

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

NÁVRH SYSTÉMU PLÁNOVÁNÍ VÝROBY PRO  
VÝROBNÍ SYSTÉMY KOMBINUJÍCÍ ADITIVNÍ A  
KONVENČNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY

PRODUCTION PROCESS PLANNING IN ADDITIVE  
MANUFACTURING AND CONVENTIONAL MACHINING  
TECHNOLOGY MANUFACTURING SYTEM

**Autor:** Bc. Michal Kaňák

**Studijní program:** Strojní inženýrství

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Kellner

**Praha 2019**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kaňák** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **438603**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh systému plánování výroby pro výrobní systémy kombinující aditivní a konvenční technologie výroby**

Název diplomové práce anglicky:

**Production Process Planning in Additive Manufacturing and Conventional Machining Technology Manufacturing System**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše problematiky plánování výroby
2. Rešerše výrobních technologií
3. Návrh výrobního systému
4. Simulace výrobního systému
5. Technicko-ekonomické zhodnocení variant

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Tomáš Kellner, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce:

Ing. Tomáš Kellner  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

23.4.2019

Datum převzetí zadání

Kaňák

Podpis studenta

### ***Prohlášení***

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.*

*Datum.....*

*Podpis .....*

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Tomáši Kellnerovi za jeho odbornou pomoc, ochotu a rady, které mi poskytl při tvorbě této diplomové práce. Poděkování patří též Ing. Pavlu Scholzovi z Ústavu řízení a ekonomiky podniku fakulty strojní ČVUT v Praze, který mi dokázal poskytnout cennou radu při vytváření simulačního modelu.

## **Anotace**

Cílem předkládané diplomové práce je vytvoření simulačního modelu výrobního systému digitální továrny, který využívá aditivní technologie (DMLS 3D tisk) společně s konvenčními (omílání, CNC obrábění). Mezi hlavní výhody aditivních technologií patří jejich všestranné použití, ale na druhou stranu musí být splněny různé požadavky například na plánování výroby, spotřebu výrobní plochy nebo údržbu, což může ovlivnit celý výrobní systém. Vytvořený simulační model ukazuje náchylnost výrobního systému na změnu jednotlivých parametrů (směnnost, kapacita mezikladů, logistika výrobků a obsluha strojního zařízení) a vytvořené varianty simulačního modelu se pokouší simulační model optimalizovat a přiblížit k reálnému výrobnímu systému.

## **Klíčová slova**

Aditivní technologie, DMLS, kapacitní propočty, plánování, Plant Simulation, simulace, výrobní proces, výrobní systém

## **Abstract**

The aim of this thesis is to create a simulation model of a digital factory production system that uses additive technology (DMLS 3D printing) together with conventional (tumbling, CNC machining). The main advantages of additive technologies are their versatile use, but on the other hand, different requirements such as production planning, production area consumption or maintenance must be met, which can affect the entire production system. The simulation model shows the susceptibility of the production system to changing individual parameters (shiftability, storage capacity, product logistics, and machinery operation) and the simulation model created attempts to optimize the simulation model and approach the real manufacturing system.

## **Key words**

Additive Technology, Capacity Calculations, DMLS, Planning, Plant Simulation, Production Process, Production System, Simulation

# Obsah

1	Úvod.....	8
2	Technologické plánování .....	9
2.1	Výrobní systém .....	9
2.2	Výrobní proces.....	9
2.2.1	Technické hledisko.....	9
2.2.2	Hledisko opakovatelnosti výroby.....	10
2.2.3	Hledisko plynulosti výroby .....	12
2.2.4	Hledisko výrobních etap .....	13
2.2.5	Časové hledisko .....	14
2.3	Kapacitní propočty .....	14
2.4	Technologická standardizace .....	15
2.5	Pracovní normy .....	16
2.6	Spotřeba času ve směně .....	18
2.6.1	Tvorba snímků dne.....	21
2.7	Rozmístění strojů a pracovišť .....	22
2.7.1	Volné uspořádání strojů a pracovišť .....	23
2.7.2	Technologické uspořádání strojů a pracovišť .....	23
2.7.3	Předmětné uspořádání strojů a pracovišť .....	24
2.7.4	Modulární uspořádání strojů a pracovišť .....	24
2.7.5	Buňkové a hnízdové uspořádání strojů a pracovišť .....	25
2.7.6	Kombinované uspořádání strojů a pracovišť.....	25
2.8	Tvorba layoutů .....	25
2.8.1	Postup při tvorbě layoutu .....	26
2.9	Aditivní technologie.....	27
3	Simulace .....	29
3.1	Dělení simulace.....	29
3.2	Simulační softwary.....	30
3.3	Plant Simulation .....	30

4	Návrh modelu digitální továrny .....	32
4.1	Pracovní prostředí simulačního softwaru Plant Simulation .....	32
4.2	Vstupní data modelu .....	39
4.2.1	Kapacitní propočty .....	39
4.2.2	DMLS tisk.....	42
4.2.3	Apretace a řezání artefaktů.....	42
4.2.4	Tepelné zpracování .....	42
4.2.5	Omílání.....	43
4.2.6	Obrábění.....	43
4.2.7	Výstupní kontrola.....	43
4.3	Nastavení směnnosti.....	43
4.3.1	Směna 1 .....	44
4.3.2	Směna 2 .....	44
4.3.3	Směna 3 .....	44
4.4	Materiálové toky .....	45
5	Simulace modelu .....	46
5.1	Varianta 1 .....	46
5.2	Varianta 2.....	53
5.3	Varianta 3.....	58
5.4	Varianta 4.....	63
6	Technicko-ekonomické zhodnocení variant.....	71
7	Závěr.....	77
8	Seznam použitých zkratk.....	78
9	Bibliografie.....	79
10	Seznam obrázků .....	81
11	Seznam tabulek.....	83

## 1 Úvod

Cílem práce je vytvoření simulačního modelu výrobního systému digitální továrny, ve kterém jsou použity aditivní i konvenční technologie. Na základě vytvořeného simulačního modelu bude popsán vliv jednotlivých parametrů na jeho chování. V úvodní části práce je vypracována rešerše problematiky plánování a simulace výrobních systémů.

V praktické části diplomové práce je podrobně popsán proces vytváření simulačního modelu výrobního systému, kdy byly aplikovány informace z rešeršní části. Nejprve bude popsán navržený výrobní systém digitální továrny (materiálové toky, kapacitní propočty) a poté vytvořené varianty simulačního modelu.

Budou vytvořeny celkem 4 varianty simulačního modelu, které budou postupně optimalizovány tak, aby se co nejvíce přiblížily k reálnému výrobnímu systému. Na základě simulací by měla být odhalena úzká místa výrobního procesu. Aby bylo možné pozorovat vliv jednotlivých změn na sledované parametry, bude stěžejní ponechat stejná vstupní data modelu (výrobní a dávkové časy a velikost dávek), které budou použity v kapacitních propočtech.

V procesu optimalizace simulačního modelu budou postupně do simulačního modelu zakomponovány logistické prvky a obsluha strojního zařízení. Finální varianta simulačního modelu by měla podat komplexní informaci o tom, jak by mohl vypadat simulační model reálného výrobního systému při použití konvenčních technologií v návaznosti na aditivní technologie.

V závěrečné části diplomové práce bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, kdy dojde k porovnání vytvořených variant z hlediska optimalizace simulačního modelu (upravení směnnosti a kapacity bufferů, přidání logistických prvků a zakomponování obsluhy strojního zařízení), ale také z hlediska výrobních nákladů. Ve finální variantě budou zakomponovány na pracoviště výstupní kontroly kolaborativní roboty a bude nutné spočítat návratnost investice. Ekonomická část zhodnocení by měla určit výrobní náklady na výrobu jednoho artefaktu a zhodnotit, zda je ekonomicky přijatelné artefakty vyrábět pomocí aditivních technologií či nikoliv.



## 2 Technologické plánování

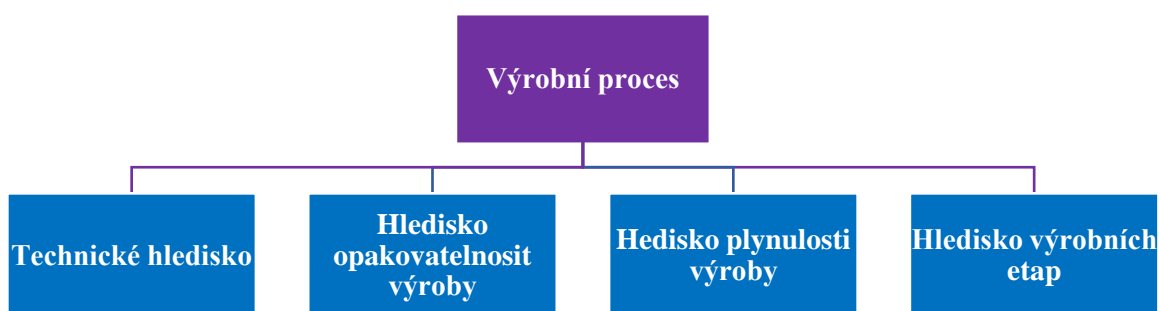
Technologickým plánování se podniky snaží dosáhnout a udržet efektivnost výroby v závislosti na dynamice výrobního procesu (probíhající změny v čase). Technologické plánování lze definovat jako tvůrčí činnost technicko-ekonomického charakteru, která je zaměřena na analýzu, plánování, návrh a zpracování podmínek pro efektivní využití zdrojů (materiál, finance, prostor, pracovní síla). Technologické plánování má za úkol zjednodušit vnitropodnikové informační toky, zvýšit využití (časové, výkonové a funkční) strojů a zařízení, snížení průběžné doby výroby (tj. zlepšení podmínek organizace). Je důležité klást důraz na projektování výrobních procesů a systémů proto, že se zvyšuje síla konkurence a také kvůli rostoucím požadavkům zákazníků, kteří chtějí obdržet výrobky co nejdříve. [1], [2] [3]

### 2.1 Výrobní systém

Výrobní systém je považovat za souhrn všech činností, jehož cílem je přeměna vstupů na výstupy podle předem stanovených požadavků. Mezi hlavní prvky v tomto procesu patří materiál a informace, které jsou charakterizovány materiálovým a informačním tokem. Pro naplnění základních předpokladů konkurenční úspěšnosti musí podnik dodávat vysokou kvalitu, v přijatelných nákladech a vždy ve "správný čas" - proto je rozhodující správné nastavení organizačního a hmotného uspořádání výrobního procesu. [4]

### 2.2 Výrobní proces

Výrobní proces je možné chápat jako přeměnu vstupů (materiál, kapitál, práce) na výstupy (výrobky, služby) při dodržení určitých postupů (technologických, montážních) (Obr. 1). Zjednodušeně lze výrobní proces pochopit jako přeměnu materiálu či polotovaru na finální výrobek. Výrobní proces lze dělit podle několika hledisek (technické hledisko, hledisko opakovatelnosti výroby, hledisko plynulosti výroby, hledisko výrobních etap a časové hledisko). [5] [6]

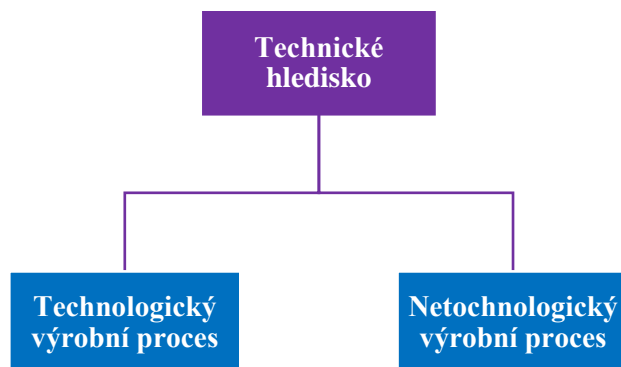


Obr. 1 Dělení výrobního procesu [6]

#### 2.2.1 Technické hledisko

V tomto hledisku jsou zjišťovány typy zařízení, strojů a nástrojů, které jsou potřebné k vnějším či vnitřním změnám výrobku. Na základě technického hlediska je možné dále rozdělit výrobní proces na technologický

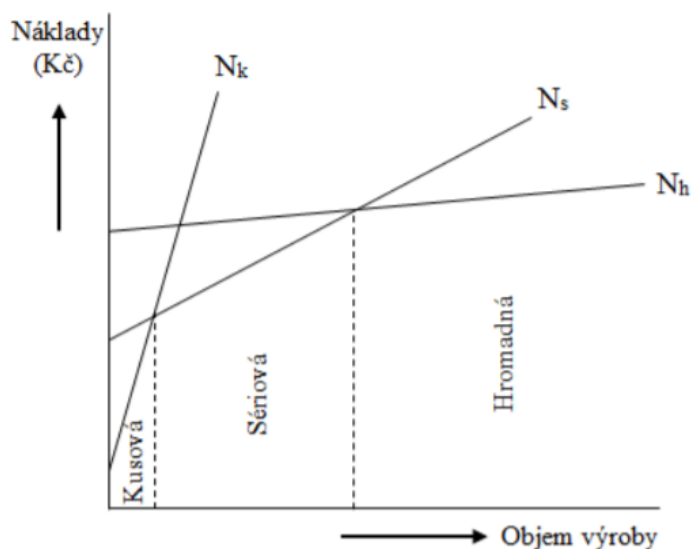
a netechnologický. Technologický proces zjišťuje, jakým způsobem jsou upraveny vstupy (materiál, polotovary), aby vyhotovený výrobek splňoval požadované parametry (vnější tvarové změny, vnitřní strukturní a chemické změny. Na druhou stranu u netechnologického procesu nedochází k přímé změně vstupů (manipulace, kontrola délkových a tvarových rozměrů, kontrola kvality povrchu). [2] [6]



Obr. 2 Dělení výrobního procesu podle technického hlediska [6]

### 2.2.2 Hledisko opakovatelnosti výroby

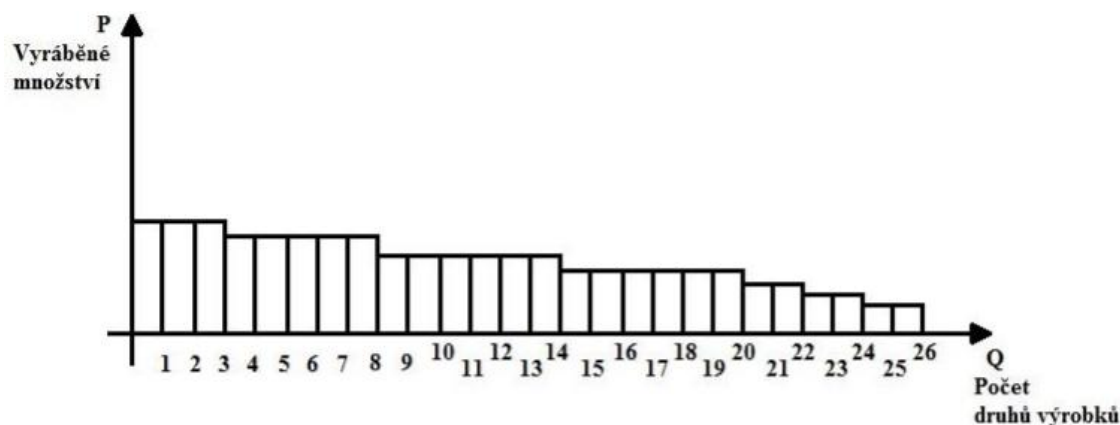
Toto hledisko je děleno podle množství a podle počtu typů (druhů) výrobků, které jsou produkovány během určitého časového období, ale také podle sériovosti výroby. Na Obr. 3 je znázorněn graf, který ukazuje závislost nákladů jednotlivých typů výroby na objemu výroby ( $N_k$  – náklady kusové výroby,  $N_s$  – náklady sériové výroby,  $N_h$  – náklady hromadné výroby). Další dělení výrobního procesu dle tohoto podkritéria je členění na kusovou, sériovou a hromadnou výrobu. [5] [7]



Obr. 3 Závislosti nákladů a objemu výroby [6]

### Kusová výroba

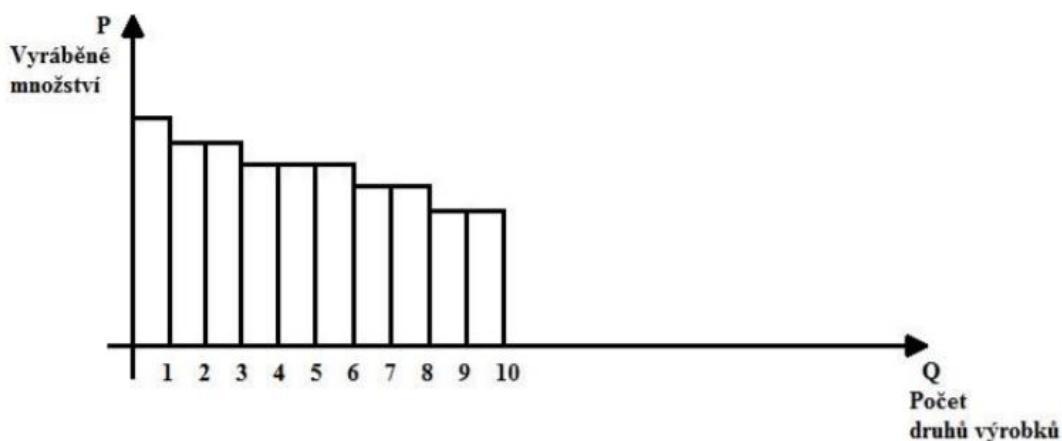
Kusová výroba je typická velkým počtem vyráběných druhů výrobků, ale v poměrně malém množství (Obr. 4). Používají se především univerzální stroje a jsou kladeny velké požadavky na přípravu výroby a kvalifikaci obsluhy, protože část výroby může být ruční (vyznačuje se malou produktivitou práce). U kusové výroby je možné vyhovět individuálním přání zákazníka. [7]



Obr. 4 P-Q diagram kusové výroby [7]

### Sériová výroba

Sériová výroba se vyznačuje poměrně malým počtem druhů vyráběných výrobků, ale ve větším množství (Obr. 5). Výroby jsou vyráběny v sériích (dle [7]) je série definována jako množina stejných kompletních výrobků určitého druhu a provedení, které jsou současně zadány do výroby a jejichž výroba probíhá souvisle v časově omezené období. Sériovou výrobu lze dále rozdělit podle množství výrobků v sérii na malosériovou, středněsériovou a velkosériovou výrobu. [5] [7]



Obr. 5 P-Q diagram sériové výroby [7]

## Hromadná výroba

Tento typ výroby je charakteristický tím, že je vyráběn malý počet druhů výrobků, ale ve velkém množství (Obr. 6). Klasický představitelem hromadné výroby je automobilový průmysl, kdy je vyráběno obrovské množství aut (výrobků), ale jen v několika typech. [7]

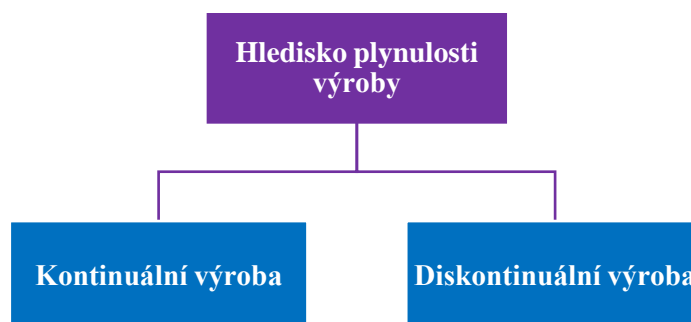


Obr. 6 P-Q diagram hromadné výroby [7]

### 2.2.3 Hledisko plynulosti výroby

Dle tohoto hlediska je výrobní proces rozdělen na kontinuální (plynulou) a diskontinuální (přerušovanou) výrobu (Obr. 7). Při plynulé výrobě není výrobní proces nikterak přerušen. Výjimkou pro přerušování výroby nejsou státní svátky, ani víkendy. Tento typ výroby vyžaduje určitou mírou automatizace. Kontinuální výrobu lze najít především ve slévárenském, hutním a chemickém průmyslu. [7]

