýze a optimalizaci diskrétních procesů. Kostra tvorby simulací je obdobná ostatním simulačním programům (předdefinované stavební bloky, stochastické nástroje atd.). Mimo to Tecnomatix Plant Simulation poskytuje výkonné grafické vizualizace a výstupy. Modely zohledňují interní a externí dodavatelské řetězce a nabízí energetický analyzátor, který ukazuje současnou, maximální a celkovou spotřebu energie. Vytvořené digitální dvojče může být propojeno s reálnou linkou, kde získává data z PLC jednotek a dokáže tak simulovat aktuální produkci. Následně ji testovat a optimalizovat [21].



Obrázek 3.4 – Ukázka vizualizace spotřeby energie [21]



## 4 Praktická část

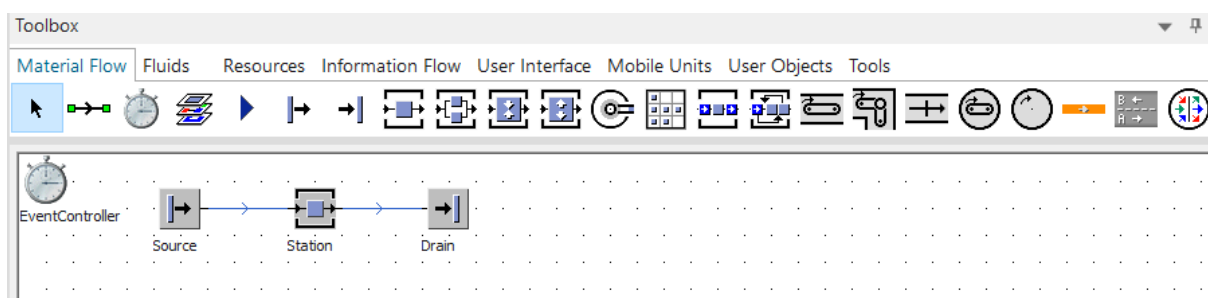
Koncept průmyslu 4.0 v souvislosti s optimalizací výrobního procesu bude demonstrován na příkladu firmy POINT CZ, s.r.o. Jedná se o českou polygrafickou firmu, která se zaměřuje na ofsetový a digitální tisk, výrobu kalendářů a výrobu obalů (packaging). V jejím portfoliu nalezneme například firemní tiskoviny, knihy, časopisy, letáky, plakáty, brožury, kalendáře a různé typy obalů z hladké lepenky využívaných v potravinářství, farmacii, spotřebitelském průmyslu a dalších odvětvích. Podnik se orientuje jak na B2C trh, tak i B2B [22]. Výroba je sériová i kusová (odvíjí se od druhu zakázky). Dále je zařaditelná dle kapitoly 1.2 do kategorie přerušovaných procesů se skupinovou formou organizace.

Tato část se bude věnovat funkcím vybraného simulačního softwaru. S jeho pomocí bude následně vytvořen zjednodušený digitální model části výrobní linky v POINT CZ, s.r.o. Do kontrastu budou dány reálné výstupy používané v podniku a představeny další možnosti automatizovaného řízení výrobních procesů dle pojetí Průmyslu 4.0.

### 4.1 Simulační software Tecnomatix Plant Simulation

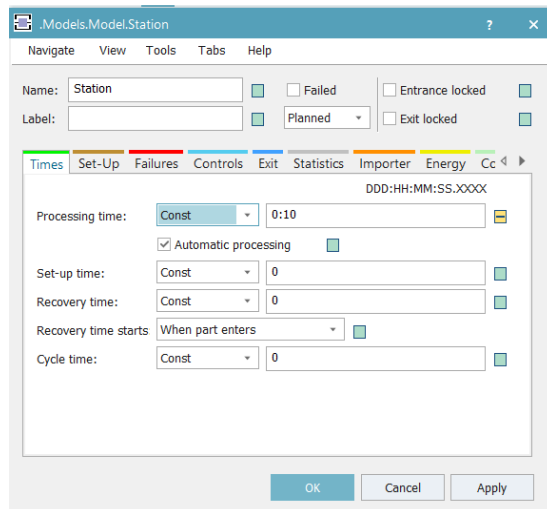
Pro účely názorné ukázky tvorby digitálního dvojčete linky byl vybrán simulační program Tecnomatix Plant Simulation 15 ve studentské verzi, která je volně dostupná s omezením maximální kapacity 80 objektů (= stroje, vstupy, výstupy, dopravníky, podavače, ...). Níže se podíváme na základní principy a postupy tvorby modelů a jejich nastavitelné parametry.

Primárně probíhá modelování ve 2D. Program umožňuje i následnou 3D vizualizaci. Základními bloky jsou *Source* (zdroj), *Station* (výrobní zařízení) a *Drain* (výstup), které umísťujeme na pracovní plochu z *Toolboxu*. Bez těchto elementů nejsme schopni vytvořit žádnou linku. K jejich propojení se využívá *Connector* (čára se symbolem šipky).



Obrázek 4.1 – Základní stavební bloky v sw Tecnomatic Plant Simualtion

U zdroje máme na výběr mezi součástmi, přepravním kontejnerem (k transportu součástí) a přepravním vozidlem. Pro změnu předdefinovaných parametrů slouží vyskakovací okno. Příkladem bude nastavení pro výrobní zařízení (obr. 4.2), pro ostatní bloky ze sady *Material Flow* je princip podobný, akorát se liší dle funkce (příchozí čas zákazníků x čas serveru).



Obrázek 4.2 – Vyskakovací okno pro výrobní zařízení

V záložce *Times* nastavujeme požadované časy. Tyto a další údaje by měly vycházet z normativní základny provozních činností podniku. Například u procesního času se budeme odkazovat na standard výrobního zařízení. V předdefinovaném nastavení jsou parametry konstanty (deterministické), ale můžeme je zadat i stochasticky, jak bylo zmíněno v kapitole 3.2, kdy pro zvolené rozdělení pravděpodobnosti jsou vstupními hodnotami například střední hodnota, směrodatná odchylka atd. Záložka *Failures* zahrnuje nastavení poruchovosti zařízení neboli na kolik procent dokáže doopravdy plnit svoji funkci. Zde můžeme zadat i jak dlouho trvá oprava/údržba zařízení. Velmi důležité je nastavení *Exit*, jelikož zde musíme potvrdit *Blocking*, aby stroj (popř. vstup, dopravník, ...) neposílal entity dále do systému, pokud není volná cesta. Programu tím řekneme, aby začal vytvářet fronty. Dále zde definujeme logistiku, pokud na blok navazuje více cest. Tím je myšleno, zda entity budou například k dalším strojům odcházet procentuálně, podle obsazenosti, strojních časů atd.

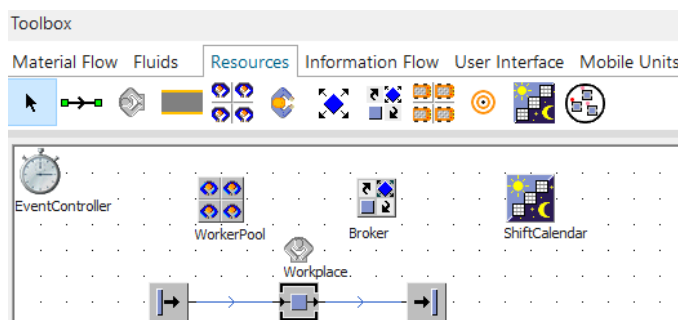
Pro složitější digitální linky *Toolbox* nabízí bloky, jako *Buffer*, *AssemblyStation* (montáž), *PickAndPlace* (podavač – robotické rameno), *Store* (sklad), *Conveyor* (dopravník) a další.



Obrázek 4.3 – Další stavební bloky ze sady *Material Flow*

*Buffer* slouží jako mezisklad a umožňuje nám vyrovnat rozdíly mezi bloky, které nemají sladěné operativní časy. Princip řazení je LIFO nebo FIFO.

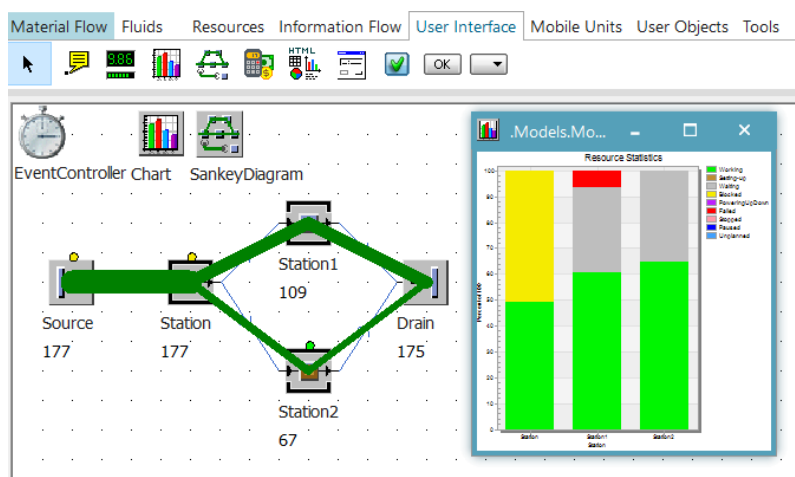
Chceme-li do modelu zahrnout i pracovníky, tak přejdeme do záložky *Resources* (zdroje), ze které vybereme *Workpalce* (pracovní místo), *WorkerPool* a *Broker*.



Obrázek 4.4 – Potřebné bloky při práci s obslužnými pracovníky

Ve *WorkerPool* se sdružují pracovníci, jenž nejsou momentálně vyžadováni na pracovištích, které jsme přiřadili ke konkrétním strojům. Komunikaci mezi pracovišti (požadavek práce) a zaměstnanci (nabídka práce) zprostředkovává *Broker*. Pro zanesení norem spotřeby práce (viz kapitola 1.4) používáme opět vyskakovací okno podobné tomu, které bylo v rámci této kapitoly již zmíněno. Další rozšiřující atributy jako plánování směn a přestávky mezi nimi umožňuje *ShiftCalendar*.

Máme-li již sestavenou linku, tak samotnou simulaci nejjednodušeji spustíme pomocí *EventController* (symbol stopek v levém horním rohu pracovního pole), ve kterém zvolíme dobu trvání a rychlost experimentu oproti reálnému času. Po provedení simulace nalezneme základní výsledky (vytíženost, blokace, vstupy, výstupy atd.) ve vyskakovacím okně (obr. 4.2) v záložce *Statistics* anebo můžeme nastavit, co se nám bude na pracovní ploše zobrazovat. Na příkladu níže (obr. 4.5) jsme zvolili počet vstupujících, obslužených a vystupujících entit ze systému, dále pak grafické znázornění práce strojů a Sankeyův diagram reflektující tok materiálu.



Obrázek 4.5 – Sankeyův diagram

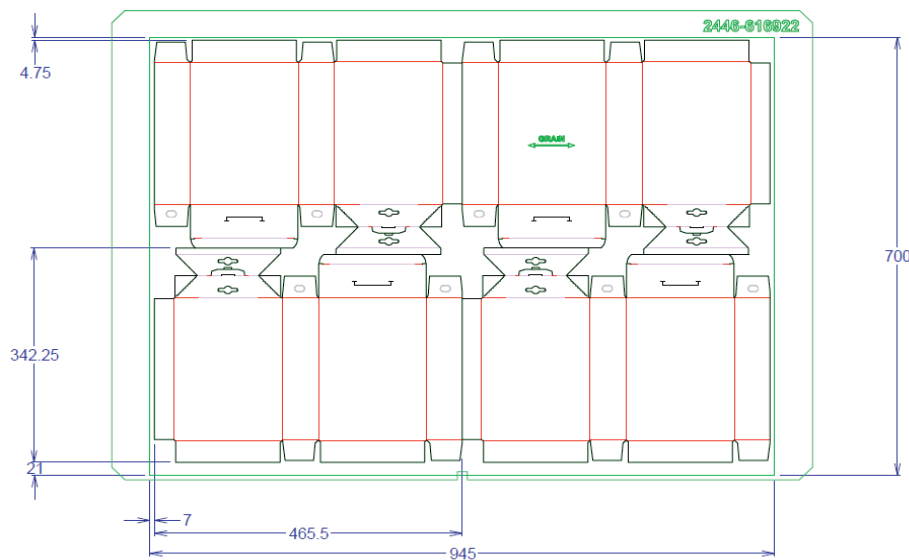
Pokud nám nevyhovují výše zmíněné a další předvolené varianty nastavení, tak tento software poskytuje možnost si naprogramovat vlastní řešení prostřednictvím jazyka *SimTalk* a tím pádem přizpůsobit digitální linku na klíč té reálné. Stejně tak můžeme pomocí vestavěného editoru měnit vzhled objektů (význam především z estetického hlediska).

## 4.2 Model výrobní linky

Výrobní postup každé zakázky v polygrafické firmě prochází třemi fázemi. Prvním krokem je příprava dat a návržení vhodné technologie (prepress). Následuje samotný tisk (press). Třetí fází je postpress, kdy záleží o jaký druh výrobku se jedná (kalendáře, komerční tisk nebo packaging).

V rámci simulace se budeme zabývat packagingem ve fázi postpress. V této části výroby je vstupem potištěný arch hladké lepenky a výstupem obal/krabička. Transformační proces zahrnuje tyto operace:

- *Tvarový výsek* – z archu jako na obr. 4.6 je vyseknut obrys každé krabičky (zde 4).
- *Výlup vnitřních částí* – například na obr. 4.6 to jsou dírký pro uchycení na euroháček.
- *Rozlam na jednotlivé kusy* – z jednoho archu dostaneme 4 užítky (krabičky).
- *Poskládání a slepení* – již každého užítku samostatně.
- *Balení do krabic* – po stanoveném počtu hotových výrobků.