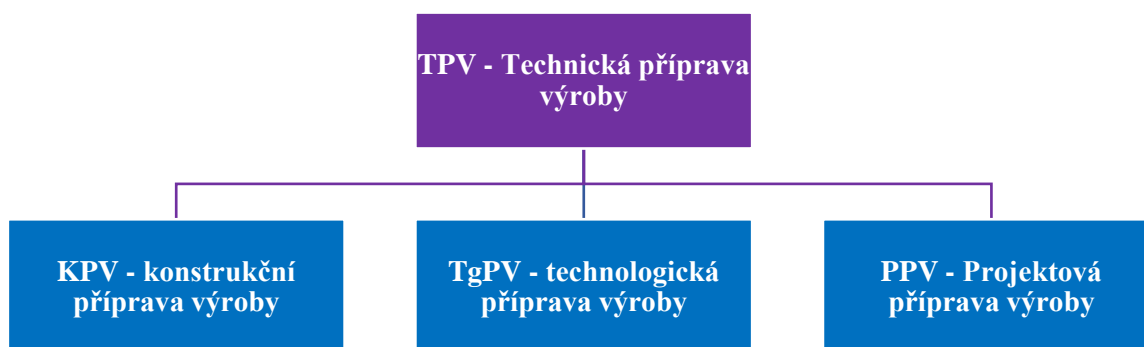
U diskontinuálního typu výroby je výrobní proces přerušován z důvodu mnoha faktorů (doprava materiálu, seřízení stroje, výměny nástroje). Ačkoliv se může zdát, že přerušovaná výroba je jednodušší na organizaci, není tomu tak. U diskontinuální výroby se vyrábí velký počet výrobků či se vykonává velké množství operací najednou a tyto operace mohou být nepravidelné. Zároveň je diskontinuální typ výrobního procesu poměrně náročný na velikost výrobních zásob. Velikost výrobních zásob způsobuje kolísání kvalit (pokud se u nějakého pracoviště bude tvořit fronta výrobků může nastat poškození výrobků (výrobky umístěné ve spodní části bedny mohou být poškozeny vlivem hmotnosti ostatních výrobků). [7]



Obr. 7 Dělení výrobního procesu podle hlediska plynulosti výroby [7]

## 2.2.4 Hledisko výrobních etap

Výrobní proces lze rozdělit do několika etap, které na sebe navazují. První etapou je **etapa předvýrobní** neboli technická příprava výroby (TPV). Tato první etapa zajišťuje potřebné materiály pro to, aby výroba byla bezproblémová, a je tvořena konstrukční, technologickou a technickoorganizační (projektovou) přípravou výroby (Obr. 8). Tyto části se společně snaží dosáhnout požadovaného rozvoje (dosažení hospodářských a technických plánů). Konstrukční příprava výroby (KPV) zahrnuje veškerou dokumentaci, která je nutná k výrobě daného výrobku a říká, co se bude vyrábět (výkresy, výrobní profil). Technologická příprava výroby (TgPV) si klade otázku, jaké technologie použít k vyrobení daného výrobku. Poslední částí technické přípravy výroby je projektová příprava výroby (PPV), která navazuje na předešlé přípravy. Řeší se zde, kolik je třeba vyrobit kusů, zda budou stačit výrobní kapacity, a kdy se výroba uskuteční. Během těchto příprav je nutné dodržet základní požadavky: spolupráci jednotlivých výrobních i nevýrobních útvarů, určit projektové týmy a zjistit, zda se nedá využít principů štíhlé výroby či simultánního inženýrství. [7] [8]



Obr. 8 Dělení technické přípravy výroby [8]

**Výrobní etapa** je chápána jako samotný výrobní proces, kde se díky veškerému zařízení (stroje, nástroje), materiálu a pracovní síle přemění vstup (polotovary) na výstup (hotové výrobky). Tuto etapu je možné dále členit na předzhotovující fázi (příprava zpracování materiálu – výroba výkovků, odlitků), zhotovující fázi (docílení finální podoby výrobku – výroba součástí, montáž) a dohotovující fáze (finální úpravy výrobku – nátěry, povrchová úprava, konzervace, balení). [7] [8]

Poslední etapou je etapa **povýrobní**, která se často nazývá prodejní nebo odbytovou. Řeší se zde marketing, logistika výrobku k zákazníkovi, předání návodu na používání, servis (reklamacie) či samotná likvidace výrobku. [7] [8]



Obr. 9 Dělení výrobního procesu dle hlediska výrobních etap [7]

### 2.2.5 Časové hledisko

Toto hledisko bere v potaz mnoho faktorů, které ovlivňují řízení výroby. Je důležité si určit **časové uspořádání**, tzn. stanovit si posloupnost operací (pracovišť), kterými musí výrobek projít. Pro plynulejší výrobu a její lepší organizaci je také důležité **určení velikosti dávek**. Dávky mohou být výrobní nebo dopravní. Na jednotlivých strojích či pracovištích je nutné nastavit **směnnost**. Směnnost se může na jednotlivých pracovištích lišit. Dále je cílem dosáhnout maximálního možného využití výrobních kapacit (nejlépe 100 % z maximální možné hodnoty), aby nedocházelo ke zbytečným prostojům strojů (pracovišť). Na závěr se dělá **finanční rozbor** rozpracované a nedokončené výroby – tzn. kolik peněz je vázáno ve zdrojích. Podniky se snaží tuto částku minimalizovat. [3] [7]

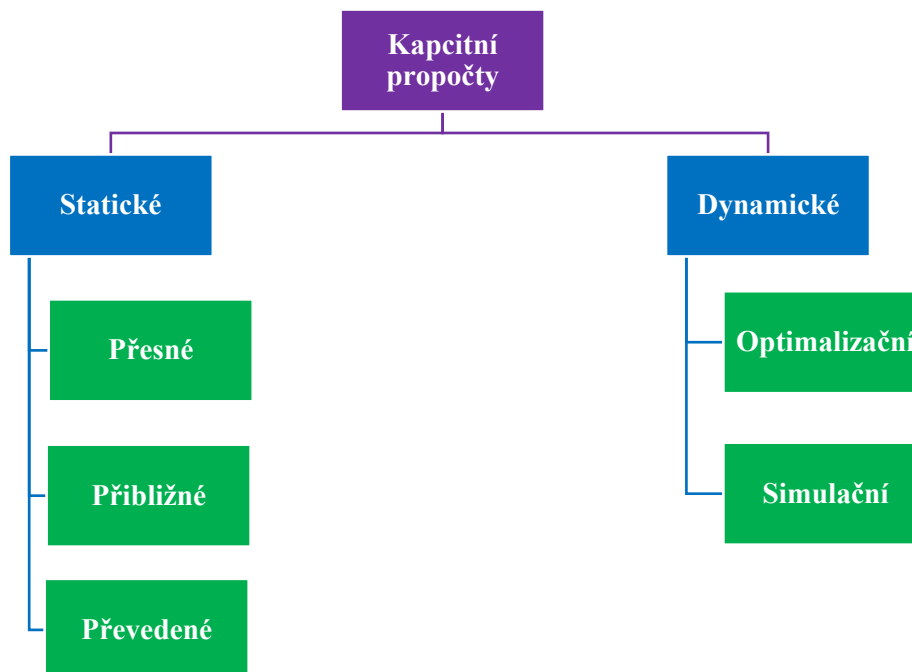
## 2.3 Kapacitní propočty

Kapacitní propočty jsou nedílnou součástí rozboru výroby. Slouží ke zjištění teoretické potřeby strojního zařízení (stroje, manipulátory, dopravníky), obsluhy (počet výrobních i nevýrobních zaměstnanců), výrobních a nevýrobních ploch (viz. kapitola 2.8.1). Při sestavování kapacitních propočtů je důležité mít co nejvíce informací o výrobním systému (výkresy, technologické postupy, návodky, seznam strojního zařízení a režimu obsluhy). Kapacitní propočty je možné vytvořit i v průběhu výroby nebo po jejím skončení jako nástroj zhodnocení. [8]

Kapacitní propočty lze dělit na statické a dynamické (viz. Obr. 10). **Statické** jsou takové propočty, které se v průběhu času nemění (jsou fixní). Na základě charakteru výrobního programu (sériovost, počtu druhů výrobků) se dělí statické kapacitní propočty na přesné, přibližné a převedené. **Přesné kapacitní propočty** se využívají především u sériové či hromadné výroby, protože je k dispozici kompletní dokumentace spojená s výrobou (technologická, ekonomická, konstrukční, plánovací). **Přibližné kapacitní propočty** jsou využívány pouze jako orientační v případě, že se podnik rozhoduje mezi více variantami projektu. Poslední skupinou statických kapacitních propočtů jsou **převedené kapacitní propočty**. Ty se používají v případě, že není dodána kompletní dokumentace pro dané zadání. Z tohoto důvodu jsou převedené kapacitní propočty realizovány zejména v kusové a malosériové výrobě. Kapacitní propočty jsou převedeny do skupin, ve kterých jsou technologicky a konstrukčně podobné výrobky, a je zvolen tzv. představitel. Představitel by měl mít největší podíl na celkovém počtu vyrobených kusů a celkových výrobních nákladech. [8] [9]

**Dynamické** propočty jsou v čase proměnné. Na jejich základě lze učit např. aktuální potřebu strojního zařízení či obsluhy. První skupinou dynamických kapacitních propočtů jsou **optimalizační propočty**. Ty vychází z disponibilních časových fondů a kapacitních požadavcích jednotlivých výrobků. U optimalizačních propočtů se využívá metod lineárního programování (tj. vytvoření kriteriální funkce) v případě, kdy celkové kapacitní potřeby jsou součtem kapacit jednotlivých výrobků. Tyto kapacitní propočty nesní být vyšší než příslušné disponibilní fondy. Celkový vliv z výsledků výroby je velmi těžko popsatelný jednou kriteriální funkcí, a proto je nutné vytvořit více kriteriálních funkcí. V dnešní době se ale využívají

především **simulační kapacitní propočty**, kterými je možné s pomocí počítačového simulačního modelu získat dynamické charakteristiky vybraných prvků či činností. Výsledky simulace mohou mít grafickou podobu či podobu alfanumerického výstupu. Na grafickém výstupu jsou znázorněny toky materiálu pomocí diagramů. Grafické znázornění je možné použít i jako doplnění alfanumerického výstupu. [8] [9]



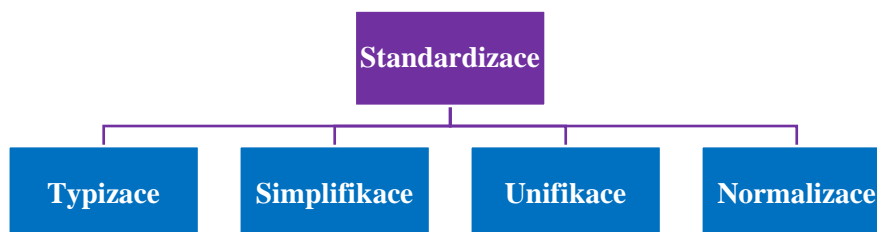
Obr. 10 Dělení kapacitních propočtů [8]

## 2.4 Technologická standardizace

Standardizace je definována jako proces vytváření pravidel zaměřených na uspořádání dané činnosti, díky nimž se podniky snaží zvýšit optimalizaci či efektivnost (technologickou, ekonomickou) za předpokladu, že dojde k dodržení požadavků na funkci a v neposlední řadě na bezpečnost práce. Standardizace se snaží odstranit různorodost v konstrukční, technologické, organizační a řídicí činnosti výrobních procesů, a tím dosáhnout větší produktivity (snížení pracnosti, náročnosti). Aby bylo možné standardizaci uskutečnit, je nutné dodržet některé zásady (meziobjektová a podniková aktivita), aby řešení byla dynamická. Kromě již zmíněných zásad je také důležité důkladně znát technologii výroby a technologie montáže daného výrobku a mít organizovaný výrobní proces. [1] [10]

Na Obr. 11 jsou znázorněny metody rozdělení technologické standardizace. První metodou je **typizace**. Lze jí chápat jako výběr objektů z hlediska typických vlastností, odstranění neúčelné různorodosti v typech a provedení, a následný výběr typových řešení. Druhou metodou je **simplifikace**. Simplifikaci je možné obecně chápat jako zjednodušení. Simplifikace znamená snížení počtu variant řešení, typů výrobků a technologických variant výroby. Dalším způsobem, jak provádět technologickou standardizaci, je **unifikace**. Dochází při ní ke sjednocení součástí (tvarové, rozměrové) tak, aby je bylo možné používat i

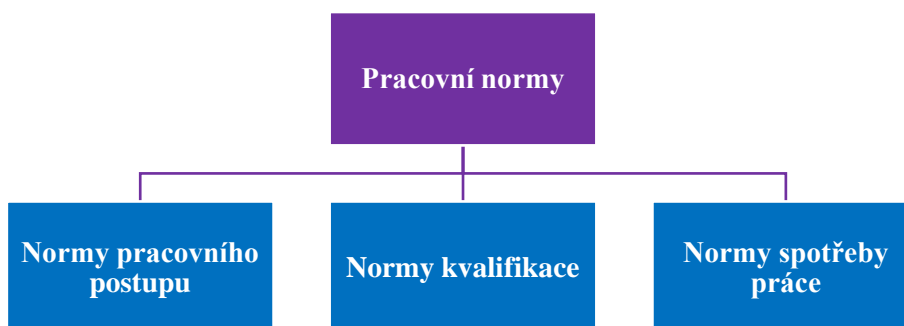
u jiných výrobků. Kromě tvarů a rozměrů se unifikace využívá i u výrobních postupů. Poslední metodou technologické standardizace je **normalizace**. Normalizace je považována za nejvyšší stupeň technologické standardizace (tj. nalezení typového řešení). U normalizace dochází k nalezení a určení nejmenšího možného počtu technologických řešení případu, který se opakuje. [1] [10] [11]



Obr. 11 Rozdělení technologické standardizace [11]

## 2.5 Pracovní normy

Pracovní normy lze chápat jako dané předpisy či směrnice, které určují např. kolik času zaměstnanec potřebuje k vykonání požadované činnosti za určitých podmínek, jaká je požadovaná kvalifikace na zaměstnance, a jak je potřeba danou práci vykonat, aby byly dodrženy bezpečnostní a ekonomické požadavky. Základní dělení pracovních norem je znázorněno na Obr. 12. **Normy pracovního postupu** jsou platné předpisy vymezené technickými, organizačními a bezpečnostními podmínkami, které jsou předány zaměstnanci. Jsou vždy schvalovány příslušným podnikovým útvarem, který má danou oblast na starost. V případě, že se změní výrobní postup, je nutné vytvořit nové normy na základě poskytnutých dat (pozorování, měření, odhad). **Normy kvalifikace** definují požadovanou kvalifikaci zaměstnance na daném pracovišti při plnění zadaných úkolů. Tyto normy úzce souvisí s bezpečností na pracovišti. [12]



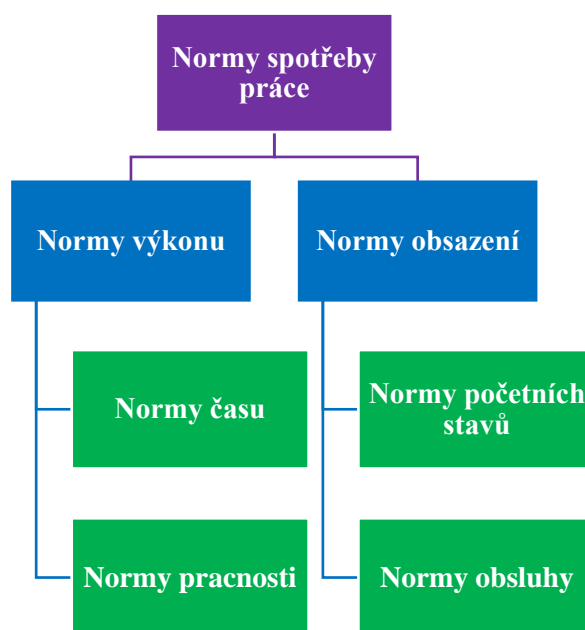
Obr. 12 Dělení pracovní normy [12]

Další kategorií pracovních norem jsou **normy spotřeby práce**, které jsou rozděleny na normy výkonu a normy obsazení (Obr. 13). Normy **výkonu** udávají délku času, který je potřebný k vykonání určitého



pracovního úkolu či množství kusů (jednotek produkce), které jsou zpracovány za danou jednotku času (minuta, hodina, směna). Tyto normy jsou dále děleny na normy času a normy pracnosti. Za **normy času** lze považovat čas, který zaměstnanec potřebuje k přepravě, montáži, vyrobení požadovaného výrobku. V případě, že se daná činnost vztahuje na více zaměstnanců, výsledná norma je součtem časů všech členů pracovního týmu. Norma času se vztahuje i na práci stroje, kdy udává celkový čas, který je potřebný pro vykonání daného úkonu na daném stroji (tj. čas strojní práce). **Norma pracnosti** vyjadřuje velikost pracovního času (objem lidské i strojní práce), který je potřebný k vyhotovení konkrétního výrobku. Tato norma se používá v případě, že strojní zařízení není plně automatizováno či vyžaduje dozor obsluhy. [12]

Do druhé skupiny norem spotřeby práce patří **normy obsazenosti**. Normy, které spadají do této skupiny, udávají počet zaměstnanců na daném pracovišti (v pracovním útvaru). Normy obsazenosti dále určují vztah mezi počtem zaměstnanců a počtem technologických celků, které obsluhují (transferové obráběcí linky). Potřebný počet zaměstnanců na obsluhu strojního zařízení je dán jeho dodavatelem a musí se řídit bezpečnostními předpisy. Normy obsazení jsou dále děleny na normy početního stavu a normy obsluhy. Pojem **norma početního stavu** udává počet zaměstnanců na konkrétním pracovišti (organizačním útvaru), který splňuje kvalifikační požadavky. Tento počet může být plánovaný (v přípravné fázi) či skutečný (zaběhnutá výroba), ale musí být natolik vysoký, aby bylo možné s určitým počtem pracovníků naplnit plán výroby, a aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám. Druhou skupinou norem početního stavu jsou **normy obsluhy**. Normy obsluhy udávají počet výrobního zařízení, který může obsluhovat jeden zaměstnanec (případně kolik zaměstnanců je nutné ke správnému fungování daného stroje). [12]



Obr. 13 Dělení normy spotřeby práce [12]

## 2.6 Spotřeba času ve směně

Určení spotřeby časů, které jsou spojeny s výrobním procesem, je nutné rozlišovat. Základní dělení spotřeby času je dělení z hlediska pracovní síly, výrobního zařízení a pracovního předmětu (viz. Obr. 14). Do spotřeby času **pracovní síly** se zahrnují zaměstnanci (pracovníci). Detailní rozebrání spotřeby času pracovní síly je rozebráno níže. Spotřeba času se zjišťuje pomocí snímků práce a snímků pracovního dne, kdy pověřená osoba, která má dostatečnou kvalifikaci, dělá podrobné zápisky pohybů a úkonů sledovaného pracovníka či pracovníků. Spotřebovaný čas výrobního zařízení může být z části shodný se spotřebovaným časem pracovní síly. Spotřebovaný čas výrobního zařízení se zjišťuje pomocí snímků využití strojů. [8] [12]



Obr. 14 Dělení spotřeby času [8]

Všechny zjištěné časy je nutné zařadit do přesně definovaných skupin a označit je vhodnými symboly. Základní dělení spotřeb času zaměstnance je na časy nutné a časy zbytečné neboli ztrátové (Obr. 15). Ztrátové časy vytváří rezervy v produktivitě práce. Tyto ztráty může způsobovat sám zaměstnanec nebo mohou být způsobeny technicko-organizačními příčinami či vyšší mocí. Označování zápisu jednotlivých časů je patrné z tabulek níže (Tab. 1 až Tab. 5) a pro správné pochopení hierarchie časů ve směně je uvedeno několik vzorců níže (1 až 6). [8] [12]

$$T_1 + T_2 + T_3 = T_N \quad (1)$$

$$T_{A1} + T_{A2} + T_{A3} = T_A \quad (2)$$

$$T_{B1} + T_{B2} + T_{B3} = T_B \quad (3)$$

$$T_{C1} + T_{C2} + T_{C3} = T_C \quad (4)$$

$$T_{C1} = t_{C1} \quad (5)$$

$$T_A + T_B + T_C = T_N \quad (6)$$

Tab. 1 Vysvětlení symbolů I. [8]

<b>Základní znak</b>	
T	Úhrn všech příslušných časů ve směně
t	Úhrn příslušného času v normě tohoto času (u směn. časů jsou vždy malá písmena)

Tab. 2 Vysvětlení symbolů II. [8]

<b>Index základního znaku</b>	
A	Čas přímo úměrný počtu kusů
B	Čas úměrný počtu zpracovávaných výrobních dávek
C	Čas přímo úměrný počtu odpracovaných směn

Tab. 3 Vysvětlení symbolů III. [8]