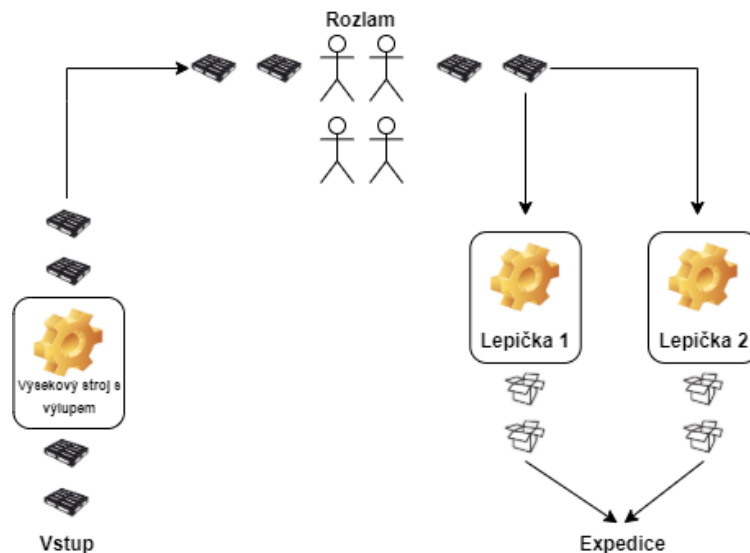


Obrázek 4.6 – Výkres rozvržení krabiček na archu

Uspořádání výrobní linky je schematicky zobrazeno na obr. 4.7. Nutno podotknout, že její samotné nastavení (časy přípravy, strojní časy atd.) se odvíjí od každé zakázky. Na jednom archu lepenky může být jak jeden druh krabičky, tak jejich kombinace. Počet užítků z každého archu se může lišit. Na složitosti výrobků bude záviset i příprava lepičky a čas na ní strávený. Z tohoto důvodu budou níže popsané časy pro zjednodušení odpovídat konkrétní zakázce pouze s jedním typem obalů. Cílem simulace bude určit potřebný čas pro její vyhotovení.

Zadání zní vyrobit 36 000 krabiček. Vstupem jsou 3 palety po 2000 potištěných arších + archy kompenzující zmetkovitost a ztráty při nastavování strojů. Polotovary jsou z palet odebírány automaticky výsekovým strojem s výlupem. Tento proces je kontinuální (palety jsou automaticky měněny). Pro sekci výseku se využívá horní výsekový nástroj (představme si jako desku s výsekovými noži) a jeho negativem je frézovaný spodní plech. Pro výlup, který je také prováděný tímto strojem, se musí do zařízení upevnit spodní výlup a horní výlup (deska s jehličkami). Instalace nástrojů a nastavení tohoto stroje trvá 90 minut. Na tento úkon je spotřebováno 20 testovacích archů. Zmetkovitost činí 0,75 % (počítáno z palet bez kompenzačních archů). Po spuštění jsou zpracované archy (1 arch za 0,9 s) vršeny na palety

(kapacita opět 2000 archů), které putují na stanoviště, kde je ručně čtyřmi pracovníky prováděn rozlam. Příprava tohoto pracoviště zabere 10 minut. Z jednoho archu zde vzniká 6 užitků a produktivita každého pracovníka je 1 zpracovaný arch za 10 s. Následuje zavezení palet s produkty z rozlamu k lepičkám, na kterých probíhá poskládání a lepení krabiček. Nastavení každé lepičky zabere 3 hodiny a pro tento účel je testováno 402 kusů. Obě lepičky zvládají vyrobit jednu krabičku za 0,36 s se zmetkovitostí 0,75 %. Proces je zakončen zabalením hotových výrobků do krabic a jejich expedicí.



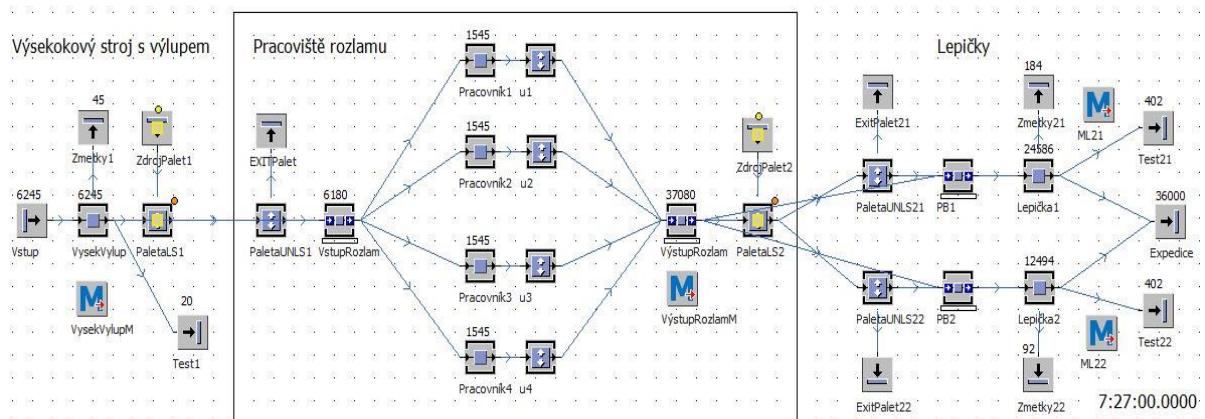
Obrázek 4.7 – Schéma části výrobní linky

Tabulka 4.1 – Potřebná data pro simulaci výrobní linky

Stroj/pracoviště	Příprava	Testovací kusy	Rychlost	Zmetkovitost
Výsekový stroj s výlupem	90 min	20 archů	0,9 s/arch	0,75 %
Rozlam	10 min	-	10 s/arch	-
Lepička 1	3 hodiny	402 užitků	0,36 s/užitek	0,75 %
Lepička 2	3 hodiny	402 užitků	0,36 s/užitek	0,75 %

### Simulace referenční zakázky

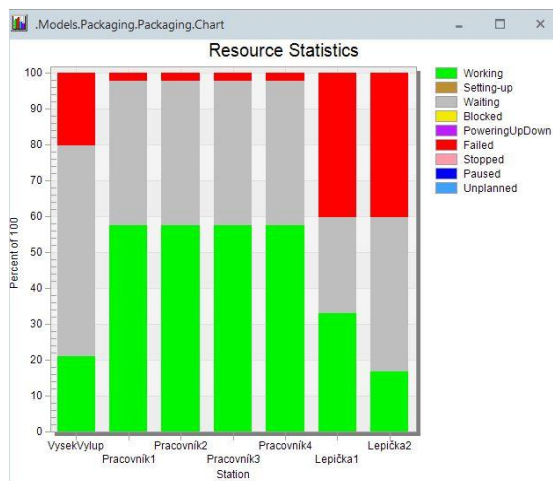
Model popsané linky výše s výrobními časy aplikovanými z konkrétní zakázky je zobrazen na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8 – Referenční model digitální linky

Na vstupu je 6245 kusů archů, které putují napřímo do *VysekVylup* (blok Station), protože zde uvažujeme kontinuální odběr. Zpracované entity pomocí programovatelné metody *VysekVylupM* nejprve proudí do bloku *Test1*, následně do *Zmetky1* a *PaletaLS1* (blok AssemblyStation). *PaletaLS1* požaduje na vstupu jeden přepravní kontejner a 2000 součástí. Tímto simulujeme skládání archů na palety. Následně takto naplněný kontejner putuje do *PaletaUNLS1* (blok DismantleStation), kde je opět vyprázdněn a použitý kontejner končí v *EXITPalet*, aby nenavyšoval množství entit v systému. Z důvodu, že v této fázi nebudou pracovníci rozlamu blokovat výsekový stroj, musíme za *PaletaUNLS1* vložit blok typu Buffer (*VstupRozlam*), který jednak vyrovná rozdíl mezi operačními časy a zároveň umožní pracovníkům odebírat entity po jedné (ne v dávce o 2000 kusech). Pojmem pracovník v tomto případě myslíme kombinaci bloků Station (např. *Pracovník1*) a DismantleStation (např. *u1*). U prvního bloku je nastaven čas přípravy stanoviště 10 minut a také čas práce na jeden arch, který je v *u1* rozložen na 6 nově vzniklých součástí (1 arch → 6 užitků). Součásti jsou shromažďovány ve *VýstupRozlam* (Buffer). Jejich další tok modelem je řízen programovatelnou metodou *VýstupRozlamM*. Nejprve tedy 36 000 jde do *PaletaLS2*. Princip je obdobný jako v případě *PaletaLS1*, akorát jsou změněny atributy požadavku entit z 2000 na 12 000. Takto naplněné kontejnery putují v poměru 50:50 k lepičkám, kde jsou opět pomocí *PaletaUNLS21* a *PaletaUNLS22* vyprázdněny. Zbylé užitky ve *VýstupRozlam* jsou řídicí metodou přerozděleny přímo do Bufferů *PB1* a *PB2* dle počtu zmetků a testovacích užitků. Výstup z lepiček je řízen metodami *ML21* a *ML22* s logikou podobnou *VysekVylupM*. Výstupem ze systému je *Expedice* (blok typu Drain).

Po proběhnutí simulace dostáváme celkový čas na zakázku 7 hodin a 27 minut doplněný o grafické znázornění vytíženosti strojů. Zelená barva znázorňuje vytíženost strojů, šedá čas po který neplnily žádné úkony a červená čas odstávky (v tomto případě zamýšleno jako přípravný čas pracoviště).



Obrázek 4.9 – Graf vytíženosti výrobních zařízení referenčního

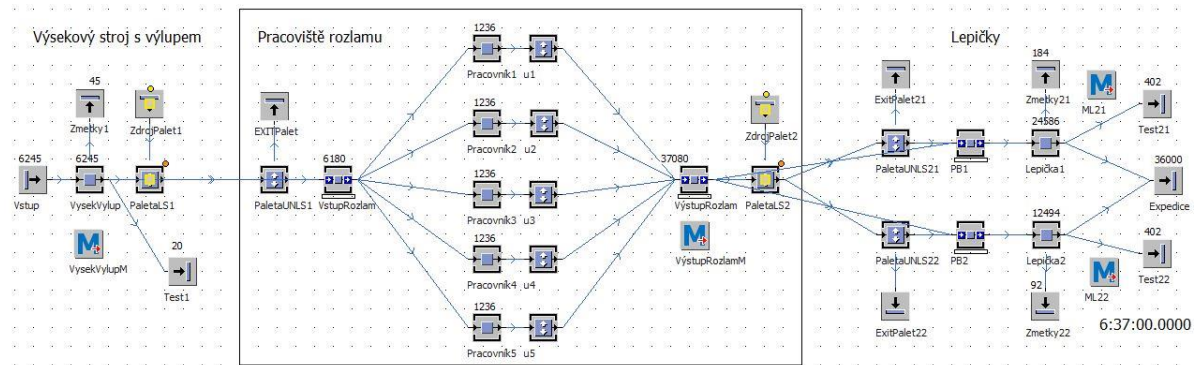
Z obrázku 4.9 tedy vyplývá, že nejvíce vytížení jsou především pracovníci (nejvyšší procesní čas) a lepička 1, která zpracovává dvě palety na rozdíl od lepičky 2 (pouze jedna paleta). Toto zjištění nás vede k uvážení optimalizace v podobě přidání jednoho pracovníka. Další možností, která by příliš neovlivnila dodatečné náklady, je snížení objemu palet na 1000 archů (6000 užitků), čímž se nejen zkrátí čas čekání na naplnění palety a odeslání na další pracoviště, ale dojde i k rovnoměrnému využití lepiček (obě po třech paletách). Třetí možností, která již není z pohledu logistiky procesů v polygrafické firmě realizovatelná (slouží spíše pro porovnání), je zavedení přímého toku do „meziskladu“ před každým stanovištěm, kdy odpadá nutnost nejprve naplnit paletu. Čtvrtou variantou, o které sama firma uvažuje, je zakoupení nového stroje, který

kromě výseku a výlupu zvládá i rozlam archů na jednotlivé užítky (nahrazuje pracoviště rozlamu).

### 4.3 Možnosti optimalizace

#### Varianta s více zaměstnanci

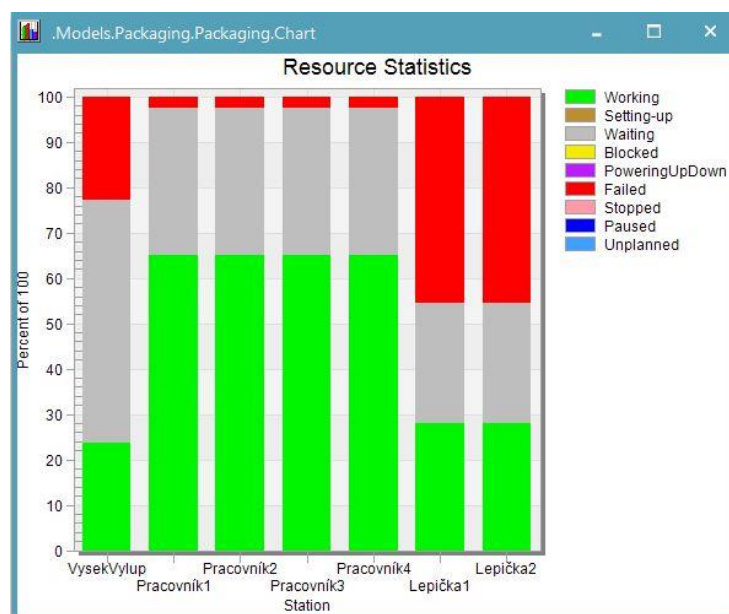
V případě přidání jednoho pracovníka na pracoviště rozlamu viz obrázek 4.10 (*Pracovník5 + u5*) s ponecháním stejných parametrů nastavení dojde k snížení celkového času zakázky na 6 hodin a 37 minut. Rozdíl oproti referenčnímu modelu tak činí 50 minut, což pravděpodobně nebude vzhledem ke vzniklým dodatečným nákladům efektivní řešení. Samotné vytížení pracovníků se sníží přibližně o 5,7 %.