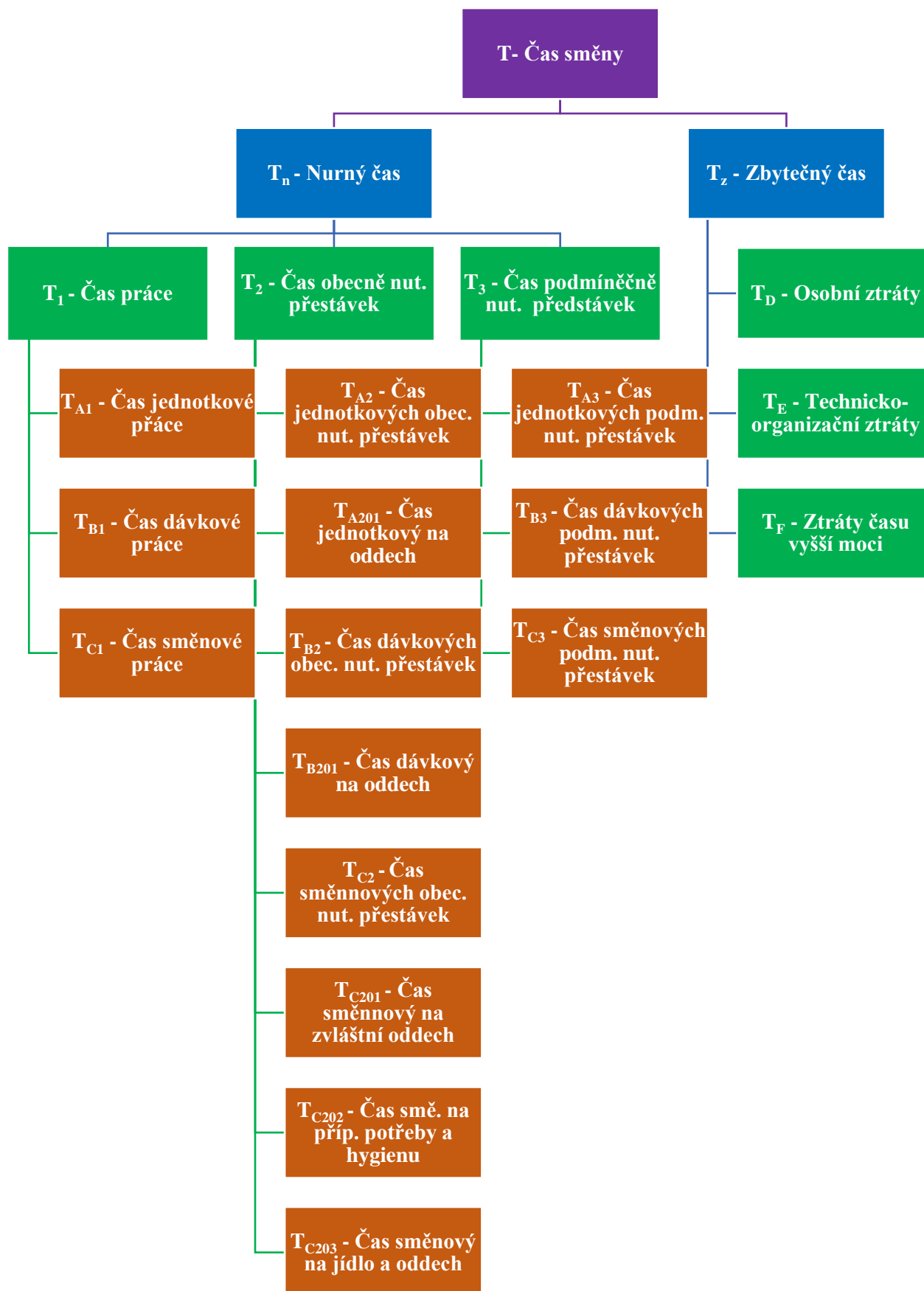
<b>Číslice na prvním místě</b>	
1	Čas práce (duševní nebo fyzická)
2	Čas obecně nutných přestávek (přerušeni práce kvůli hygienickým a fyziologickým potřebám)
3	Čas podmíněně nutných přestávek (čekání na přivolání jeřáb)

Tab. 4 Vysvětlení symbolů IV. [8]

<b>Číslice na druhém místě</b>	
1	Čas probíhající za klidu stroje
2	Čas probíhající za chodu stroje
3	Čas strojně ruční (čas řízeného chodu)
X	Výjimka pro rozlišení úkonů nepravidelné obsluhy v jednotkovém čase

Tab. 5 Vysvětlení symbolů V. [8]

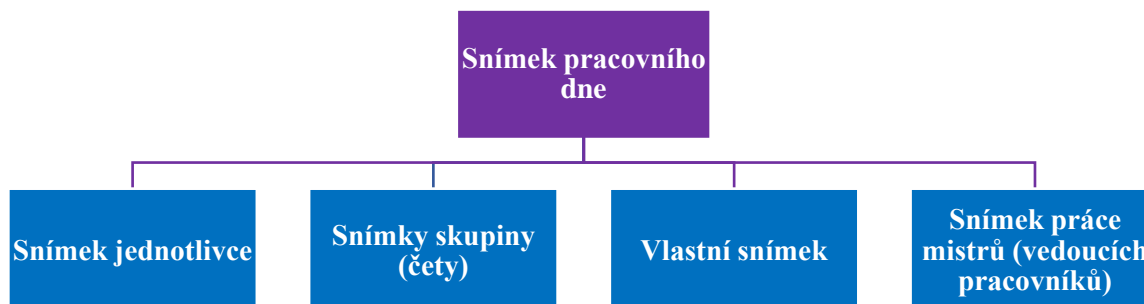
<b>Číslice na třetím místě</b>	
1	Čas přestávek na zvláštní oddech (nadměrný hluk)
2	Čas přestávek pro přirozené potřeby
3	Čas přestávek na jídlo a oddech



Obr. 15 Schéma rozdělení času pracovníka [8]

### 2.6.1 Tvorba snímků dne

Vytváření snímků pracovního dne se týká především pracovníků, pracovních prostředků (strojů) či předmětu výroby. Provádí se rozbor spotřeby pracovního času a úrovně organizace práce v průběhu pracovní směny. Snímky pracovního dne lze dělit z hlediska pracovníka na snímky jednotlivce, snímky skupiny či pracovní čety, vlastní snímky a snímky práce mistrů (vedoucích pracovníků) viz. Obr. 16. [8]



Obr. 16 Rozdělení snímku pracovního dne [8]

#### Snímek pracovního dne jednotlivce

Vytvoření snímku pracovního dne jednotlivce se vytváří neustálým pozorováním pracovních činností pracovníka včetně měření spotřeby času, které zahrnuje i veškeré přestávky v průběhu směny. Při vytváření snímku pracovního dne měřením pověřený pracovník musí přizpůsobit podmínkám pracovního prostoru, neměl by narušit průběh činností a je nutné ho zaškolit. Postup tvorby snímku pracovního dne jednotlivce je znázorněn na Obr. 17. Již před začátkem měření dochází k **přípravě**, během které se stanoví cíle, určí se počet měření a časový plán pozorování. Během **pozorování a měření** se zaznamenávají do pozorovacích listů všechny provedené úkony a přerušení. Výsledný čas se zaokrouhluje na minuty. Do pozorovacího listu jsou zaneseny postupné časy během směny a jednotlivý čas se zjistí pomocí rozdílu postupných časů. Kromě postupných časů se do pozorovacího listu zaznamenávají i stručné popisy činností. Po skončení měření a pozorování se provádí **rozběr a vyhodnocení** naměřených hodnot. Sečtou se stejnojmenné spotřeby časů (označeny stejným symbolem). Na základě součtů spotřeb časů se vytvoří bilance spotřeby časů, která udává skutečnou (průměrná hodnota z jednotlivých snímků) a normální (normovatelné časy) spotřebu časů. Pomocí bilance spotřeby časů lze vypočítat koeficient zaměstnanosti (tj. využití času směny prací a přestávkami), podíl zbytečné spotřeby času, která je způsobena samotným pracovníkem, podíl zbytečné spotřeby času zaviněné špatnou technicko-organizační strukturou pracoviště a výpočet přírážky směnového času  $t_c$ . Poslední fází je **navrhování změn**, které by pomohly zlepšit organizaci práce a odstranit nedostatky a ztráty. [8] [12]



Obr. 17 Postup při tvorbě snímku dne [8]

### **Snímek pracovního dne skupiny**

Pověřený pracovník (pozorovatel) sleduje skupinu pracovníků a strojů v daném intervalu. Do pozorovacího listu se zaznamenávají zjednodušené symboly např. D11, A13, T31. Interval přesunutí mezi pozorovanými pracovišti je závislý na jejich celkové počtu (3-6 pracovišť = interval 1 minuta, 7-12 pracovišť = 2 minuty, 13-18 pracovišť = 3 minuty). [8] [12]

### **Vlastní snímek**

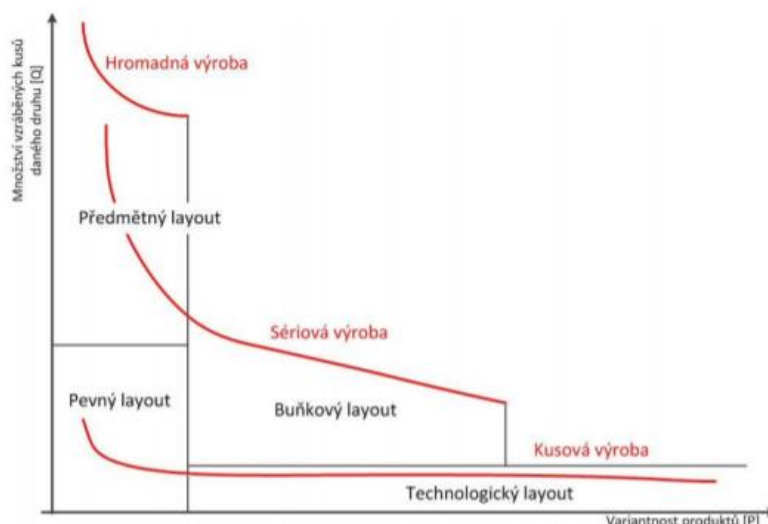
Vlastní snímek vykonává sám pracovník. Na základě jeho zkušeností s konkrétním pracovištěm pracovník zaznamená nedostatky a závady (ztrátové časy). [8] [12]

## **2.7 Rozmístění strojů a pracovišť**

Rozmístění strojů patří mezi nejdůležitější činnosti technologických projektantů. Je důležité, aby byla zaručena minimální přeprava výrobků či polotovarů mezi jednotlivými operacemi, jednoduché řízení výroby, její efektivnost a mimo jiné splnění bezpečnostních a hygienických předpisů. Neexistuje jeden určitý typ rozmístění strojů či pracovišť, který by se dal universálně použít. Pro nalezení optimálního řešení rozmístění strojů a pracovišť je nutné provést důkladnou analýzu a zvážit více variant rozmístění. Tato fáze se nazývá přípravná etapa zpracování projektu. [13] [14]

Při zakreslování strojů do dispozičního řešení se musí stroj zakreslit krajními rozměry, správnou orientací a zároveň je nutné zakreslit krajní polohy pohyblivých částí stroje. Je důležité tyto zásady dodržet, aby byly splněny bezpečnostní předpisy. Nedílnou součástí dispozičního řešení je např. i zakreslení polohy veškerého příslušenství stroje či dělníka (skříňky, regály, pracovní stůl dělníka s počítačem). [13] [14]

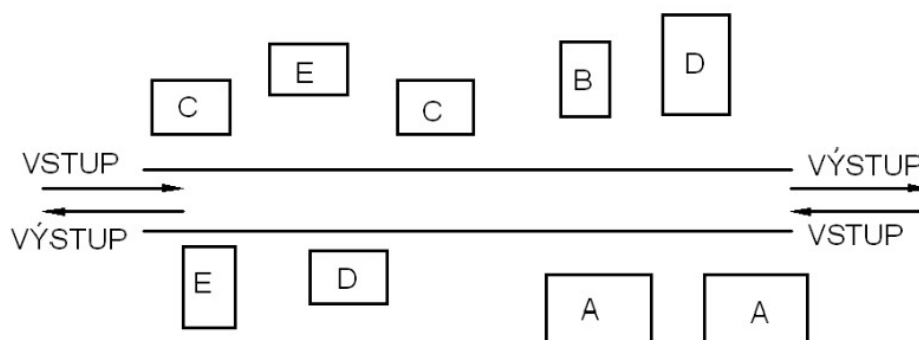
Na obrázku níže (Obr. 18) je možné vidět P-Q diagram, který nám znázorňuje oblasti použití jednotlivých typů uspořádání strojů a pracovišť. Jednotlivé typy uspořádání budou podrobně popsány v následujících kapitolách (2.7.1 až 2.7.5). [5] [13] [14]



Obr. 18 P-Q diagram pro technologické uspořádání strojů a pracovišť [5]

### 2.7.1 Volné uspořádání strojů a pracovišť

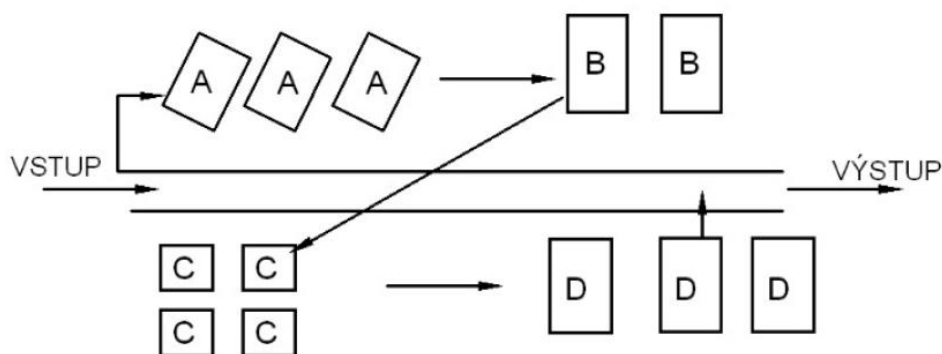
Pracoviště a stroje jsou v tomto případě rozmístěny náhodně (Obr. 19). Je to použito především při kusové výrobě, kde není nutné, aby zde byl kladen důraz na efektivitu výroby. Volné uspořádání je v praxi téměř nepoužíváno, protože není řešen ani materiálový tok, ani organizační vztahy jednotlivých strojů či pracovišť. [9] [15]



Obr. 19 Volné uspořádání strojů a pracovišť [9]

### 2.7.2 Technologické uspořádání strojů a pracovišť

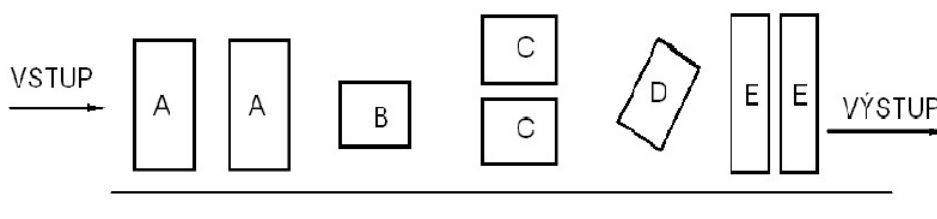
Stroje a pracoviště jsou seskupeny podle technologické příbuznosti zařízení (Obr. 20). Výrobek jde postupně od jednoho pracoviště (stroje) k druhému. Oproti předchozímu uspořádání (volné uspořádání) umožňuje technologické uspořádání pružnější výrobní proces. V případě, že dojde k poruše nějakého stroje, může ho nahradit stroj, který se nachází hned vedle (je nutné, aby výrobní kapacity umožňovaly tento krok). Materiálové toky v tomto uspořádání jsou dlouhé a tím pádem jsou prodlouženy výrobní časy. [9] [15]



Obr. 20 Technologické uspořádání strojů a pracovišť [9]

### 2.7.3 Předmětné uspořádání strojů a pracovišť

Toto uspořádání se používá ve výrobě s vyšší sériovostí. Technologicky odlišná pracoviště (stroje) jsou seskupena v souladu s technologickým postupem výrobků. Mezi jednotlivými stroji je snaha dosáhnout co nejmenších prostojů. Tento typ uspořádání je vhodný tam, kde se vyrábí málo druhů výrobků, ale ve větším množství. Jsou zde krátké mezioperační časy a také krátké manipulační dráhy. Při použití předmětného uspořádání se doporučuje zavést standardizaci výrobků a vícesměnný provoz (nejlépe třisměnný, aby nedocházelo ke zbytečným prostojům). S tím souvisí, že technická příprava výroby zabere velké množství času a je nutné dbát na to, aby byla správná. [9] [15]

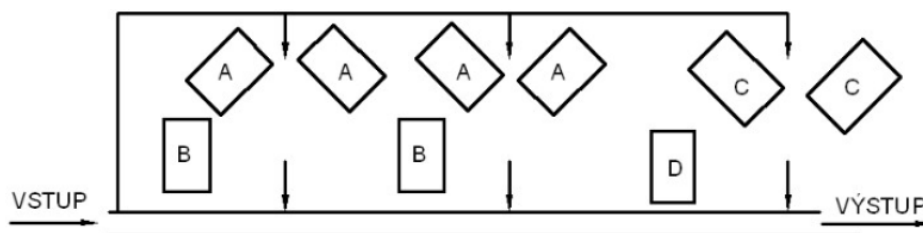


Obr. 21 Předmětné uspořádání strojů a pracovišť [9]

### 2.7.4 Modulární uspořádání strojů a pracovišť

Charakteristickým znakem modulárního uspořádání (znázorněno na Obr. 22) patří sdružení strojů, které mají stejné či podobné technologické funkce (např. obráběcí centra v obrobkách). Toto uspořádání se začalo používat zejména po vzniku NC strojů, které mají vysokou produktivitu a při plánování se dbá na jejich maximální využití. Mezi hlavní výhody modulárního uspořádání, podobně jako u předmětného uspořádání, patří krátké operační a mezioperační časy, krátké manipulační dráhy a kvalitní organizace a řízení výroby. Je nutné klást vysoké nároky na technickou přípravu výroby. [9] [14]

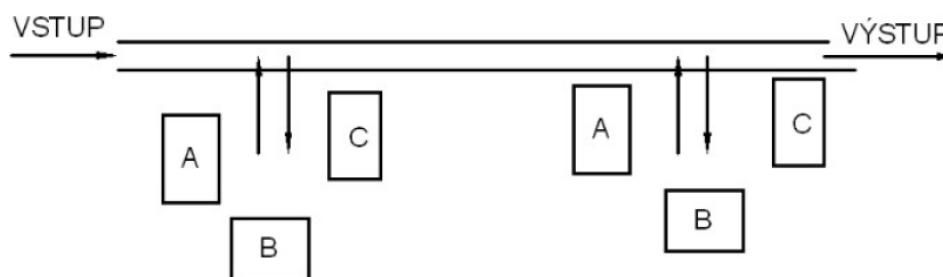




Obr. 22 Modulární uspořádání strojů a pracovišť [9]

### 2.7.5 Buňkové a hnízdomé uspořádání strojů a pracovišť

V buňkovém uspořádání (Obr. 23) se stroje uspořádávají do tzv. buněk. V buňce je vysoce produktivní a automatizovaný stroj obsluhován dalšími stroji (tzn. okolí stroje). Okolí stroje může být mechanické (použití dopravníků, zásobníků) nebo automatizované (použití robotů). Při použití buňkového uspořádání je nutné zavedení standardizace a vícesměnný provoz. Přípravné operace probíhají za chodu hlavního stroje na pomocných pracovištích. [9] [14]



Obr. 23 Buňkové uspořádání strojů a pracovišť [9]

### 2.7.6 Kombinované uspořádání strojů a pracovišť

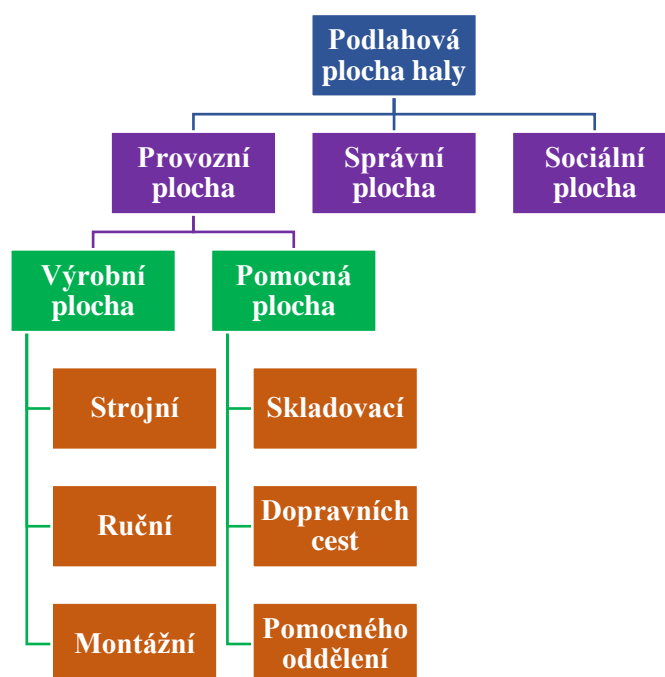
Tento typ uspořádání je používán především ve velkých podnicích, v nichž by nebylo možné použít jen jeden typ uspořádání (tzn. dochází ke kombinaci minimálně dvou různých typů uspořádání). Kombinovaný typ uspořádání najdeme například v podnicích, ve kterých dochází k výrobě (technologické uspořádání) a zároveň k montáži (předmětné uspořádání). [9] [14]

## 2.8 Tvorba layoutů

Moderní technologie jsou velkým pomocníkem při tvorbě layoutů (výrobní základny) výrobních systémů. Společně se softwary na simulaci výrobních systémů, ergonomie atd. se jim říká nástroje digitální továrny. Tyto softwary (nástroje) se dělí do dvou skupin – 1. nástroje používané především v jiných oborech, které mají vedlejší funkci prostorové uspořádání (Catia, NX); 2. nástroje specializované na vytváření layoutů neboli prostorového uspořádání (CEIT TABLE, visTABLE apod.). V těchto softwarech je možné tvořit jak ve 2D, tak i ve 3D. Další novinkou u nástrojů na optimalizaci layoutů je použití VR (virtuální reality). [13]

Podlahovou plochu haly (layout) lze rozdělit do několika částí – provozní plocha, správní plocha a sociální plocha (viz. Obr. 24). Pro výrobní zařízení zaobírá největší podíl provozní plocha. Ta se dále dělí na výrobní plochu a pomocnou plochu. Součástí výrobní plochy je plocha strojní (veškerá strojní pracoviště), plocha ruční (veškerá ruční pracoviště) a plocha montážní (všechna pracoviště montáží). Druhým odvětvím provozních ploch jsou pomocné plochy. Do této skupiny patří plochy skladovací (sklady, mezisklady), plochy dopravních cest (volné cesty pro např. vysokozdvizné vozíky) a plochy pomocných oddělení. [13]

Druhou skupinou dělení je skupina správních ploch. Sem je možné zařadit kanceláře mistrů, konstruktérů, technologů a těch pracovníků, kteří se nepřímou podílejí na výrobě. Poslední skupinou podlahových ploch je skupina sociálních ploch, kam se řadí sociální zařízení (sprchy, toalety, šatny), kuřárny, jídelny a místa pro odpočinek. [13]



Obr. 24 Dělení podlahové plochy výrobní haly [13]

### 2.8.1 Postup při tvorbě layoutu

Důvodů, proč se layout mění v průběhu výroby, je několik. Například podnik chce optimalizovat či racionalizovat dosavadní výrobní systém či přemýšlí o navýšení změně výrobního profilu (vytvoření nového výrobního systému). [16]

Na Obr. 25 je zobrazený postup při vytváření layoutů. Prvně je třeba **diagnostikovat** aktuální stav a seznámit se se situací. Diagnostiku stávajícího systému provádí zkušení pracovníci. Následuje **sběr informací**. Přechází krok nám řekl, které informace budou potřeba na rozbor aktuálního stavu. Informace se čerpají z databáze, nebo se získávají pozorováním. Informace z databáze většinou zabírají delší časové období, ale informace získané pozorováním jsou aktuálnější. Dalším krokem je **rozběr stávajícího stavu**,

během kterého se získají možné varianty řešení. Stávající stavu může být realizován např. rozbořením standardizace, rozbořením automatizace a mechanizace, a rozbořením toku materiálu a dispozičního řešení. Po rozboru stávajícího stavu se provádí **návrh řešení**. Z navržených několika variant je vybrána jedna varianta, ta nejlepší po technologické a ekonomické stránce, ke které se poté vypracuje technická dokumentace a síťový plán. Poslední fází je realizace, během které se projeví nedostatky vzniklé z chyb, udělaných při přípravě projektu. Konec projektu je v okamžik jeho předání investorovi. Může být smluvně ujednáno, že se bude provádět monitorování chodu a vyhodnocovat chování navrženého systému po sjednané časové období. [16]



Obr. 25 Postup při tvorbě layoutů

## 2.9 Aditivní technologie

Aditivní technologie spočívá v postupném vrstvení materiálu do vrstev z 3D datového modelu. Zmíněné vrstvení materiálu probíhá pomocí laseru či tiskové hlavy. Výroba, která využívá aditivní technologie, je závislá na použití dalších technologií jako je např. CNC (počítačem číslicově řízené stroje - Computer Numerical Control), CAD (Počítačem Podporované Projektování - Computer-Aided Design), CAM (Počítačem Podporovaná Výroba - Computer-Aided Manufacturing). Oproti jiným výrobním technologiím má aditivní technologie bezesporu velkou výhodu – téměř maximální využití materiálu. Využití materiálu není 100% z důvodu, že výrobky je nutné opatřit technologickými prvky (podpory, základní deska). Finální výrobky jsou po vytisknutí těchto podpor zbaveny mechanickým či chemickým způsobem. V posledních letech zaznamenaly aditivní technologie velký rozmach. Výrobky vyrobené aditivními technologiemi je možné najít všude kolem nás – lékařství, automobilový a letecký průmysl, slévárství atd. Velkým problémem u těchto strojů je bezesporu jejich pořizovací cena. Průmyslové 3D tiskárny, které zpracovávají plastové materiály lze pořídit od 400 000 Kč. 3D tiskárny na zpracování kovového materiálu mohou mít cenu i 1 mil € (zhruba 25 000 000 Kč). [17] [18] [19]

Zpráva o aditivních technologiích od Josefa Hodeka popisuje 4 druhy technologií, které se využívají k vrstvení materiálu. První metodou je stereolitografie. Tato metoda spočívá v postupném vytvrzování plastické hmoty (fotopolymer = citlivý na světlo) pomocí UV laseru. [17]

Druhým typem aditivních technologií je spékání prášku pomocí laseru (Laser Sintering). Touto technologií lze zpracovávat kovy (ocel, nikl, bronz), plasty (polyamid, polystyren), keramiku a slévárenský písek. Nabízí se možnost kombinovat více materiálů dohromady, ale k tomu je nutná velká znalost technologie a zároveň to musí používaný stroj umožňovat. [17]

Další metodou aditivních technologií je FDM (Fused Deposition Modeling). Princip této metody spočívá v tavení tenkého drátu (termoplasty, vosky) a následného vrstvení do jednotlivých vrstev. Tryska, která ohřívá materiál o 1 °C více než je jeho teplota tavení se pohybuje ve směru os X a Y. Po nanesení tenké vrstvy materiál ihned tuhne. Tato metoda je nyní hojně využívána v kancelářském a domácím prostředí. [17]

Poslední metodou je výroba laminováním (Laminated Manufacturing). Model je sestaven laminováním plastových fólií nebo mnoha vrstev papíru, který je napuštěný vytvrzovací hmotou. Laserem je ořezán požadovaný tvar součástky. Nevýhodou této metody je poměrně velký odpad, který vzniká při výrobě součástí. Finální výrobek je nutné ručně opracovat z důvodu dosažení hladkého povrchu. [17]

### 3 Simulace

Simulace je zobrazení reálného, plánovaného či neexistujícího systému s jeho dynamickými a stochastickými procesy prostřednictvím simulačního modelu. Simulační model se snaží napodobit chování reálného systému a pomocí různých experimentů je možné nalézt a navrhnout změny, které by mohly zlepšit fungování reálného systému. Jednoduše řečeno, simulace může být chápána jako vyhodnocení modelu (experimentu, projektu) bez samotné realizace, která by mohla být velmi nákladná, nebezpečná či v některých případech neproveditelná. [20] [21]

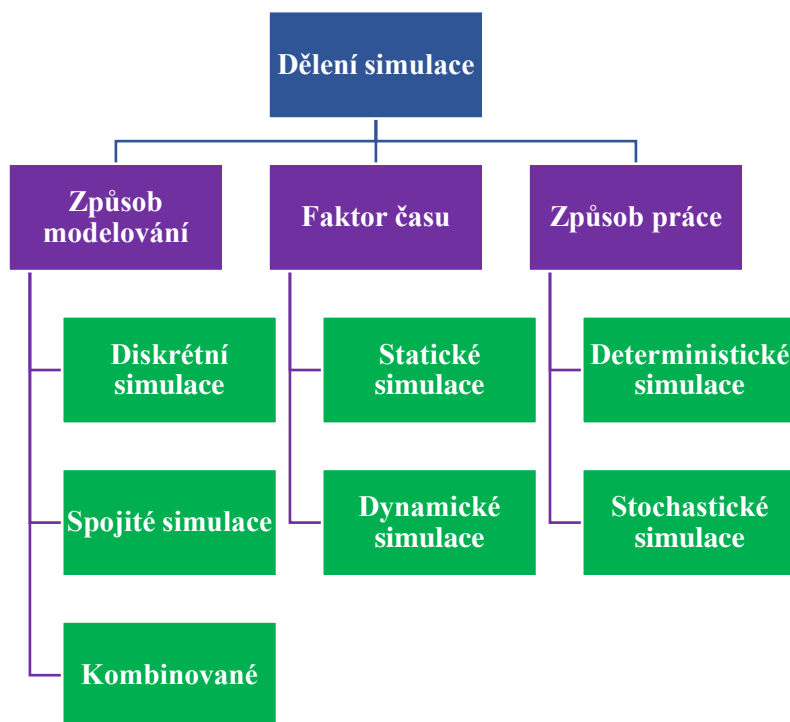
#### 3.1 Dělení simulace

Na Obr. 26 níže je znázorněno dělení simulací. Simulace lze rozdělit podle 3 kritérií – podle způsobu modelování, faktoru času a způsobu práce. [20] [21]

**Diskrétní simulace** řeší změny v systému, které probíhají skokově. Tento typ simulace je u větších výrobních a zásobovacích procesů. **Spojité simulace** je opakem diskrétní – prvky ve spojitě simulaci vznikají interakcí spojitou v čase. V případě **kombinované simulace** (diskrétně-spojité) se prvky mohou měnit diskrétně i spojitě. [20] [21]

**Statická simulace** je použita v případě simulování systému v konkrétním časovém okamžiku. Na rozdíl od statické je možné použít **dynamickou simulaci** na simulaci systému, který se v čase vyvíjí (tzn. mohou se měnit vlastnosti modelu). [20] [21]

Posledním dělení simulací je dělení podle způsobu práce (chování simulátoru). **Deterministická simulace** je taková simulace, kde nevstupuje do procesu žádná náhodnost a chování celého systému lze předvídat. Stochastická simulace je v podstatě celá založena na náhodných číslech (např. metoda Monte Carlo). [20] [21]



Obr. 26 Dělení simulace [21]

### 3.2 Simulační softwary

Simulační softwary nám slouží především k simulování výrobního či transportního procesu. Simulace probíhá bez narušení výrobního systému, protože by se v případě testování nového zařízení či změny layoutu strojů nebo pracovišť musela celá výroba zastavit. Tím by firma nemusela stíhat vyrobit požadovaný počet kusů a přicházela by o tržby. Světově se mezi nejpoužívanější simulační softwary řadí např. Witness, Arena, SimPro, Simul8 a Plant Simulation, který bude v této práci dále podrobněji rozebrán. Simulační softwary lze většinou používat i bez znalosti programovacích jazyků, ale pokud uživatel nezná programovací jazyk, je v případě složitých simulací velmi omezen, a některé simulační modely není schopen vyrobit a provést simulaci. [22] [23] [24] [20] [23]

### 3.3 Plant Simulation

Jak již bylo zmíněno v přechodí kapitole, existuje mnoho simulačních softwarů, ale z důvodu jeho použití v této diplomové práci bude důkladně pospán pouze Plant Simulation, který je součástí nástrojů digitální továrny Tecnomatix od firmy Siemens. Plant Simulation slouží k simulaci, analýze, optimalizaci a vizualizaci výrobních procesů a systémů. Pomocí simulačního softwaru Plant Simulation lze vytvořit logický nebo výrobní systém simulující jednotlivá pracoviště, ale i kompletně celý výrobní systém. Pro vytvoření simulačního modelu složitějších výrobních systémů je nutné ovládat vnitřní programovací jazyk Sim Talk. Software Plant Simulation umí komunikovat s formáty např. .xls, .txt, .xml, na druhou stranu Plant Simulation bohužel nezkoumá ergonomii, a ani konkrétní ovládání prvků ve výrobě. [23] [24]

Objekty v softwaru Plant Simulation využívají principu dědičnosti – změna, provedená v základním objektu (třídě) se automaticky dědí na všechny objekty, které jsou odvozené (odvozené třídy). Tento mechanismus funguje pouze směrem „shora dolů“ ne naopak. [23] [24]

Knihovna 3D objektů softwarů Plant Simulation je poměrně obsáhlá. I přes to se do softwaru dají nahrát 3D CAD modely ve formátu .jt. Tyto modely mohou nahradit stroje, dopravníky, výrobky, apod. Simulační modely lze vytvořit ve 2D i ve 3D. Trojrozměrné (3D) modely jsou lepší při předvádění vytvořeného simulačního modelu např. ostatním zaměstnancům firmy, kteří se budou podílet na implementaci dané změny výrobního systému. [23] [24]

## 4 Návrh modelu digitální továrny

Druhá část diplomové práce má za úkol popsat a následně zhodnotit jednotlivé varianty simulace navrženého výrobního systému digitální továrny, který se zabývá výrobou artefaktů pomocí aditivních technologií společně s konvenčními. Plánování výrobního systému, jehož součástí jsou aditivní technologie, je zatím zřídka využívané, a proto v praktické části této diplomové práce bude vytvořen simulační model výrobního systému, který kromě aditivních technologií využívá i konvenční technologie jako je CNC frézování a omílání. Možností, jak vytvořit výrobní systém, je nespočet. Varianta s 3D DMLS tiskárnami, které budou vyrábět výrobky z kovového prášku a následně tyto výrobky budou opracovány použitými technologiemi, které představí problémy kovového 3D tisku DMLS tiskárnách.

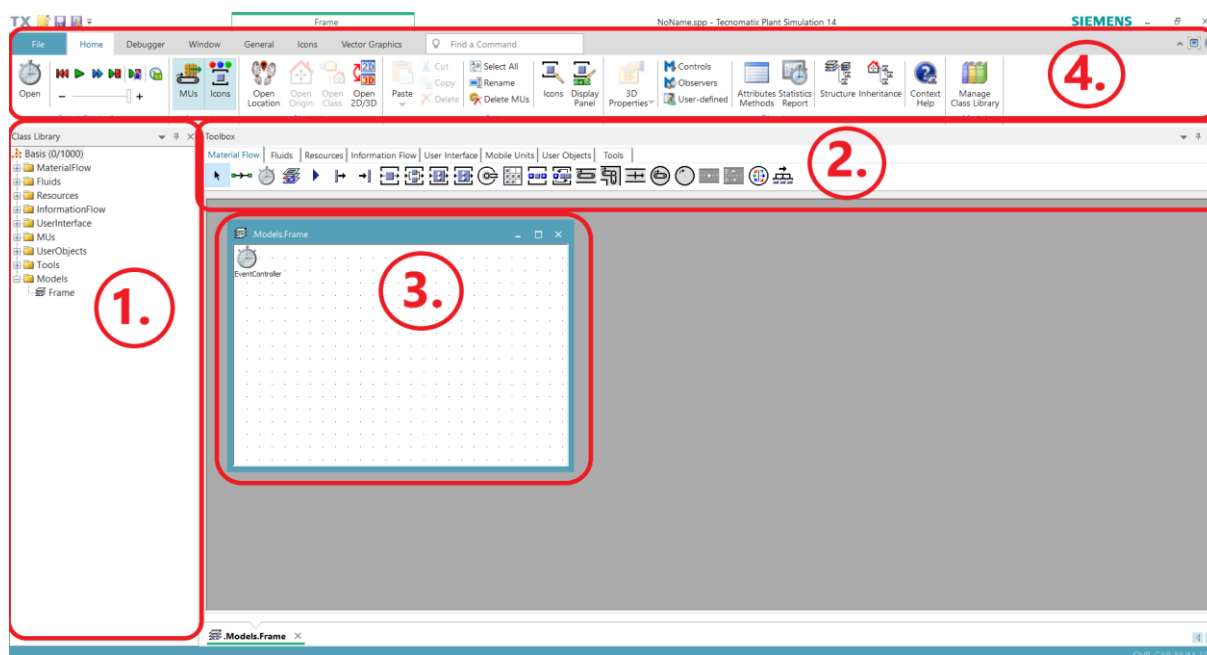
Vytvořený výrobní systém se opírá o kapacitní propočty, které byly vytvořeny pomocí tabulkového editoru Microsoft Excel. Byl stanoven celkový počet výrobků (24 000 kusů), který bude vyroben za zvolené období. Toto období bylo nastaveno z důvodu zjednodušení samotných výpočtů na 365 dnů. Musely se stanovit výrobní a dávkové časy, které byly určeny na základě podobnosti s jiným výrobním systémem. Jelikož simulační model má znázorňovat vliv jednotlivých parametrů (velikost bufferů, směnnost), nebylo nutné využívat přesné časy, ale stačilo časy stanovit tak, aby byly orientační a odpovídaly použitým technologiím. Velikost dávek byla nastavena tak, aby odpovídala dané technologii. Dalším krokem bylo nastavení směnnosti na jednotlivých pracovištích (strojích), která byla stanovena tak, aby bylo časově možné vyrobit daný počet kusů, a aby jednotlivých strojů nebyl zbytečný nadbytek.

Na základě kapacitních propočtů byly vytvořeny celkem 4 varianty simulačního modelu. Tyto varianty byly postupně optimalizovány tak, aby se co nejvíce přiblížily k reálnému výrobnímu systému. Byl zkoumán vliv různých parametrů (směnnost, velikost bufferů, použití transporterů a dopravníků, zakomponování obsluhy strojů) na celkový počet vyrobených kusů, a také na využití strojů. Využití strojů bylo sledováno především na všech DMLS tiskárnách, u kterých je nutné zaručit maximální možné využití, aby nedocházelo ke zbytečným prostojům strojů, tzn. ke ztrátám.