Obrázek 4.10 – Varianta s více zaměstnanci

#### Varianta s poloviční kapacitou palet

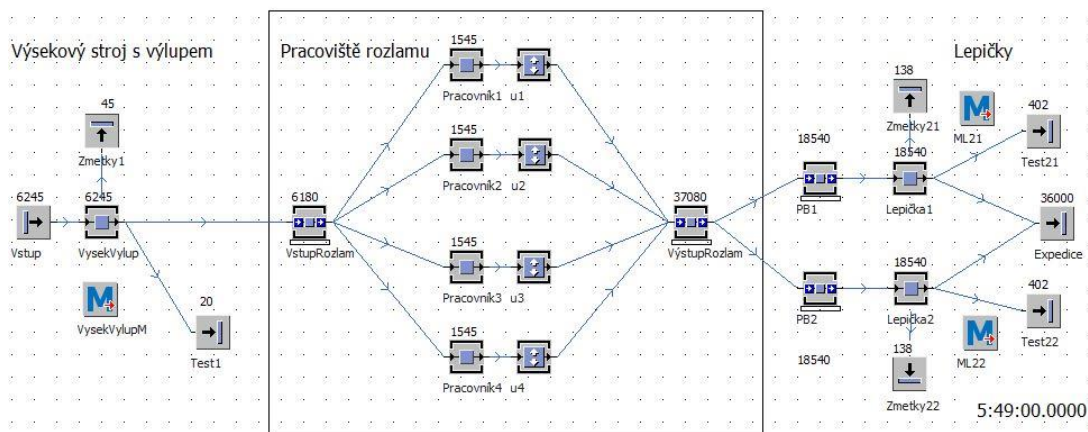
Velmi zajímavou možností optimalizace výsledného času zakázky v rámci postpressu je snížení kapacity palet na jejich polovinu. Ze tří původních tedy dostáváme šest. Touto modifikací se naplněné palety dostávají dříve na další stanoviště, a především lepičky budou pracovat na stejném počtu kusů neboli jejich vytíženost bude shodná viz obrázek 4.11. Výsledkem je konečný čas 6 hodin a 36 minut. Touto elementární úpravou se nám tedy podařilo srazit čas o nezanedbatelných 51 minut. Oproti variantě s více zaměstnanci rozlamu nám nevznikly znatelné dodatečné náklady, a přitom je úspora času větší o 1 minutu.



Obrázek 4.11 – Graf pro variantu s poloviční kapacitou palet

### Varianta bez palet s meziskladem

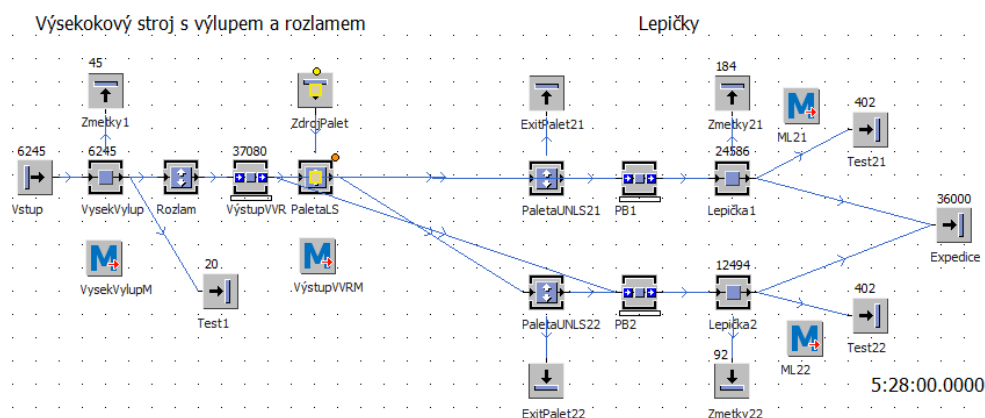
Tento příklad je vlastně modifikací předchozí varianty, akorát jsme jednu dávku snížili z poloviny na jeden kus. Výslednou digitální linku vidíme na obrázku 4.12, kde jsme odstranili veškeré bloky typu AssemblyStation a DismantleStation a předpokládáme rovnoměrné rozdělení entit při odchodu z bloku *VýstupRozlam*. Bloky typu Buffer jsou zanechány, abychom vyrovnali rozdílné procesní časy. V reálném případě by pravděpodobně tato varianta vypadala tak, že by od každého stanoviště vedl dopravník k dalšímu, kde by se příchozí archy/užitky vršily na paletu, ze které by mohly být následně ihned odebírány. Konečný čas simulace tak činí 5 hodin a 49 minut. Rozdíl oproti referenčnímu případu je markantní, ovšem jak již bylo zmíněno dříve, tato varianta je čistě hypotetická, realizovatelná pouze v případě hromadné výroby. Překážkou je především případ, kdy se na jednom archu nachází více druhů krabiček a dále pak složitost nastavení výrobních strojů, konkrétně lepiček. Zmíněné 3 hodiny platí pouze u nejjednodušších produktů. Navíc každá lepička může být využita pouze pro jeden druh užitku. Z tohoto důvodu dochází k slučování zakázek stejného typu, mimoto jsou některé užitky po rozlamu odvezeny do meziskladu a do lepičky se dostanou až po sloučení s jinou zakázkou, aby se docílilo větší efektivity a nedocházelo k prostojům způsobeným přenastavováním strojů po každé zakázce.



Obrázek 4.12 – Varianta bez palet s meziskladem

### Varianta s novým strojem

Poslední uvažovanou variantou je nákup nového výsekového stroje, který by kromě funkce výlupu zvládal i rozlam, na který nám tím pádem odpadá potřeba lidské práce. U tohoto stroje nadále uvažujeme 0,9 s na jeden arch a příprava činí 2 hodiny. Ostatní parametry (kapacita palet, lepičky, testované kusy a zmetkovitost) zůstávají nezměněny. Pozměněný model je zobrazen na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13 – Varianta s novým strojem



Výsledný čas zakázky je v tomto případě 5 hodin a 28 minut. Úspora času je zde největší (1 hodina a 59 minut) a dle grafu na obrázku 4.14 může lepička 1 po svém nastavení začít ihned skládat a lepit užítky (zelená barva přechází plynule na červenou).



Obrázek 4.14 – Graf pro variantu s novým strojem

### Zhodnocení variant optimalizace

Zjednodušený model výrobní linky v programu Tecnomatix Plant Simulation nám umožnil najít úzká místa a zvážit možné varianty optimalizace s cílem snížení výsledného času potřebného na vyhotovení zakázky. Nejeftivnějším řešením je pořízení nového stroje, který uspoří 1 hodinu a 59 minut. U této alternativy si musí firma především zanalyzovat, jaká je návratnost pořizovací investice na koupi nového výrobního zařízení se zahrnutím úspory výdajů na pracovníky rozlamu, dále rychlejšího odbytu zakázek a s tím spojených vyšších potencionálních zisků. Pro nákladovou stránku případné investiční analýzy by mohl posloužit vytvořený model za předpokladu, že bychom použili reprezentativní vzorek zakázky, pomocí vyskakovacího okna (obr.4.2) v záložce *Costs* zadali reálné či předpokládané náklady a po spuštění simulace zjistili teoretickou finanční náročnost. V případě, že by nákup stroje nebyl z jakéhokoliv důvodu možný, je další doporučenou optimalizací snížení kapacity palet na jednu polovinu, čímž dostaneme o 51 minut lepší konečný čas z důvodu snížení dávky (archů/užitků) způsobující větší plynulost výrobního cyklu. Tento postup by se dal využít i v případě varianty s novým strojem, což by vedlo k další úspoře. Obměna s navýšeným počtem zaměstnanců rozlamu není doporučována, jelikož ušetřený čas odpovídá variantě s nižší kapacitou palet, u které budou případné dodatečné náklady nižší.