### 4.1 Pracovní prostředí simulačního softwaru Plant Simulation

Pro simulování jednotlivých variant výrobního systému byl použit software Plant Simulation, který byl již zmíněn v kapitole 3.3. Tento simulační software byl použit, protože je součástí některých předmětů projektování na fakultě strojní ČVUT v Praze, pro kterou je dostupná školní licence typu Education. Tato verze je omezena 1000 objekty. Hlavní pracovní prostředí lze rozdělit do 4 základních částí (1. - Class Library, 2. - Toolbox, 3. - Frame, 4. - Lišta nástrojů). V liště nástrojů jsou uvedeny další prvky ovládání simulací, správa knihovny tříd (Class Library) a možnosti úpravy vektorové grafiky. [24] [25] [26]





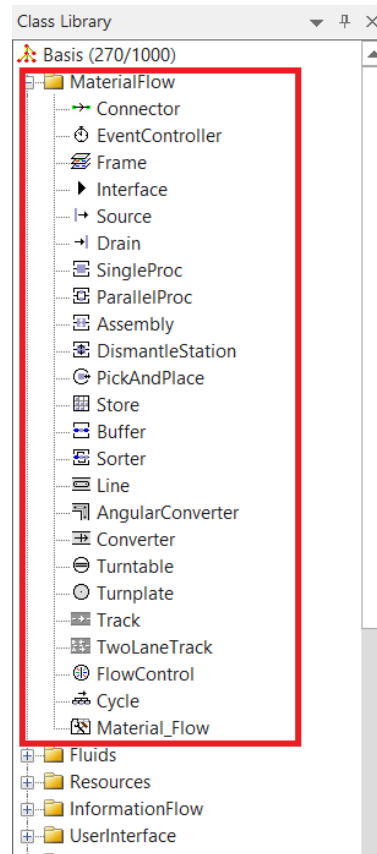
Obr. 27 Pracovní prostředí programu Plant Simulation

#### 4.1.1.1 Class Library

Knihovna tříd je rozdělena do několika skupin prvků a objektů. Třídy lze chápat jako předlohy objektů, se kterými se v modelu pracuje. Je možné je duplikovat a přizpůsobovat svým požadavkům. [24] [25] [26]

#### MaterialFlow

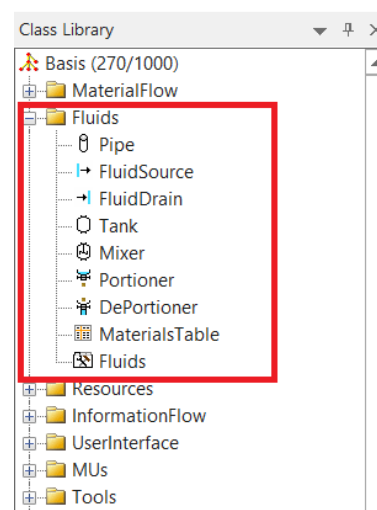
V této části knihovny tříd je možné nalézt dva druhy objektů – aktivní a pasivní. Aktivní objekty slouží k přepravě a zpracování pohybujících se objektů (MU). Mezi aktivní objekty patří např. SingleProc, Assembly, PickAndPlace. Druhým typem objektů jsou objekty pasivní. Ty slouží především k skladování MU nebo jako prostředek pro pohyb (přenos) MU. Do skupiny pasivních objektů se řadí např. Store, Track, Buffer. Funkce nejen zmíněných aktivních a pasivních objektů bude vysvětlena v následujících kapitolách, kde dojde k použití jednotlivých objektů v simulačním modelu. [24] [25] [26]



Obr. 28 Class Library – MaterialFlow

## Fluids

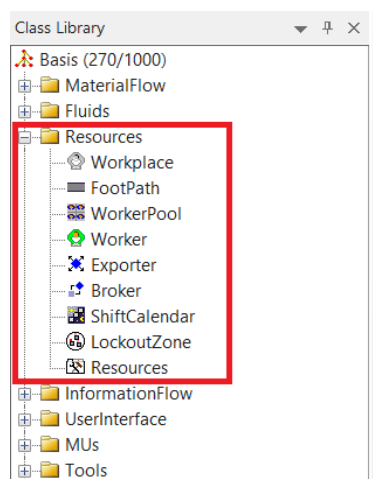
Tato skupina objektů se týká pouze simulace toku tekutin (ropa, voda, pivo). Za zmínku stojí především objekt Tank, který lze chápat jako nádrž, kde se tekutina skladuje, Mixer (spojuje více tekutin dohromady a lze zde nastavit např. poměr spojovaných tekutin). [24] [25] [26]



Obr. 29 Class Library - Fluids

## Resources

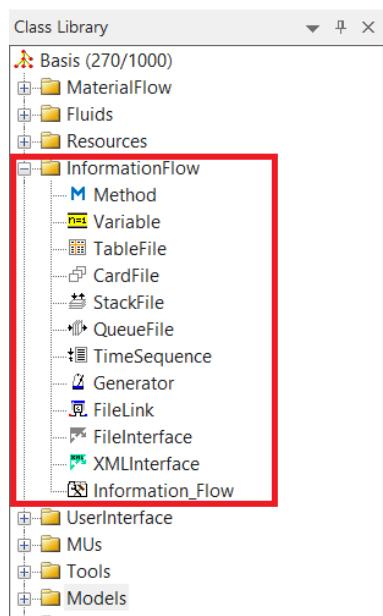
Objekty, které se nachází v této skupině, slouží především k řízení pracovníků. Může se jednat např. o pracovníka samotného (Worker), pracovního místa (Workplace), směnového kalendáře (ShiftCalendar) či tzv. WorkerPool, který slouží ke koordinaci pracovníků (vysílá pracovníky k úkolu - oprava stroje, přenos MU, práce na SingleProc, atd.). [24] [25] [26]



Obr. 30 Class Library – Resources

## InformationFlow

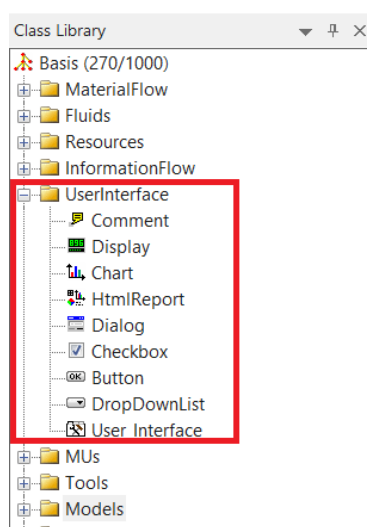
Kategorie prvků InformationFlow (tok informací) zajišťuje výměnu informací mezi prvky modelu. Velmi často používaným prvkem jsou Method, které slouží k programování chování jednotlivých prvků za použití programovacího jazyka SimTalk. Dalším velmi často používaným prvkem jsou TableFiles (tabulky). Pomocí tabulek lze např. určit výrobní časy na jednotlivých strojích či vytvořit tzv. výrobní list produktu, kde se vytvoří pořadí jednotlivých pracovišť, kterými musí výrobek projít. V tomto případě je nutné též doplnit veškeré potřebné časy (výrobní, přeřizovací, směnové). Jak již bylo zmíněno v popisu simulačního softwaru, Plant Simulation může komunikovat i s tabulkami Microsoft Excel. Přes funkci XMLinterface se nastavuje import tabulek. [24] [25] [26]



Obr. 31 Class Library - InformationFlow

## UserInterface

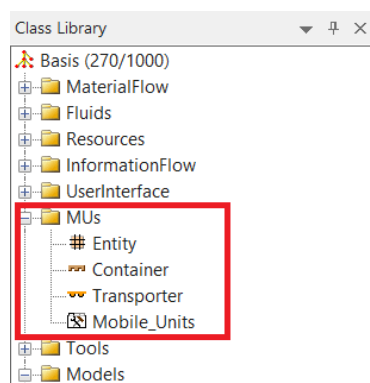
Položky v této záložce mají hlavní funkci a tou je zjednodušení práce se vstupy a výstupy jednotlivých modelů. V praktické části budou některé funkce jako např. Chart a Display. Tyto funkce jsou v průběhu simulace aktivní a udávají hodnoty, které si uživatel nastaví, v reálném čase (např. počítání obsazenosti bufferů). Další hojně používanou funkcí z této záložky je funkce Comment, která se používá k napsání komentářů či poznámek přímo do simulačního modelu. [24] [25] [26]



Obr. 32 Class Library – UserInterface

## MUs

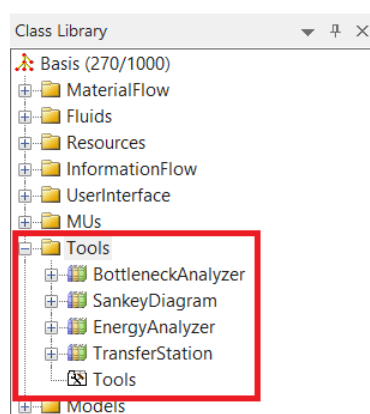
MUs neboli pohybující se objekty nejsou vázány na pevné místo. Pohybují se po různých objektech tak, jak se v simulaci nastaví. Tím vytváří diskrétní materiálové toky. Mezi základní MUs patří Entity (entita – přepravovaný výrobek), Container (přepravní prostředek – paleta, přepravka, bedna) či Transporter (vysokozdvihný vozík, automobil). U jednotlivých pohybujících se objektů lze nastavit jejich rozměry (v případě Containerů a Transporterů je jejich přepravní kapacita závislá na jejich rozměrech). [24] [25] [26]



Obr. 33 Class Library – Mus

## Tools

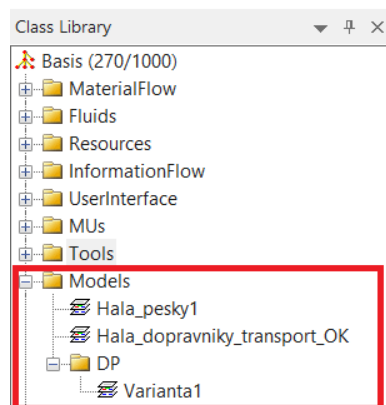
V této záložce jsou umístěny nástroje, které usnadňují a vyhodnocují simulační testy. K vyhodnocení úzkých míst výrobního procesu se používá BottleneckAnalyzer. V této záložce lze najít též SankeyDiagramy, které slouží k zobrazení intenzity materiálového toku (tloušťka čáry určuje intenzitu materiálového toku – čím více výrobků prochází daným uzlem, tím je čára silnější). V záložce Tools je možné mimo jiné najít i nástroj, který slouží k urychlení velmi složitých simulací tím, že simulační testy rozdělí na více počítačů, a tím se zkrátí doba potřebná pro proběhnutí simulace. [24] [25] [26]



Obr. 34 Class Library – Tools

## Models

Tato záložka má jednu hlavní funkci. Slouží k ukládání vytvořených simulačních modelů. Lze zde vytvářet další podložky, které usnadňují přehlednost ve vytvořených modelech. Vytvořené modely lze přesouvat mezi jednotlivými složkami. Při změně názvu modelu se může stát, že některé funkce závislé na názvu modelu nebudou fungovat správně. [24] [25] [26]



Obr. 35 Class Library - Models

### 4.1.1.2 Toolbox

Tato část uživatelského rozhraní nabízí v podstatě téměř ty samé možnosti, které nabízí Class Library. Stejně tak jako u Class Library, lze i u Toolboxu měnit strukturu nabídky, kterou si uživatel může přizpůsobit podle svých potřeb. V nastavení Toolboxu je možné přidat další nástroje, které je možné použít. Jedná se např. o Crane (jeřáb), který slouží k manipulaci s MU. [24] [25] [26]

### 4.1.1.3 Frame

Frame, neboli, při doslovném překladu z anglického jazyka, rámeček, slouží k vytváření modelů. Seskupují se do něj objekty z Class Library a Toolboxu. Velikost framu je možné si přizpůsobit podle potřeby a také je možné mít otevřených více framů vedle sebe pro lepší přehlednost a zároveň pro snadnější modelování. Jednotlivé rámečky lze mezi sebou propojit (tj. pracoviště může být detailně rozebráno v samostatném rámečku a následně vloženo do hlavního rámečku kvůli lepší přehlednosti hlavního modelu). [24] [25] [26]

### 4.1.1.4 Lišta nástrojů

V liště nástrojů je možné najít doplňující nastavení uživatelského rozhraní (ikony, obsah Class Library), úpravě ikon (otáčení, změna velikosti). Je zde také možnost přepnout zobrazení modelu mezi 2D a 3D, a v neposlední řadě je zde možné ovládat vytvořené Methods. [24] [25] [26]

## 4.2 Vstupní data modelu

Výrobní systém se v tomto případě orientuje na výrobu 4 druhů výrobků (tzv. artefaktů). Tyto artefakty nemají složitý tvar, ani vnitřní dutinu. Jednotlivé druhy artefaktů jsou označeny písmeny A až D. Výrobní proces se u jednotlivých výrobků trochu liší. Celý výrobní proces je znázorněn na Obr. 36. Jednotlivé technologie jsou představeny v následujících kapitolách. Nastavení modelu vychází z kapacitních propočtů, kde se řešila směnnost, velikost dávek, výrobních a dávkových časů a počet strojů.



Obr. 36 Výrobní proces artefaktů

Rozmístění strojů a pracovišť se v prvních dvou variantách simulačního modelu řešit nebude, protože rozmístění strojů, ačkoli se to může zdát nepravdivé, nebude mít zásadní vliv na počet vyrobených kusů, ani na délku trvání výroby. Ve variantě 3 a 4 bude layout strojů vytvořen tak, aby se mohlo využít logistických prvků simulačního modelu a bylo možné vyhodnotit jejich vliv na celkový počet vyrobených kusů a na využití strojů.

### 4.2.1 Kapacitní propočty

Pro výpočet jednotlivých parametrů byl použit tabulkový editor Microsoft Excel. Jak již bylo řečeno na začátku kapitoly praktická část, kapacitní propočty byly stanoveny na základě požadovaného počtu vyrobených kusů. Tento počet činí celkem 24 000 kusů výrobků. Od každého druhu výrobku (A–D) by mělo být vyrobeno stejně (tj. 6 000 ks výrobků A, 6 000 ks výrobků B, 6 000 ks výrobků C, 6 000 ks výrobků D). Výrobní a dávkové časy se určily na základě podobnosti s jinými výrobními systémy tak, aby odpovídaly potřebám k vytvoření simulačního modelu, a aby na nich bylo možné popsat vliv jednotlivých parametrů. Kapacitní propočty v našem případě nepočítají s časy, které jsou nutné na přepravu výrobků mezi jednotlivými pracovišti (stoji).

Tabulka níže (Tab. 6) ukazuje vstupní i výsledné hodnoty, které byly použity při výpočtu počtu strojů. Výrobní časy byly stanoveny na základě podobnosti s jiným výrobním procesem. Kdyby se jednalo o simulaci reálné výroby, bylo by nutné uvést přesné, a hlavně pravdivé vstupní parametry. Výsledný počet strojů ( $P_{\text{sskut}}$ ) byl stanoven na základě vypočteného počtu strojů ( $P_{\text{steor}}$ ). Cílem je dosažení maximálního využití DMLS tiskáren, z důvodu velkých pořizovacích nákladů na tyto stroje, a proto i přes výsledný teoretický počet strojů 6,03 byl jejich počet stanoven na 6.

Tab. 6 Kapacitní propočty

Pracoviště	Pracnost								F <sub>vs</sub>	S	α	η	Počet strojů	
	t <sub>ACi</sub>	Q <sub>i</sub>	T <sub>ACi</sub>	t <sub>BCi</sub>	q <sub>d</sub>	p <sub>Di</sub>	T <sub>BCi</sub>	H <sub>n</sub>					P <sub>steor</sub>	P <sub>sskut</sub>
DMLS	90	24 000	36 000	15	20	1 200	300	36 300	6 024	3	1,1	0,8	6,03	6
Řezání drátem	13	24 000	5 200	20	20	1 200	400	5 600	4 016	2	1,1	0,8	1,39	2
Tepelné zpracování	10	24 000	4 000	15	40	600	150	4 150	4 016	2	1,1	0,8	1,03	1
CNC obrábění	90	12 000	18 000	20	10	1 200	400	18 400	4 016	2	1,1	0,8	4,58	5
Omílání	6	12 000	1200	20	40	300	100	1 300	2 008	1	1,1	0,8	0,65	1
Výstupní kontrola	18	24 000	7 200	8	10	2 400	320	7 520	4 016	2	1,1	0,8	1,87	2

t<sub>ACi</sub> – strojní čas [min]

Q<sub>i</sub> – počet kusů celkem [-]

T<sub>ACi</sub> – potřebný strojní čas pro výrobu veškerých součástí [Nhod/rok]

t<sub>BC</sub> – dávkový čas [min]

p<sub>Di</sub> – počet výrobních dávek [-]

T<sub>BCi</sub> – celkový dávkový čas [Nhod/rok]

H<sub>n</sub> – nárok na výrobní kapacitu zařízení [hod]

S – počet směn [-]

F<sub>vs</sub> – roční využitelný fond [hod]

α – koeficient překračování norem [-]

η – součinitel časového využití stroje [-]

P<sub>steor</sub> – teoretický počet zařízení [-]

P<sub>sskut</sub> – skutečný počet zařízení [-]

q<sub>d</sub> - počet kusů v dávce



Aby bylo patrné, jak se jednotlivé hodnoty získaly, je nutné uvést vzorce pro jejich výpočet. Jednotlivé symboly použité ve vzorcích jsou uvedeny včetně jednotek pod Tab. 6. či přímo pod vzorci [8]

### Potřebný čas pro výrobu veškerých součástí

$$T_{ACi} = \frac{t_{ACi} * q_i}{60} [Nhod/rok] \quad (7)$$

### Celkový dávkový čas

$$T_{BCi} = \frac{t_{BCi} * p_{Di}}{60} [Nhod/rok] \quad (8)$$

### Počet výrobních dávek

$$p_{Di} = \frac{Q_i}{q_d} [dávek/rok] \quad (9)$$

### Nárok na výrobní kapacitu zařízení

$$H_n = T_{ACi} + T_{BCi} [Nhod/rok] \quad (10)$$

### Roční využitelný fond

$$F_{vs} = d * h * S [hod] \quad (11)$$

*d* - počet dnů

*h* - počet hodin ve směně

*S* - směnnost

### Teoretický počet strojů

$$P_{Steor} = \frac{\sum H_n}{F_{vs}} \quad (12)$$

### Skutečný počet strojů

$$P_{Sskut} = \frac{P_{Steor}}{\alpha * \eta} \quad (13)$$

#### **$\alpha$ – koeficient překračování norem**

- 0,9 – 1,3 – objektivní normy (MTM, MOST)
- 1,3 – 1,5 - normy měkké, rozběhové
- 1,2 – 1,4 metody bodovací

#### **$\eta$ – součinitel časového využití stroje**

- 0,7 – 0,9

#### **4.2.2 DMLS tisk**

Výroba artefaktů začíná na DMLS tiskárnách. DMLS (Direct Metal Laser Sintering) je aditivní technologie, která ke spékání kovového prášku využívá teplo vyvolané laserovým paprskem, fokusovaným na určité místo, kde dochází postupně k jeho spékání do jednotlivých vrstev. Povrch vytisknuté součásti je drsný, proto se většinou využívají jiné technologie (např. obrábění, pískování, natírání) k dosažení požadovaných vlastností povrchové vrstvy. Standardní přesnost, kterou lze většinou dosáhnout je 0,3 mm. DMLS tiskárny mají jednu velkou nevýhodu – cena. Jejich pořizovací náklady se mohou vyšplhat až k téměř 1 mil € (zhruba 25 mil. Kč). Je nutné dbát na maximální využití DMLS strojů, a aby nedocházelo ke zbytečným prostojům mezi jednotlivými výrobními dávkami. Zároveň je nutné mít zkušenou a kvalifikovanou obsluhu, která bude dbát na dodržení předepsaných výrobních postupů a bude dodržovat bezpečnost práce, protože kovový prášek je v případě vdechnutí zdraví nebezpečný.

V našem případě dochází na DMLS tiskárnách k výtisku tzv. palety (základní desky), na které je umístěno 20 kusů artefaktů. Každá paleta obsahuje vždy 5 výrobků od každého druhu výrobku (5xA, 5xB, 5xC, 5xD). Doba tisku byla stanovena na 30 hodin. Dávkový čas je 15 minut a k seřízení stroje dochází po vytisknutí jedné palety. Použitý prášek je pro všechny druhy výrobků stejný.

#### **4.2.3 Apretace a řezání artefaktů**

Vytisknuté artefakty je nutné zbavit podpor, které jsou nedílnou součástí výrobků vyrobených pomocí 3D tisku, a také oddělit samotné výrobky od základní desky. K tomuto kroku je použita technologie elektroerozivního drátového řezání (EDM). U technologie drátového řezání EDM je velmi důležitý parametr, který ovlivňuje rychlost řezání, tloušťka drátu a jeho rychlost podávání, která se pohybuje v řádech několika metrů za minutu.

#### **4.2.4 Tepelné zpracování**

Jednotlivé výrobky je nutné po vytištění tepelně upravit. Konkrétně se jedná o žihání na snížení vnitřního pnutí, které se do výrobku vnáší díky použité metodě DMLS. Žihání probíhá ve vakuové peci po dávkách 40 kusů. Samotná doba žihání byla stanovena na 5 hodin a dávkový čas je 20 minut. Chladnutí probíhá na vzduchu a trvá 4 hodiny. Artefakty jsou po žihání a následném vychladnutí umístěny do kontrolního přípravku, kterým se zkontroluje, zda se výrobky během tepelného zpracování nezdeformovaly. Pokud by se stalo, že výrobek nemá požadovaný tvar a rozměry, byly by vyřazeny z výroby.

#### 4.2.5 Omílání

Omílání podstupují pouze výrobky C a D. Tato technologie je vybrána z důvodu, že je nutné povrch vytištěných součástí upravit (zaoblit hrany a vyhladit povrch). K omílání dochází v omílacích bubnech a použité abrazivo (kovové broky) lze použít vícekrát. Čas omílání celé dávky (40 kusů) byl stanoven na 4 hodiny. Dávkový čas je 20 minut.

#### 4.2.6 Obrábění

Z důvodu požadavku na vysokou přesnost tvarových ploch je nutné vytištěné výrobky jemně obrobit. Kvůli nerovnoměrnosti a vysoké drsnosti vytištěných artefaktů je důležité obrobením vytvořit přesné rozměry požadovaných ploch. Obráběny jsou pouze artefakty A a B. K obrábění jsou použity 5 - ti osé CNC frézky. Čas obrábění je poměrně dlouhý kvůli zmíněnému požadavku na vysokou přesnost tvarových ploch. Obrobení jednoho artefaktu trvá 90 minut. Velikost dávky je zvolena na 5 kusů, protože je důležité zaručit požadovanou kvalitu obrobených ploch. Dávkový čas byl zvolen na 20 minut.

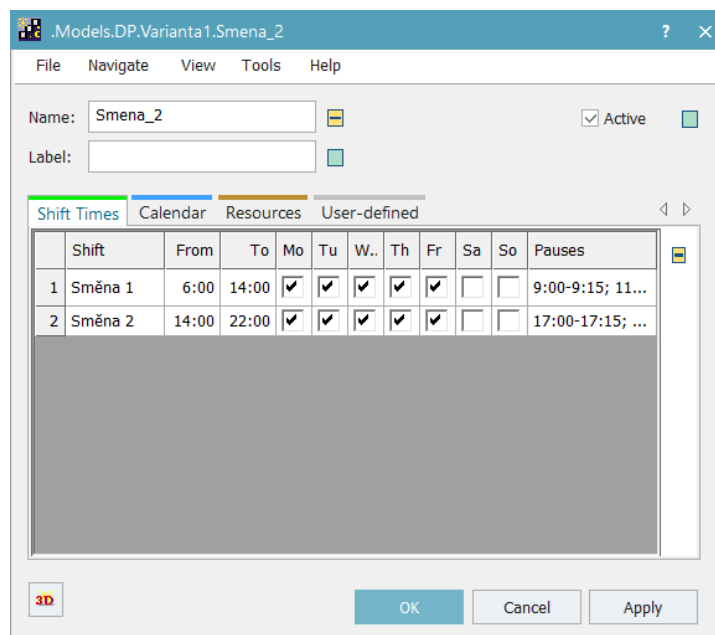
#### 4.2.7 Výstupní kontrola

Poslední částí výrobního procesu je výstupní rozměrová a tvarová kontrola. Jelikož se součásti tepelně upravovaly a také obráběly či omílaly, mohlo u nich dojít k tvarové či rozměrové deformaci. Výstupní kontrola bude prováděna na souřadnicových měřících strojích (CMM) a bude provedena na každém kuse, aby se nestalo, že zákazník dostane vadný kus a bude nucen jej reklamovat. CMM byly zvoleny kvůli jejich komplexnímu využití a možnosti graficky znázornit naměřené výsledky na jejichž základě lze případně upravit jednotlivé výrobní operace. Čas měření jedné součásti je stanoven na 18 minut. Dávka byla určena na 5 kusů výrobků stejného druhu a dávkový čas je 8 minut.

### 4.3 Nastavení směnnosti

Směnnost na jednotlivých pracovištích byla určena na základě kapacitních propočtů, které jsou popsány v dříve (kapitola 4.2.1). Oproti kapacitním propočtům je směnnost na některých strojích individuálně upravena podle potřeb daného pracoviště tak, aby výroba nebyla narušena nedostatečnými výrobními kapacitami. Pracovní dny jsou od pondělí do pátku (v případě páteční noční směny od 22 hod směna pokračuje až do sobotní 6. hodiny ranní).

Jak již bylo zmíněno dříve, směnnost se v Plant Simulationu nastavuje pomocí ShiftCalendaru a lze v něm nastavit délku trvání jednotlivých přestávek. Na Obr. 37 je možné vidět základní okno nastavení ShiftCalendaru (konkrétně nastavení přestávek a jednotlivých pracovních dnů). V ShiftCalendaru je též možné nastavit např. státní svátky či celozávodní dovolené.



Obr. 37 Nastavení ShiftCalendaru

Jelikož téměř všechny technologie umožňují použití vícestrojové obsluhy či není nutná přítomnost operátora po celou dobu práce (např. u pece na tepelné zpracování není nutný neustálý dohled operátora na stroj). Operátor si může vyčerpat veškeré přestávky v době, kdy stroj vykonává svojí práci (např. probíhá žihání na snížení vnitřního pnutí). Stroj je vybaven bezpečnostními prvky a v případě poruchy či vyhodnocení neobvyklých hodnot je stroj automaticky zastaven a operátor musí situaci vyřešit.

#### 4.3.1 Směna 1

Ranní směna je nastavena od 6:00 do 14:30. Obsluha má nárok na 2 přestávky – jedna obědová a druhá na oddech. Přestávky jsou určeny tak, aby splňovaly příslušný zákon. První přestávka je přestávka na oddech a trvá od 9:00 do 9:15. Následuje obědová přestávka, která trvá 30 minut a je od 11:00 do 11:30. Pokud na daném pracovišti pokračuje odpolední směna, která přichází v 14:00, mají půl hodiny na předání pracoviště a sdělení informací nezbytně nutných k plynulému pokračování výroby.

#### 4.3.2 Směna 2

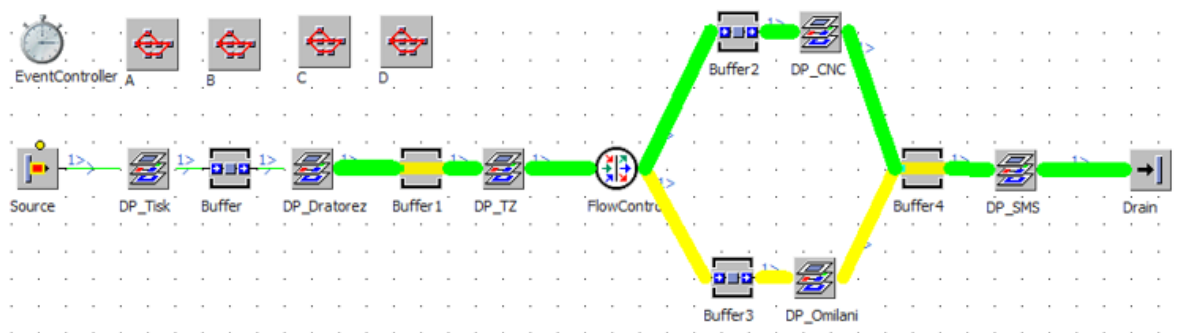
Odpolední směna trvá od 14:00 do 22:30. Stejně jako předchozí směna, tak i tato směna musí mít přestávky. Oddechová přestávka je od 17:00 do 17:15. Zaměstnanci mají nárok na přestávku na jídlo (večeři). Tato přestávka je od 19:00 do 19:30. Pokud na daném pracovišti následuje další směna, jeho obsluha přichází ve 22:00 a přebírá si pracoviště od končící směny.

#### 4.3.3 Směna 3

Noční směna se týká pouze pracoviště DMLS tiskáren. Tato směna trvá od 22:00 do 6:30. Oddechová přestávka je 1:00 do 1:15 a přestávka na jídlo je od 3:00 do 3:30. V 6:00 přichází ranní směna a přebírá si pracoviště od noční směny, která končí v 6:30.

#### 4.4 Materiálové toky

Materiálový tok byl již zmíněn a následně popsán v kapitole 4.2. Na Obr. 36 je znázorněn zjednodušený výrobní proces artefaktů. Tento sled výrobních technologií byl navržen na základě podobnosti s výrobním procesem, který též využívá aditivní technologie v kombinaci s konvenčními. V použitém simulačním softwaru je možné znázornit materiálový tok pomocí tzv. Sankey diagramů (Obr. 38). Ke každému druhu výrobku byla přiřazena určitá barva. Tloušťka čáry určuje, jaké množství výrobků proudí mezi jednotlivými pracovišti. Čím je čára silnější, tím více výrobků daným pracovištěm protéká. Na Obr. 38 je patrné, že na pracovišti EDM drátořezu dochází k oddělení jednotlivých artefaktů od základní desky (tloušťka čáry se zvětšila).



Obr. 38 Sankey diagramy

## 5 Simulace modelu

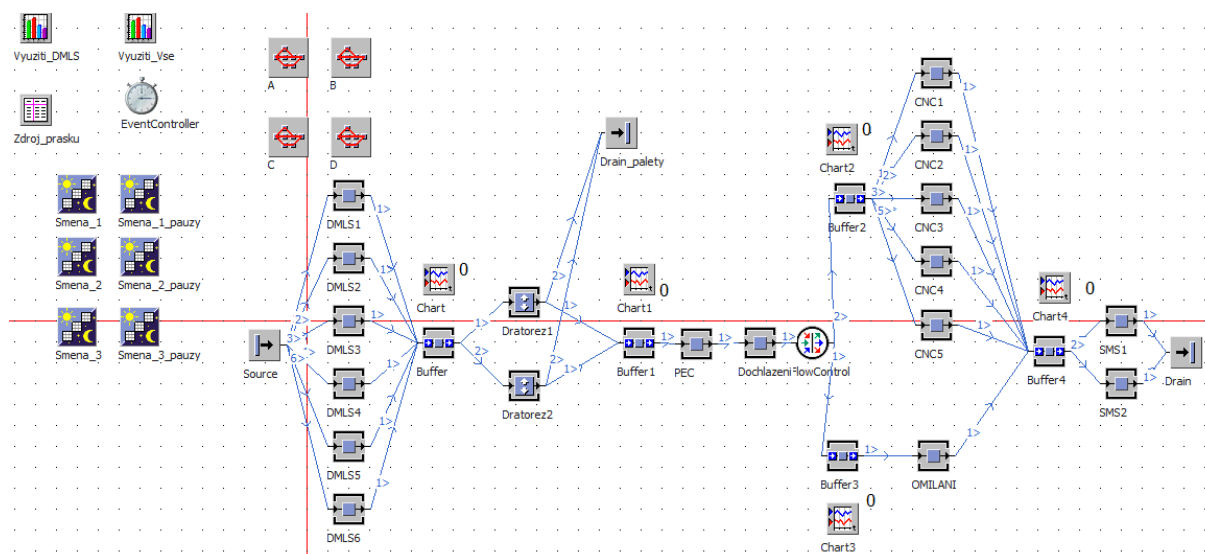
Pro ověření správné funkčnosti modelu a jeho následnou optimalizaci budou provedeny celkem 4 varianty. Použité výrobní a dávkové časy jsou ve všech variantách simulace stejné, aby bylo možné zkoumat vliv jednotlivých změn v simulačním modelu na počet vyrobených kusů a využití jednotlivých strojů. V simulačních modelech jsou postupně řešeny nedostatky jednotlivých variant a do simulačních modelů jsou zakomponovány logistické prvky a obsluha strojního zařízení, které mění vzhled modelu, ale díky nim se simulační model více přibližuje reálnému výrobnímu systému.

### 5.1 Varianta 1

První varianta má za úkol ověřit funkčnost a správnost nastavení modelu – zda odpovídá kapacitním propočtům. Bude zde důkladně popsán postup při tvorbě simulačního modelu a následně rozebráno vyhodnocení provedené simulace. Vyhodnocení bude obsahovat grafy využití jednotlivých strojů a počet vyrobených kusů.

#### Nastavení modelu

Nejprve bylo nutné vytvořit prvotní návrh modelu (tzn. rozmístění jednotlivých strojů, bufferů a jejich vzájemné propojení) a teprve poté se do simulačního modelu zakomponovat nastavení dalších parametrů. (Obr. 39).



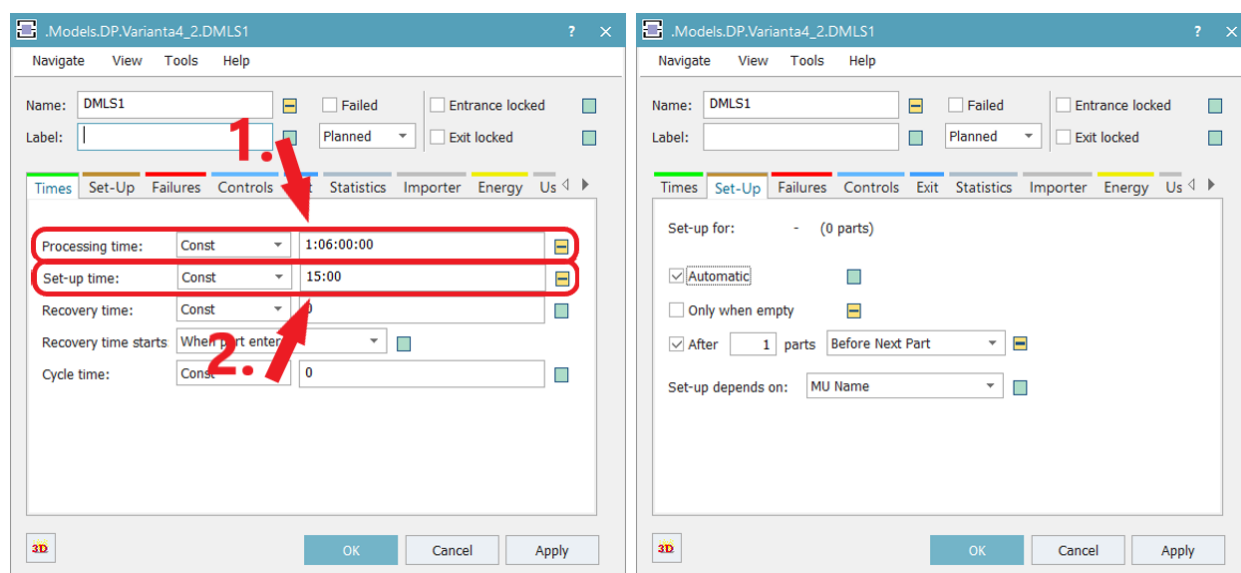
Obr. 39 Simulační model - V1

Jednotlivá pracoviště se musela nastavit tak, aby jejich nastavení odpovídalo kapacitním propočtům (resp. použitým hodnotám v kapacitních propočtech). Na Obr. 40 je znázorněno nastavení výrobních časů (číslo 1.) a dávkových časů (číslo 2.) u DMLS tiskárny. Nastavení časů a velikosti dávek na jednotlivých strojích (pracovištích) je patrné z tabulky níže (Tab. 7). Kromě nastavení výrobního a přeseřizovacího času je na

Obr. 40 zobrazeno i nastavení počtu výrobků (dávky), po jehož vyrobení nastane přeseřzení stroje (Set-Up).

Tab. 7 Nastavení výrobních a dávkových časů - VI

Pracoviště	$t_{Ac}$ [min]	$t_{Bc}$ [min]	$q_{ai}$ [ks]
DMLS	90	15	20
Řezání drátem	13	20	20
Tepelné zpracování	10	20	40
CNC obrábění	90	20	10
Omílání	6	20	40
Výstupní kontrola	18	8	10



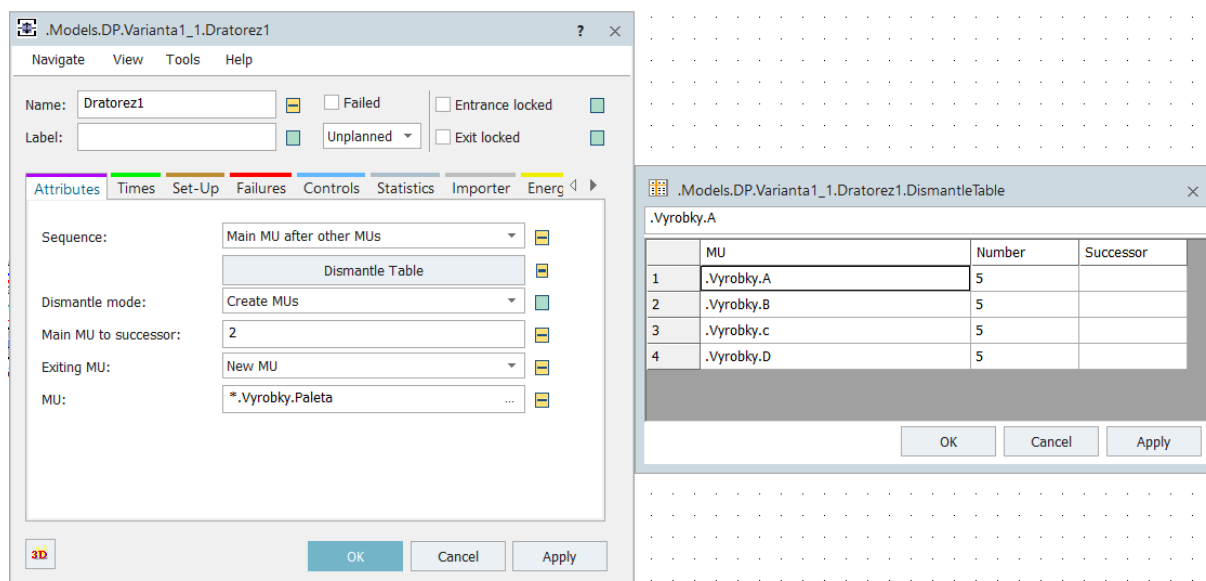
Obr. 40 Nastavení DMLS tiskárny I.

Nejprve byl na každém pracovišti vytvořen jeden prvek (v tomto případě byl použit pouze objekt SingleProc či DismantleStation), ve kterém se nastavily potřebné časy uvedené v předchozí tabulce (Tab. 7) a poté byl požadovaný prvek nakopírován na daný počet ( $P_{sskut}$ , uvedený v Tab. 8). Počet strojů byl určen na základě kapacitních propočtů. V té samé tabulce (Tab. 8) je zároveň uvedeno nastavení směnnosti na jednotlivých pracovištích (strojích). Směnnost se nastavila pomocí ShiftCalendaru, který byl popsán v kapitole 4.1. Směnnost v této variantě byla rozdělena použitím pouze 3 ShiftCalendarů. Pro každou směnu byl použit jeden. Směna 1 (ranní) trvá 8 hodin od 6:00 do 14:00. Ihned po ní následuje směna 2 (odpolední), která začíná ve 14:00 a končí přesně ve 22 hod. Poslední směnou je směna 3 (noční). Ta trvá od 22:00 do 6:00. Jelikož nebylo použité programování pomocí programovacího jazyka SimTalk, jednotlivé směny se nemohou prolínat.

Tab. 8 Směnnost a počet strojů - VI

Pracoviště	Počet směn	P <sub>sskut</sub>
DMLS	3	6
Řezání drátem	2	2
Tepelné zpracování	2	1
CNC	2	5
Omílání	1	1
Výstupní kontrola	2	2

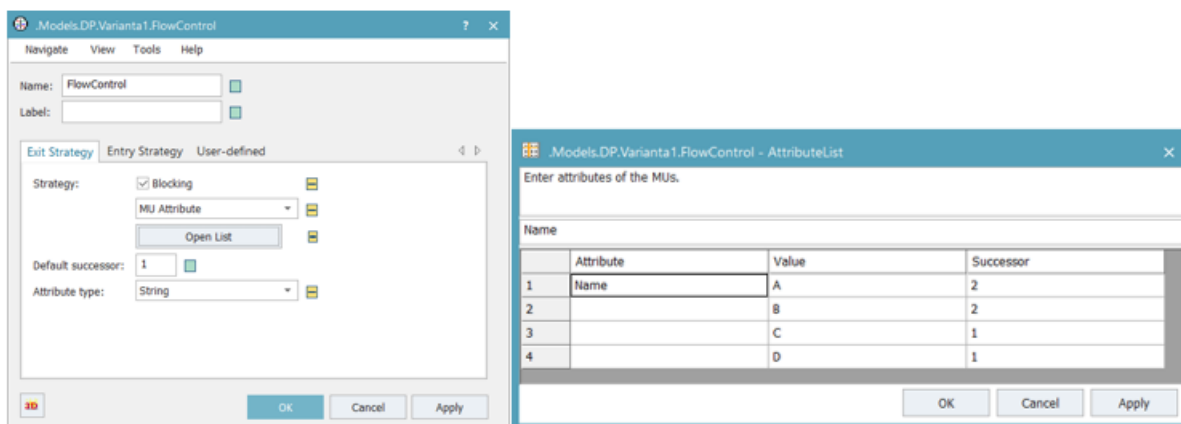
Nastavení DismantleStation (na pracovišti řezání drátem) je velmi důležitým krokem při nastavování modelu. Oproti standardnímu nastavení SingleProc se mimo výrobních a seřizovacích časů nastavuje také tzv. Dismantle Table. Ta určuje na kolik dílů se bude vytisknutá paleta rozřezávat. Nastavení DismantleStation je znázorněné na Obr. 41. Je důležité zadat správný počet dílů a také nastavit další Drain (zjednodušeně lze popsat jako místo zániku dané MU). Musí se dodat druhý Drain, který bude sledovat počet rozřezaných palet.