Tabulka 4.2 – Přehled variant optimalizace

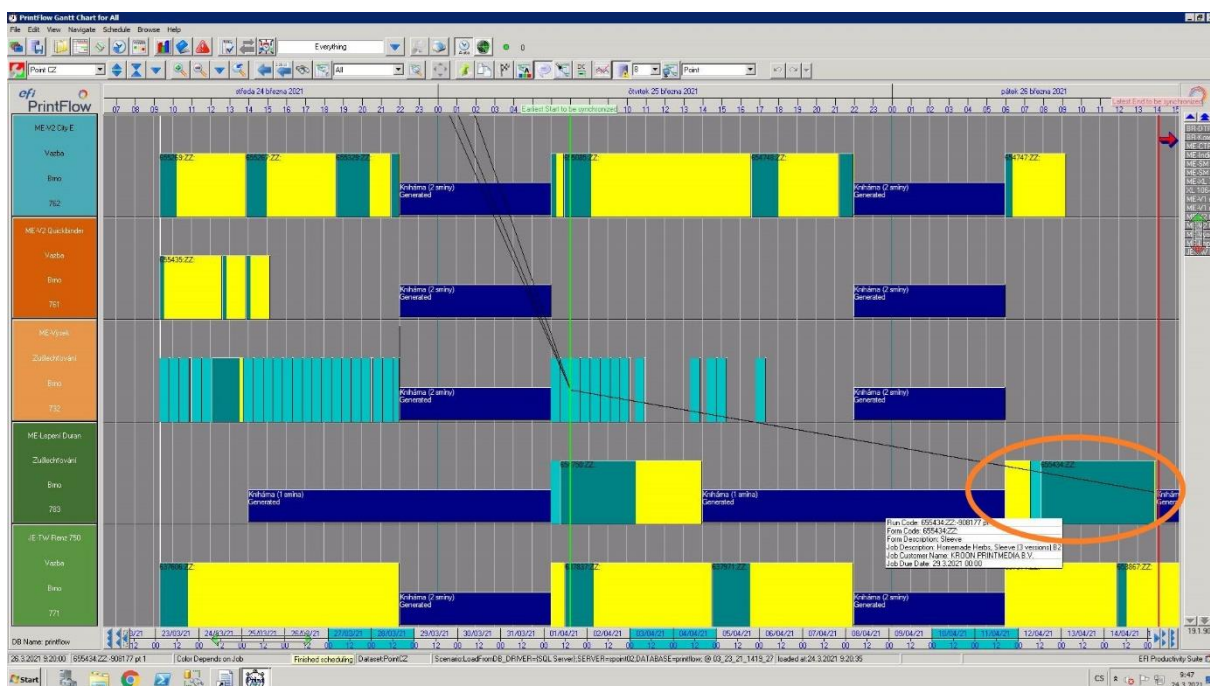
Varianta	Výsledný čas [hh : mm : ss]	Časová úspora [hh : mm : ss]	Časová úspora [%]	Dodatečné náklady [-]
Referenční	7:27:00	-	-	-
Více zaměstnanců	6:37:00	0:50:00	11,19 %	Ano
Poloviční kap. pal.	6:36:00	0:51:00	11,41 %	Ne
Bez palet	5:49:00	1:38:00	21,92 %	Ano
Nový stroj	5:28:00	1:59:00	26,62 %	Ano

#### 4.4 Průmysl 4.0 a POINT CZ

Dle konceptu chytré továrny (viz kapitola 2.2) má POINT CZ zavedený výrobní informační systém *Pace* od společnosti EFI přizpůsobený pro polygrafický průmysl, který zajišťuje komplexní integraci výrobního procesu. Tento systém dokáže efektivně řídit klíčové provozní činnosti jako například předběžné kalkulace, plánování, nákup, sběr dat z pracovišť, účetnictví, reporty a analýzy. Z pohledu této práce pro nás bude zajímavý integrovaný modul *PrintFlow* systému *Pace*. Ten je určený k dynamickému plánování a optimalizaci zdrojů. Výstupy z něj budou dány do kontrastu se simulací zakázky pomocí programu Tecnomatix Plant Simulation popsané výše. Princip modulu *PrintFlow* je postaven na *Teorii globální optimalizace (TGO)*, která tisk a packaging považuje za jedinečný výrobní proces skládající se ze série provázaných vazeb. Pouze část z nich má za následek omezení výrobní kapacity, doručení na čas a náklady. Podle této teorie jsme schopni identifikaci a následným odstraněním či kontrolou těchto faktorů zvýšit jak výrobní kapacity, tak i zisky. Nezaměřujeme se tedy v rámci optimalizace pouze na konkrétní pracovní úkony, ale přistupujeme k celému výrobnímu procesu globálně. Přejdeme-li k funkčnosti, tak tento software automaticky načítá nové úlohy, určuje optimální produkční cestu, v reálném čase synchronizuje a udává sekvenci úkonů dle charakteristik úloh či omezení produkce a vytváří aktuální automatizované run listy pro všechny pracovní centra. Pro uživatele je především důležitý aktuální přehled výroby a stav plánů (může zahrnovat i externí služby), které je možné dynamicky měnit dle upozornění na konflikty (princip semaforu) [23].

Pro lepší pochopení automatizace výroby a dynamického plánování si nyní uvedeme příklad. Plánovací modul *PrintFlow*, který má data z *Pace* (o výrobě, zakázkách, dodacích termínech, ...), si určí jak a které zakázky přijdou do výsekového stroje. Předpokládejme, že jako první vybere zakázku, u které hrozí (na základě odhadu potřebného času na další operace) zpoždění. Dále si načte stav strojů a zjistí, že nejsou nastaveny pro daný typ výrobků, takže si vyžádá jejich přípravu. Jakmile výsekový stroj podá hlášení *připraven*, je požadováno přistavení palet s vybranou zakázkou k výseku. Jelikož bude tato zakázka zpracována dříve, než dojde k nastavení lepiček, tak *PrintFlow* vybere další zakázku, která má společné znaky se zakázkou právě zpracovanou, tudíž může být obsloužena lepičkou se stejným nastavením. Následkem tohoto kroku se nestane výsekový stroj nevyužívaným a zkrátí se čas přípravy na jednotlivé zakázky. Pokud do systému přijde nová informace ohledně stavů výrobních zařízení, či možném zpoždění některé ze zakázek při dosavadním plánu, dojde k okamžitému přeplánování výroby tak, aby se stala maximálně efektivní. Zde jsou rozdíly oproti námi simulované lince, kde se stroje po zpracování všech palet stávají nevyužívanými, proto by takto zjištěný výsledný čas odpovídal pouze první vstupující objednávce. Za předpokladu slučování zakázek a dynamickému řízení výroby, bude u sloučené zakázky výsledný čas kratší. Dále může dojít k variantě, že lepička 1 bude pracovat na jednom druhu užitku a druhá na jiném. Výsledný čas konkrétní objednávky může být tedy sice delší, ale nebudou se muset přenastavovat obě lepičky zároveň, čímž by docházelo k celkovému zpoždění výroby.