Obr. 41 Nastavení DismantleStation

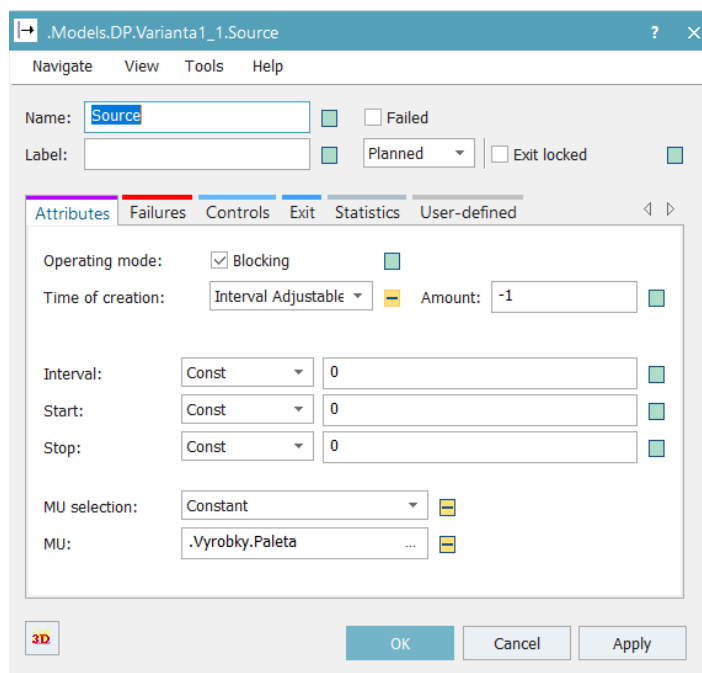
Dalším krokem při vytváření modelu byla validace materiálového toku, protože, jak již bylo zmíněno, výrobky A (resp. B) nejsou omílány, ale obráběny, zatímco výrobky C (resp. D) nejsou obráběny, ale omílány. Pro oddělení jednotlivých výrobků v první variantě posloužil prvek FlowControl, který rozdělil výrobky podle zadaného pravidla k jednotlivým pracovištím. Nastavení FlowControleru je znázorněno na obrázku níže (Obr. 42).





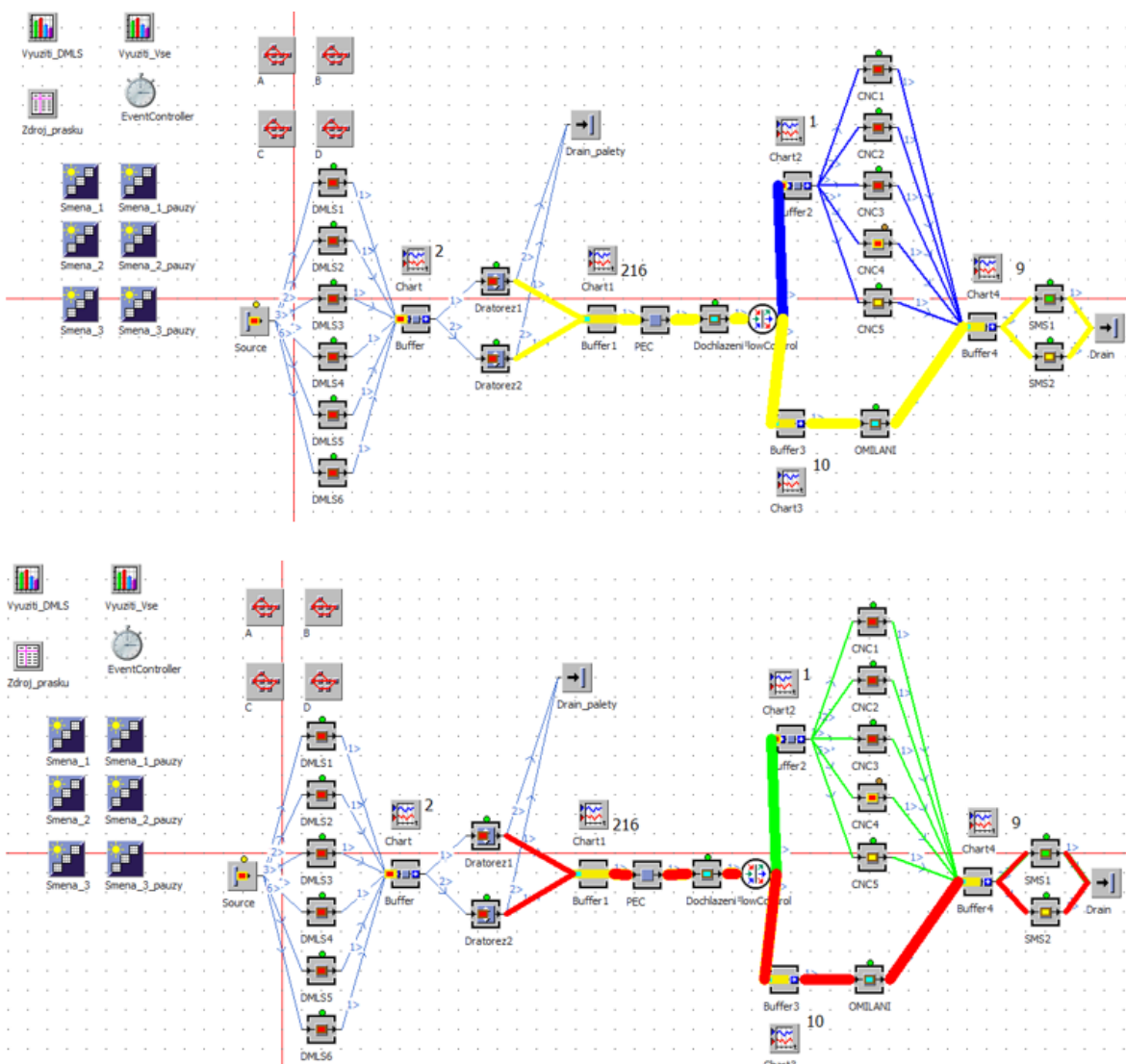
Obr. 42 Nastavení FlowControleru

V neposlední řadě je důležité nastavit zdroj MU (Source). Ve zdroji lze nastavit sekvenci, poměr kusů jednotlivých druhů či celkový počet kusů. Pro tento případ simulace, kdy se tiskne paleta (základní deska) s 20 ti artefakty, není třeba složitě nastavovat zdroj. Je nastavena pouze základní MU (paleta), která přichází na DMLS tiskárny a následně je rozřezána na jednotlivé artefakty. Nastavení zdroje je zobrazeno na Obr. 43.



Obr. 43 Nastavení Source

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.4, pro grafické zobrazení materiálového toku se v softwaru Plant Simulation používají Sankey Diagramy. Na Obr. 44 jsou v simulačním modelu první varianty zobrazeny Sankey diagramy pro jednotlivé výrobky, které jsou barevně odlišeny (A – modrá, B – zelená, C – červená, D – žlutá).







Obr. 44 Sankey diagramy - VI

### Vyhodnocení varianty 1

Během simulace první varianty bylo vyrobeno celkem 23 955 kusů výrobků (Obr. 45). Kapacitní propočty předpokládaly vyrobení 24 000 kusů za sledované období (365 dní). Od kapacitních propočtů se počet vyrobených kusů zjištěných pomocí simulace liší pouze o 45 kusů. Model byl nastaven tak, aby bylo možné sledovat i celkový počet vytištěných palet.

**Simulation time:** 365:00:00:00.0000

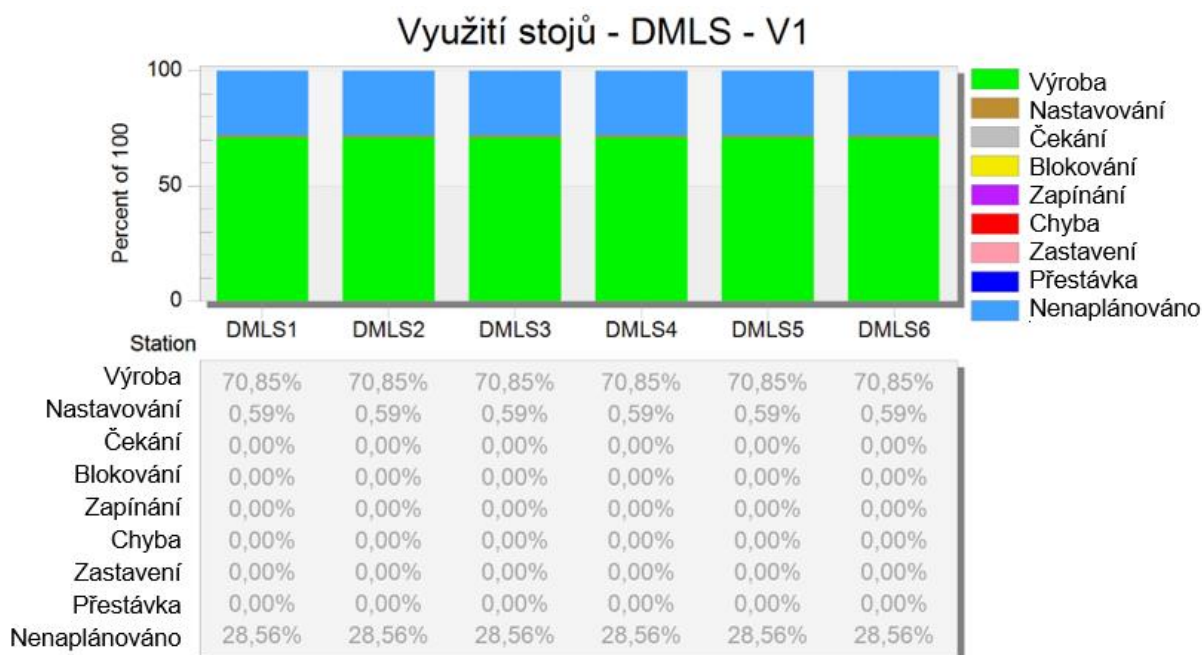
Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted									
Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
Drain	A	6:02:20:10.8498	5990	1	2.95%	0.00%	97.05%	1.34%	
Drain	B	5:22:54:10.1827	5995	1	3.01%	0.00%	96.99%	1.38%	
Drain	C	6:05:48:39.1388	5985	1	0.62%	0.00%	99.38%	0.38%	
Drain	D	6:03:32:55.7704	5985	1	0.64%	0.00%	99.36%	0.38%	
Drain_paleta	Paleta	0.0000	1236	0					

Obr. 45 Výsledek simulace - VI

Dalším sledovaným faktorem byla kapacita bufferů, která byla sledována pomocí funkce Chart a Display. Na základě kapacitních propočtů bylo předpokládáno možné vytvoření fronty na pracovišti tepelného zpracování, protože dle kapacitních propočtů vyšel potřebný počet strojů (pecí) na základě nastavené směnnosti 1,03, ale do simulačního modelu první varianty byl zakomponován pouze 1 stroj (pec). Celkový počet vytištěných palet s artefakty byl za sledované období 1236 (tzn. 24 720 kusů artefaktů v případě přepočtení na kusy artefaktů). Na pracovišti tepelného zpracování došlo vytvoření fronty rozřezaných artefaktů. Během sledovaného období fronta výrobků lineárně vzrostla až na hodnotu 733 kusů. Se skladováním takového počtu kusů by mohl být problém. Bylo by zabíráno hodně místa ve výrobní hale a výrobky by mohly bránit například plynulému průjezdu vysokozdvizného vozíku. Při porovnání s kapacitními propočty je důležité položit si otázku, proč se vytvořila fronta výrobků čekajících na obsluhu (na pracovišti tepelného zpracování) čítající až 733 ks. Simulační software Plant Simulation nebere v potaz při nastavení směnnosti státní svátky, a tudíž se při simulaci může navýšit roční využitelný fond. Kapacitní propočty počítaly s ročním využitelným fondem 251 pracovních dnů. V další variantě bude nutné řešit problém s vytvořenou frontou a bude se sledovat vliv snížení kapacity bufferů na celkový počet vyrobených kusů a využití DMLS tiskáren a strojů využívající technologii EDM drátového řezání.

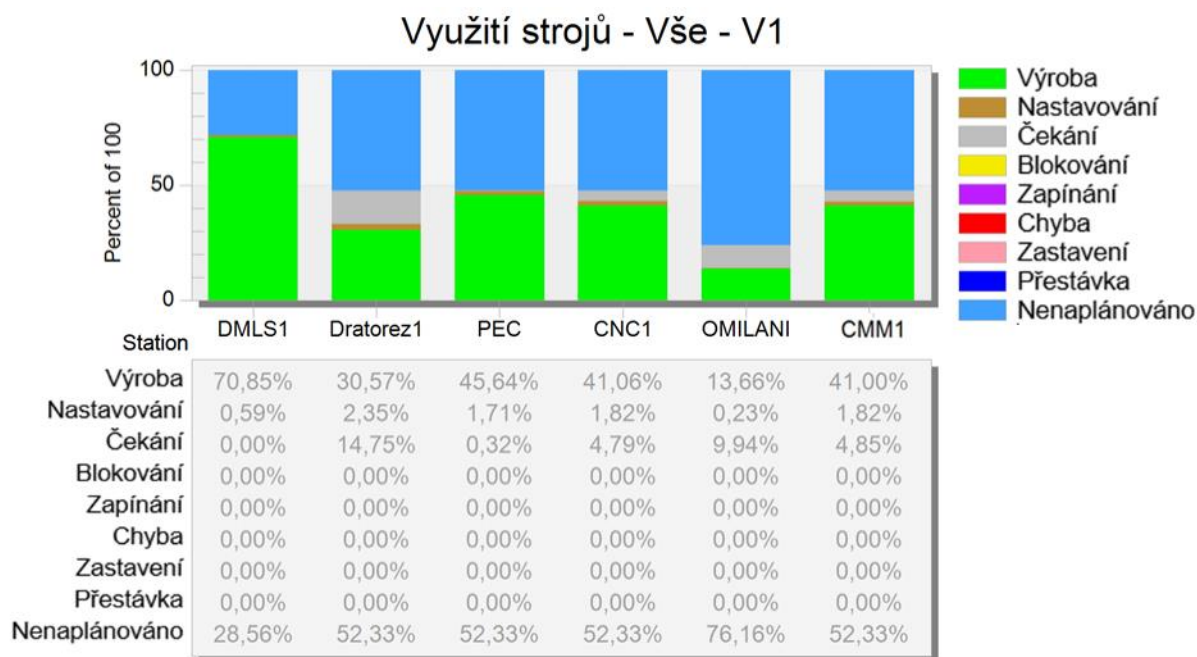
Během simulace se též sledovala vytíženost jednotlivých strojů. Bylo důležité zajistit, aby DMLS tiskárny byly využity co nejvíce z důvodu jejich vysokých pořizovacích nákladů a drahému provozu. Vytíženost všech DMLS strojů je znázorněna na Obr. 46, který nám graficky i početně udává informaci o využití všech DMLS tiskáren. Zelená barva znázorňuje práci stroje, hnědá barva přeseřizování a světle modrá barva nenaplánovanou činnost strojů (dny, kdy se nepracuje – tj. víkendy). Žlutá barva znázorňuje blokování stroje, které může být způsobeno např. nedostatečnou velikostí bufferů u následujících operací. Červená barva by byla zobrazena v případě, že by došlo k poruše stroje. Šedá barva znázorňuje čekání stroje na výrobek (výroba není dostatečně plynulá). Pokud by v modelu byly nastaveny přestávky na jednotlivých strojích, byla by v grafu uvedena tmavě modrá barva. Z Obr. 46 je zřejmé, že stroje jsou maximálně využity a jejich využití dosahuje 70,85 % z celkového času. Uvedená hodnota 70,85 % je maximální možná, která může být při tomto nastavení modelu dosažena, protože zbylý čas (29,15 %) je rozdělen na čas přeseřizování a čas nenaplánovaného provozu (nastavování stroje činí pouze 0,59 % z celkového času a

zbytek času - 28,56 % je kategorizován jako „nenaplánovaný provoz“ tzn. dny, kdy se nepracuje – víkendy).



Obr. 46 Využití strojů I. - VI

Následující obrázek (Obr. 47) znázorňuje, stejně tak jako ten předchozí (Obr. 46), využití strojů. V tomto případě je zobrazeno využití vždy jednoho stroje z každého pracoviště. Na všech zmíněných strojích kromě DMLS tiskárny a pece na tepelné zpracování výrobků dochází k čekání stroje na dodání výrobku. Potenciál na zlepšení efektivity využití strojů bude zejména na EDM drátořezech, kdy stroje čekají na další výrobky 14,75 % z celkového času. V porovnání s časem výroby je tato hodnota téměř poloviční. Dalším strojem (pracovištěm), kde docházelo k poměrně častému čekání, je na omílací buben. Doba čekání na výrobky na pracovišti omílání činila téměř 10 % z celkové času. Směnnost u omílacího bubnu je nastavena na 1 směnu, a tudíž nemůže dojít k upravení směnnosti. U ostatních strojů docházelo též k čekání na další výrobky, ale hodnota čekání není veliká. V další variantě se bude nutné věnovat snížení času čekání na pracovišti EDM řezání drátem. S největší pravděpodobností se tento problém vyřeší přenastavením směnnosti na tomto pracovišti.



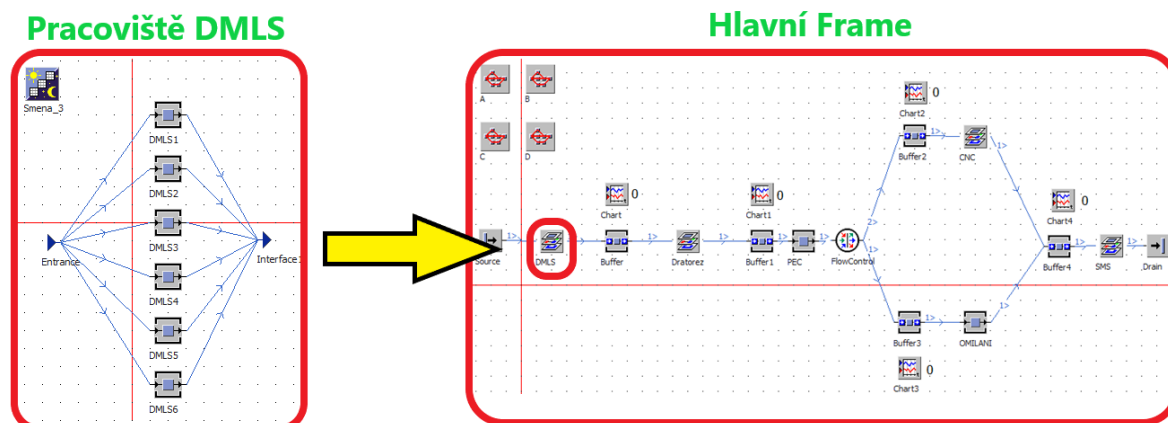
Obr. 47 Využití strojů II. - VI

## 5.2 Varianta 2

Druhá varianta řeší nedostatky předchozí varianty (velikost bufferů, snížení prostojů některých strojů a je upravena grafická podoba simulačního modelu). V předchozí variantě se ověřila správnost nastavení jednotlivých prvků a objektů simulačního modelu. Bude provedeno vyhodnocení této varianty a ověření, zda mělo jiné nastavení simulačního modelu vliv na počet vyrobených kusů či na využití jednotlivých strojů.

### Upravený vzhled modelu

Pro lepší orientaci v modelu byl simulační model graficky zjednodušen. Správnost modelu byla ověřena v předchozí variantě, a tudíž není nutné mít model podrobně zobrazen. Každé pracoviště bylo vytvořeno zvlášť a následně vloženo do hlavního framu. Tento princip je znázorněn na Obr. 48. Toto zjednodušení modelu se využívá především u rozsáhlých simulačních modelů, kvůli lepší orientaci.



Obr. 48 Vkládání detailně rozebraného pracoviště do hlavního framu

### Velikost bufferů

Na základě předchozí simulace byla upravena velikost bufferů u jednotlivých pracovišť. Největší změna kapacity byla provedena u bufferu na pracovišti tepelného zpracování. Z výsledků simulace varianty 1 vyšlo, že nejvyšší potřebná kapacita u bufferu na pracovišti tepelného zpracování je 733 kusů výrobků. Takové množství výrobků představuje obrovské požadavky na prostor. Kapacita tohoto bufferu bude přenastavena na 400ks výrobků. V Tab. 9 jsou znázorněny maximální hodnoty bufferů na jednotlivých pracovištích dosažené během simulace varianty 1 a také jsou zde uvedeny upravené kapacity bufferů použité v této variantě. Je možné, že změna kapacity bufferu nebude mít na počet vyrobených kusů žádný vliv, protože pracoviště drátorezu vykazovalo ve variantě 1 čas čekání tzn. stroje čekaly na dodání výrobků (palet s artefakty).