Na obrázku 4.15 je ukázka aktuálního stavu/plánu výroby, kdy každý řádek charakterizuje určitou operaci. Tmavě modré bloky označují úsek, po který není na pracovišti přítomná žádná směna nebo daný stroj není v provozu. Ostatní bloky informují o konkrétních úkonech (např. příprava stroje, testovací archy, práce na zakázce atd.) a druhu výrobku. Pokud kurzorem klikneme na některý z bloků (na obrázku 4.15 tmavě zelený v oranžovém kroužku pro řádek lepení), tak se nám zobrazí popisné informace. Zelená a červená svislá čára udávají čas, kdy daná operace může nejdříve začít či nejpozději skončit tak, aby byl daný plán synchronizovaný. Dojde-li k překročení těchto čar, tak *PrintFlow* provede přeplánování.



Obrázek 4.15 – Výstup z *PrintFlow*

Za účelem zlepšování a zeštíhlování výroby vytváří *Pace* na základě všech vstupujících informací analýzy, reporty a podrobný výpočet a rozbor vybraných ukazatelů. Jedním z důležitých ukazatelů je například OEE (Overall equipment effectiveness) neboli *celková efektivnost zařízení*. OEE napomáhá snižovat nalezené ztráty a zlepšovat výkon a kvalitu výroby, jelikož dává do poměru užitečný čas zařízení a disponibilní čas zařízení. Užitečným časem je myšlen disponibilní čas snížený o čas přípravy, manipulace, poruchy, nečekaného zastavení stroje atd. Modifikací jeho složek se snažíme zvýšit hodnotu OEE udávanou v procentech [24]. Díky implementaci Průmyslu 4.0 jsou statistiky sdíleny nejen na podnikové úrovni, ale i celosvětově. Na obrázku 4.17 můžeme vidět, jakou efektivitu má stroj Heidelberg Speedmaster XL 160 (obr. 4.16) v POINT CZ v porovnání s jinými firmami v Evropě během určitého časového období.



Obrázek 4.16 – Heidelberg Speedmaster XL 160 [25]



Obrázek 4.17 – Produktivita stroje v rámci Evropy

Výšečový graf ukazuje rozdělení výroby dle druhu zakázek (šedá barva – nezařaditelné) a graf níže čistou produktivitu (očistěnou o zmetky, testovací kusy atd.) v závislosti na provozních hodinách všech strojů Speedmaster XL 106 v Evropě (modrá tečka – POINT CZ).

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo popsat základní pojmy Průmyslu 4.0 ve vztahu k výrobnímu procesu a na vlastním zjednodušeném modelu výrobní linky ukázat jeho možnosti. Z tohoto důvodu byl v teoretické části nejprve představen pojem výrobní proces. Snahou práce bylo popsat tuto oblast obecně, jelikož o každém výrobním procesu lze říct, že je něčím unikátní a jedinečný. Důraz byl kladen na standardizaci, na jejíž základě je tvořena normativní základna provozních činností, které ať už podnikové či (nad)národní normy jednoznačně a přehledně popisují. Poté byla věnována pozornost konceptu Průmyslu 4.0 a pojmům s ním spojeným. Především důležité bylo pojetí chytré továrny a s ní svázané koncepce digitální linky. V praktické části pak byl tvořen její zjednodušený model. Závěr teoretické části byl ještě věnován teorii front, protože žádný výrobní proces není dokonale plynulý a v některé z jeho částí bude zákonitě docházet ke kumulaci objektů. K řešení této problematiky slouží jak analytické modely, tak simulační software.

Pro tvorbu digitální linky byl vybrán simulační software Tecnomatix Plant Simulation, ve kterém byla část reálné výrobní linky v polygrafické firmě POINT CZ namodelována. Konkrétně výsekový stroj s výlupem, stanoviště rozlamu a lepičky. Vstupem jsou potištěné archy, ze kterých jsou pomocí několika operací vyrobeny krabíčky. Účelem první simulace bylo zjistit potřebný čas na vyhotovení referenční zakázky. Ze získaných údajů a grafu byly určeny úzká místa a navrhnuty možné řešení optimalizace. Jako nejvýhodnější, z pohledu úspory času, vyšla alternativa s novým strojem následovaná snížením kapacity palet neboli snížení postupové dávky vedoucí k větší plynulosti procesu. Naopak jako nevýhodná se jevila varianta s více zaměstnanci, neboť konečný čas byl téměř identický, jako v případě poloviční kapacity palet. Pro doplnění byla ještě vytvořena varianta, u které zpracované archy/užitky putují přímo k dalšímu stanovišti. Ta bohužel není z logistických důvodů realizovatelná a výsledný čas je horší než u modelu s novým strojem. Před koupí nového stroje je ovšem doporučeno zpracovat investiční analýzu, kdy pro odhadnutí teoretických nákladů by mohl při určité modifikaci posloužit v této práci představený model. Na jeho základě byly demonstrovány možnosti, které tvorba digitálního dvojčete přináší. Simulace umožňuje navrhnout způsoby optimalizace a následně ověřit, jaké následky bude mít daná varianta. Model zároveň usnadňuje přípravu nově vznikající linky (popř. její obměnu) a napomáhá zjistit, zda je pro firmu realizovatelná. Případně na jejím virtuálním modelu odhalit úzká místa a optimalizovat ji ještě před tím, než bude postavena. Tento fakt má za následek především úsporu času, nákladů a celkově větší efektivitu a ziskovost. Aby práce nepojednávala o Průmyslu 4.0 pouze teoreticky a hypoteticky, tak byla doplněna o příklad z praxe. POINT CZ využívá výrobní informační systém, který dle konceptu chytré továrny a za využití technologií (internet věcí, cloud computing, systémová integrace, automatizace atd.), které Průmysl 4.0 přináší, dokáže řídit celý podnik. Především plánovací modul PrintFlow na základě informací od výrobních zařízení, dat zadaných do systému a dalších charakteristik dokáže dynamicky plánovat výrobu tak, aby došlo k co největší časové úspoře, efektivitě a byly dodrženy veškeré termíny. Dokáže si tedy, stejně jako představený model vypočítat výsledný čas na zhotovení zakázky a v souvislosti s dalšími operacemi určit adekvátní nastavení strojů, souslednost zakázek a intervaly, ve kterých musí být vyhotovena. Tento proces probíhá na celopodnikové úrovni.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SVOBODOVÁ, Hana a Jaromír VEBER. *Produktový a provozní management: [Product and operation management]*. 2. vyd. Praha: Oeconomica, 2006. ISBN 80-245-1083-9.
- [2] KEŘKOVSKÝ, Miloslav. *Moderní přístupy k řízení výroby*. Praha: C.H. Beck, 2001. C.H. Beck pro praxi. ISBN 80-7179-471-6.
- [3] TOMEK, Gustav a Věra VÁVROVÁ. *Integrované řízení výroby: od operativního řízení výroby k dodavatelskému řetězci*. Praha: Grada, 2014. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4486-5.
- [4] JUROVÁ, Marie. *Výrobní a logistické procesy v podnikání*. Praha: Grada Publishing, 2016. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-5717-9.
- [5] POČTA, Jan. *Řízení výrobních procesů: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2589-2.
- [6] MAŘÍK, Vladimír. *Průmysl 4.0: výzva pro Českou republiku*. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0.
- [7] LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration* [online]. 2017, 6, 1-10 [cit. 2020-11-17]. ISSN 2452-414X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- [8] FRANK, Alejandro Germán, Lucas Santos DALENOGARE a Néstor Fabián AYALA. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics* [online]. Elsevier B.V, 2019, 210, 15-26 [cit. 2020-11-17]. ISSN 0925-5273. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- [9] SNIDERMAN, Brenna, Monika MAHTO a Mark COTTELEER. Industry 4.0 and manufacturing ecosystems: Exploring the world of connected enterprises [online]. 23 February 2016 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/manufacturing-ecosystems-exploring-world-connected-enterprises.html>
- [10] LEE, So-Eun, Mideum CHOI a Seongcheol KIM. How and what to study about IoT: Research trends and future directions from the perspective of social science. *Telecommunications Policy* [online]. Elsevier, 2017, 41(10), 1056-1067 [cit. 2020-11-17]. ISSN 0308-5961. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.09.007>
- [11] CAESARENDRA, Wahyu, Tomi WIJAYA, Daryl LEE, Tegoeh TJAHJOWIDODO a David THEN. An AWS Machine Learning-Based Indirect Monitoring Method for Deburring in Aerospace Industries Towards Industry 4.0. *Applied sciences* [online]. MDPI, 2018, 8(11), 2165 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app8112165>
- [12] KÁDÁR, Botond, Walter TERKAJ a Marco SACCO. Semantic Virtual Factory supporting interoperable modelling and evaluation of production systems. *CIRP Annals* [online]. Elsevier, 2013, 62(1), 443-446 [cit. 2020-11-23]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850613000462>

- [13] GROSS, Donald a Donald GROSS. *Fundamentals of queueing theory*. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, c2008. ISBN 978-0-471-79127-0.
- [14] KOŽÍŠEK, Jan a Barbora STIEBEROVÁ. *Statistická a rozhodovací analýza*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05509-0.
- [15] ADAN, Ivo a Jacques RESING. *Queueing theory: Ivo Adan and Jacques Resing*. Eindhoven, Eindhoven University of Technology. Department of Mathematics and Computing Science [online]. 2011. [cit. 2021-2-9]. Dostupné z: <https://wwwhome.ewi.utwente.nl/~scheinhardtwrw/queueingdictaat.pdf>
- [16] COOPER, Robert B. *Introduction to queueing theory*. 2. North Holland: Elsevier, 1981, ISBN 978-04-440-0379-9.
- [17] Trénink a rozvoj zaměstnanců v průmyslu 4.0. *Manpower* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.manpower.cz/manpower/cs/trenink-a-rozvoj-zamestnancu-v-prumyslu-4-0/>
- [18] SIMUL8 Corporation. 2019. *Accessing and analyzing results | SIMUL8 video tour*. YouTube video. [cit. 2021-2-14]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=0kkpIQZ77Hg&ab\\_channel=SIMUL8Corporation](https://www.youtube.com/watch?v=0kkpIQZ77Hg&ab_channel=SIMUL8Corporation)
- [19] *Arena simulation software* [online]. Rockwell Automation: ©2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.arenasimulation.com/>
- [20] *Simul8* [online]. Simul8 Corporation: ©2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.simul8.com/>
- [21] Use plant simulation and throughput optimization to improve manufacturing performance. *Siemens Digital Industries Software* [online]. Siemens: ©2021 [cit.2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html>
- [22] *Point print & packaging expert* [online]. POINT CZ: ©2021 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.pointcz.com/cs/>
- [23] *EFI PrintFlow* [online]. Electronics For Imagine: ©2021 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.efi.com/products/productivity-software/scheduling/efi-printflow/overview/?r=n>
- [24] OEE (Overall equipment effectiveness) - Celková efektivnost zařízení. *ManagementMania.com* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/oeo-overall-equipment-effectiveness-celkova-efektivnost-zarizeni>
- [25] *The ultimate printing press Speedmaster XL 106* [online]. Heidelberg Druckmaschinen AG: ©2021 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: [https://www.heidelberg.com/global/en/products/offset\\_printing/format\\_70\\_x\\_100/speedmaster\\_xl\\_106/product\\_information\\_12/product\\_information\\_20.jsp](https://www.heidelberg.com/global/en/products/offset_printing/format_70_x_100/speedmaster_xl_106/product_information_12/product_information_20.jsp)
- [26] *FindAir ONE* [online]. Findair Sp. z o.o.: ©2021 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://findair.eu/products/findair-one.html>

## **SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<i>E(L)</i>	Průměrný počet zákazníků v systému
<i>E(S)</i>	Průměrná doba pobytu zákazníků v systému
$\lambda$	Průměrný počet zákazníků vstupujících do systému za jednotku času
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>CPS</i>	Cyber-Physical System
<i>SCADA</i>	Supervisory Control and Data Acquisition
<i>MES</i>	Manufacturing Execution Systems
<i>ERP</i>	Enterprise Resource Planning
<i>SW</i>	Software
<i>FIFO</i>	First in, first out
<i>LIFO</i>	Last in, first out
B2C	Business to consumer
B2B	Business to business
TGO	The Theory of Global Optimization
OEE	Overall equipment effectiveness



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 – Obecné schéma výrobního procesu [3].....	12
Obrázek 1.2 – Struktura normativní základny provozních činností [1] .....	14
Obrázek 1.3 – Struktura pracovního času [1] .....	15
Obrázek 2.1 – Koncept průmyslu 4.0 [17] .....	17
Obrázek 2.2 – Princip chytré továrny [4] .....	19
Obrázek 2.3 – Ukázka simulace v sw společnosti Simul8 [18] .....	19
Obrázek 2.4 – Chytrý inhalátor FindAir ONE [26].....	20
Obrázek 3.1 – Schéma tvorby fronty [13] .....	21
Obrázek 3.2 – Sériové a paralelní zapojení serverů [13].....	22
Obrázek 3.3 – Ukázka modelování security line na letišti [19].....	23
Obrázek 3.4 – Ukázka vizualizace spotřeby energie [21] .....	24
Obrázek 4.1 – Základní stavební bloky v sw Tecnomatic Plant Simualtion.....	25
Obrázek 4.2 – Vyskakovací okno pro výrobní zařízení .....	26
Obrázek 4.3 – Další stavební bloky ze sady Material Flow .....	26
Obrázek 4.4 – Potřebné bloky při práci s obslužnými pracovníky.....	26
Obrázek 4.5 – Sankeyův diagram.....	27
Obrázek 4.6 – Výkres rozvržení krabiček na archu.....	28
Obrázek 4.7 – Schéma části výrobní linky .....	29
Obrázek 4.8 – Referenční model digitální linky .....	29
Obrázek 4.9 – Graf vytíženosti výrobních zařízení referenčního modelu.....	30
Obrázek 4.10 – Varianta s více zaměstnanci.....	31
Obrázek 4.11 – Graf pro variantu s poloviční kapacitou palet.....	31
Obrázek 4.12 – Varianta bez palet s meziskladem.....	32
Obrázek 4.13 – Varianta s novým strojem .....	32
Obrázek 4.14 – Graf pro variantu s novým strojem .....	33
Obrázek 4.15 – Výstup z PrintFow .....	35
Obrázek 4.16 – Heidelberg Speedmaster XL 160 [25] .....	35
Obrázek 4.17 – Produktivita stroje v rámci Evropy .....	36

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 4.1 – Potřebná data pro simulaci výrobní linky .....	29
Tabulka 4.2 – Přehled variant optimalizace .....	33

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Simulace.zip