Tab. 9 Kapacita bufferů

Buffer před pracovištěm	Max. dosažená hodnota v simulaci varianty 1[ks]	Nastavená kapacita [ks]
<b>Drátorez</b>	60	100
<b>Tepelné zpracování</b>	733	400
<b>CNC obrábění</b>	20	40
<b>Omílání</b>	40	50
<b>Výstupní kontrola</b>	40	50

### Změna směnnosti

Na základě vyhodnocení využití jednotlivých strojů byla upravena směnnost na jednom pracovišti – pracoviště EDM řezání drátem. Kvůli neustálému čekání obou EDM strojů na vytisknuté palety se změnila






na jednom EDM stroji směnnost z dvousměnného provozu na jednosměnný. Očekává se velmi efektivní využití obou strojů využívající technologii EDM drátového řezání (tj. snížení doby čekání).

## Vyhodnocení varianty 2

V druhé variantě došlo v nastavení simulačního modelu k několika změnám. Grafická podoba modelu se změnila z důvodu zjednodušení, tj. implikace metody vkládání zvlášť vytvořených pracovišť do hlavního framu. Dále byla upravena velikost bufferů před každým pracovištěm, kdy např. u bufferu, který se nachází před pecí na žihání (pracoviště tepelného zpracování), byla maximální kapacita ve variantě 1 733 kusů. V této variantě (varianta č.2) se kapacita tohoto bufferu snížila o více než 300 kusů (na rovných 400 kusů). Proběhla změna v nastavení směnnosti na pracovišti EDM drátového řezání, kdy v předchozí variantě pracovaly oba dva stroje na dvousměnný provoz a v této, optimalizovanější variantě, pracoval jeden stroj na dvousměnný provoz, zatímco ten druhý pouze na jednosměnný provoz.

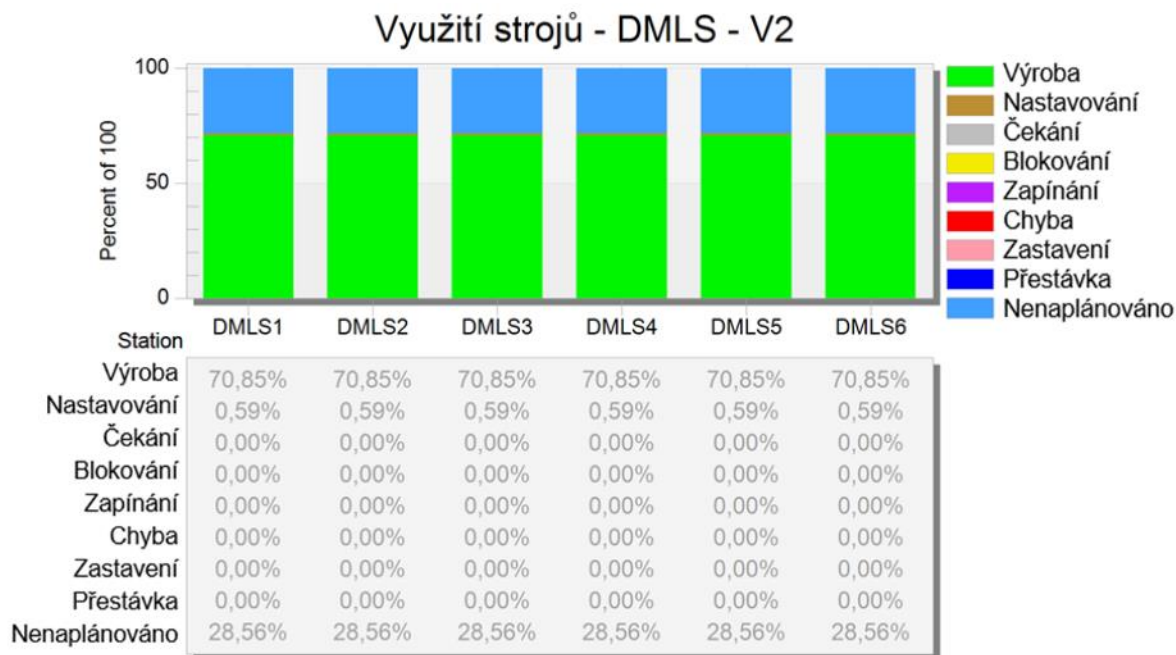
Během sledovaného období bylo vyrobeno celkem 23955 kusů. To je úplně stejně jako v předchozí variantě. Změnil se pouze počet rozřezaných palet (ve variantě č.1 bylo rozřezáno 1236 palet a ve variantě č.2 o 18 méně – 1218 palet). To je způsobeno tím, že EDM drátořezy byly velmi malou chvíli blokovány kvůli nedostatku místa v následujícím bufferu u tepelného zpracování (jeho kapacita byla omezena na 400ks a v případě vyčerpání jeho kapacity simulační software sám pozastavil výrobu na předchozím pracovišti – EDM řezání drátem). Jelikož byl počet vyrobených kusů za sledované období stejný jako u předchozí varianty, snížení kapacity bufferů a změna v nastavení směnnosti na pracovišti drátořezu neměly na počet vyrobených kusů vliv. Pec na tepelné zpracování i přes úpravu směnnosti na pracovišti EDM drátového řezání a snížení kapacity bufferu u pece stále dosáhla maximálního možného využití, a proto se nesnížil počet vyrobených kusů.

**Simulation time:** 365:00:00:00.0000

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted									
Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
Drain	A	4:15:51:25.2385	5995	1	3.38%	0.00%	96.62%	1.76%	
Drain	B	4:13:04:55.8298	5990	1	4.06%	0.00%	95.94%	1.80%	
Drain	C	4:20:06:44.8797	5985	1	0.80%	0.00%	99.20%	0.49%	
Drain	D	4:17:51:37.2366	5985	1	0.82%	0.00%	99.18%	0.50%	
Dratorez.Drain_palety	Entity	14:56.9335	1218	0	100.00%	0.00%	0.00%	94.73%	

Obr. 49 Výsledky simulace - V2

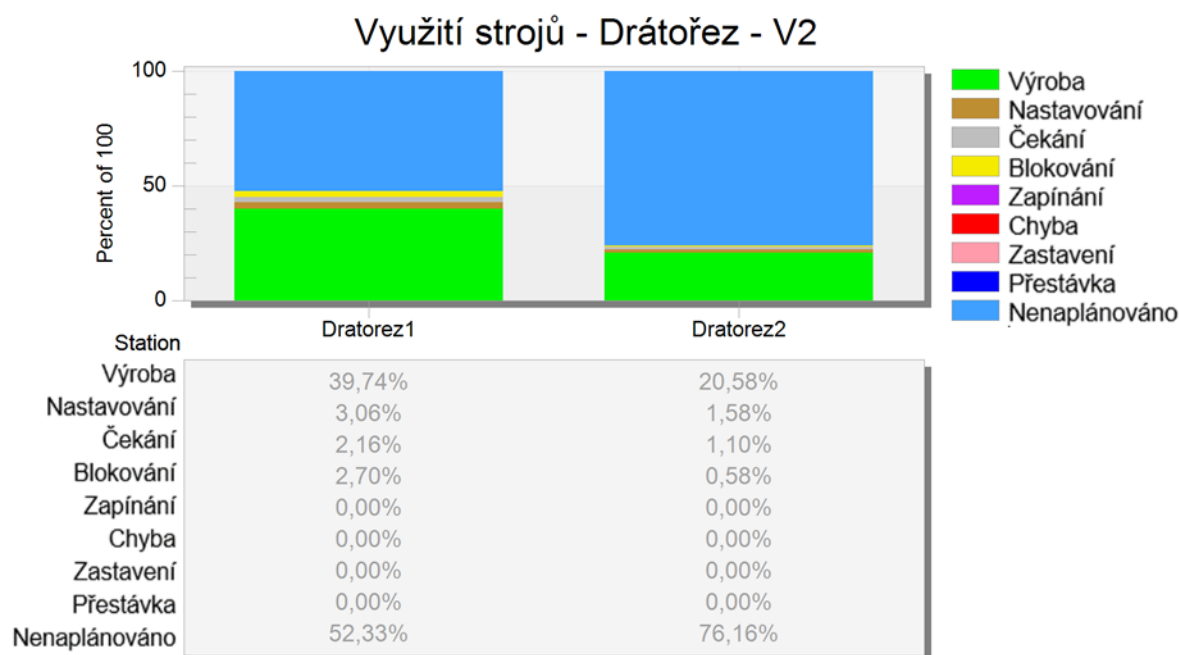
I u této varianty je důležité zkontrolovat, zda jsou DMLS tiskárny maximálně využity a nenastává situace, kdy jsou blokovány stroji, které následují ve výrobním procesu. Využití tiskáren je zobrazeno na Obr. 50. Výsledky jsou naprosto totožné s výsledky z předchozí varianty. Znamená to, že provedené změny (snížení kapacity bufferů a zároveň upravení směnnosti) neměly na využití DMLS tiskáren žádný vliv.



Obr. 50 Využití strojů I. - V2

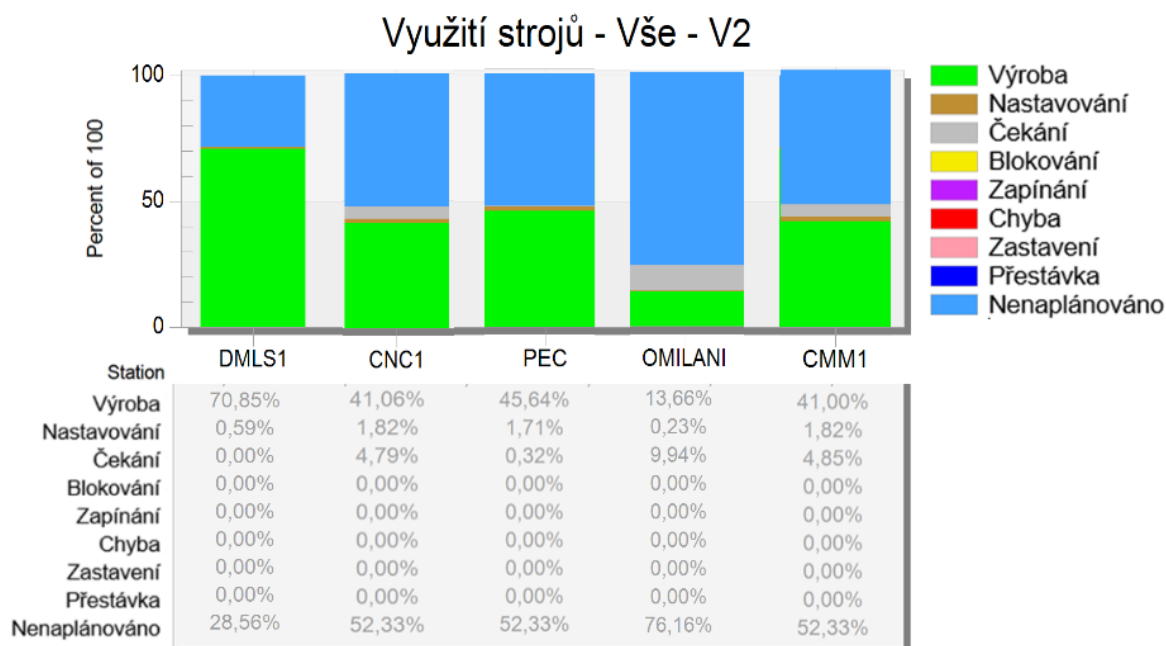
Jelikož se změnila směnnost na pracovišti EDM drátového řezání, je důležité uvést graf využití obou EDM drátořezů. Tento graf je zobrazen na Obr. 51. První EDM stroj (Dratorez1) stále pracuje na dvě směny, zatímco druhý stroj (Dratorez2) pracuje pouze na jednu směnu. Z Obr. 51 je patrné, že oba stroje jsou téměř maximálně využity (čas čekání prvního stroje je 3,06 % z celkového času a u druhého stroje pouze 1,1 % z celkového času). Při použití stejné směnnosti na obou strojích (viz. varianta 1) byla doba čekání u obou strojů 14,75 % z celkového času. Z důvodu snížení kapacity bufferů před pecí na tepelné zpracování jsou oba EDM stroje krátce blokovány. Čas blokování 2,7 % z celkového času (u prvního stroje) resp. 0,58 % z celkového času (u druhého stroje) nám nezpůsobil změnu v počtu vyrobených kusů.





Obr. 51 Využití strojů II. - V2

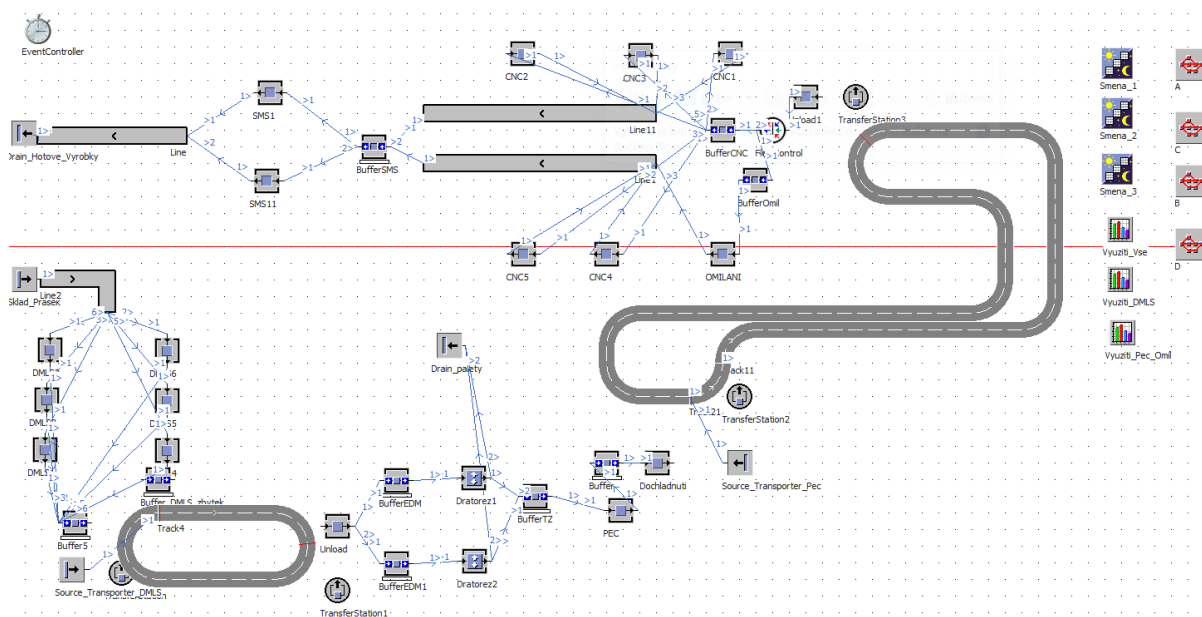
Využití zbylých strojů na ostatních pracovištích je zobrazeno na Obr. 52. Při porovnání s předchozí variantou je na využití na všech sledovaných strojích stejné a potvrzuje to také stejný počet vyrobených kusů. Doposud nebyla řešena logistika výrobků po hale. V další variantě budou implikovány dopravníky, které budou přemísťovat výrobky na delší vzdálenost po výrobní hale a také bude zaveden Transporter (přepravní vůz) na převoz vytištěných palet mezi DMLS tiskárnami a pracovištěm EDM drátového řezání a také od pracoviště tepelného zpracování k CNC frézám (resp. omílacímu bubnu).



Obr. 52 Využití strojů III. - V2

### 5.3 Varianta 3

V této variantě se řeší logistika výrobků po výrobní hale. Budou zde použity dopravní tratě, které přemístí výrobky na delší vzdálenost ve výrobní hale. Od DMLS tiskáren budou palety přepravovány pomocí Transporterů (přepravních vozů) na pracoviště EDM drátového řezání. Další použití Transporterů bude od pece na tepelné zpracování k CNC frézám a omílacímu bubnu. Kvůli možnosti lepšího zobrazení bude upravena grafická podoba simulačního modelu. Simulační model třetí varianty je možné vidět na Obr. 53.



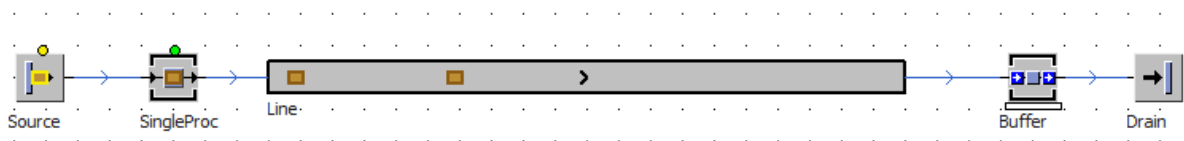
Obr. 53 Simulační model - V3

## Vytvoření layoutu

Aby bylo možné sledovat vliv dopravníků a přepravních vozů na celkový počet vyrobených kusů, byl vytvořen layout navrženého výrobního systému. Rozmístění strojů bylo zvoleno tak, aby byl patrný materiálový tok, a aby bylo možné využít logistické prvky simulačního softwaru Plant Simulation. Na Obr. 53 je možné vidět rozmístění jednotlivých strojů a polohu skladu kovového prášku a skladu hotových výrobků. Zmíněné sklady jsou vedle sebe proto, aby expedice hotových výrobků a doplňování skladu kovového prášku probíhala na stejném místě. Protože je v navrženém výrobním systému vyráběno poměrně velké množství výrobků, ale pouze 4 druhy, je možné použít předmětné rozmístění strojů, které je popsáno v kapitole 2.7.3. Detailní grafická podoba se bude řešit až v následující variantě (varianta 4).

## Nastavení dopravníků

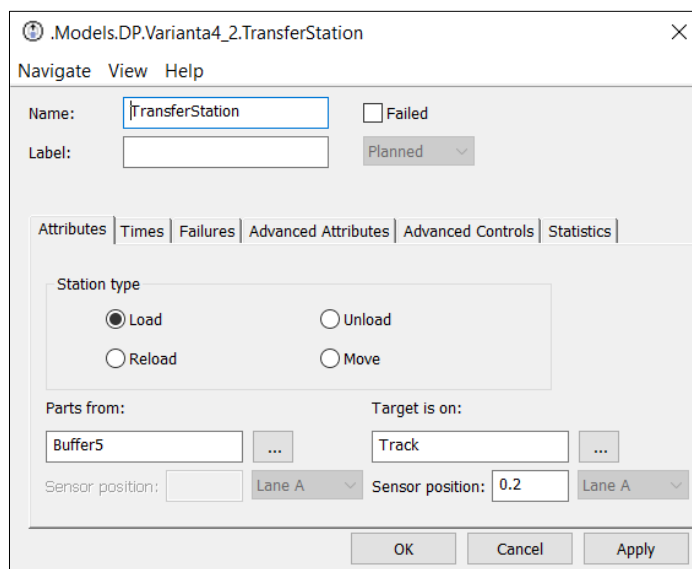
Jak již bylo zmíněno v úvodu této varianty, do simulačního modelu této varianty byly dodány dopravníkových tratě (dopravníky). Při vytváření simulačního modelu se použije funkce „Line“. U dopravní tratě se nastavuje například její délka, tvar, směr, rychlost a vzdálenost mezi výrobky. Celková délka dopravníků v simulačním modelu je 29 metrů. Použití dopravníků je znázorněno v zjednodušeném simulačním modelu na Obr. 54.



Obr. 54 Zjednodušený simulační model při použití dopravníku

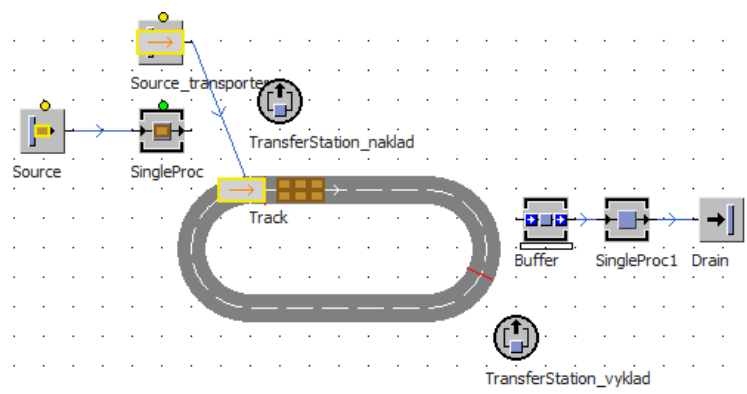
## Nastavení Transporterů

Transporter lze považovat za přepravní vůz, který se pohybuje po vytvořené cestě (Track). Je nutné u Transporteru nastavit jeho převozní kapacitu. Transporter je použit k přepravě vytištěných palet mezi DMLS tiskárnami a EDM drátořezy. Jeho použití je spojeno s nastavením dalších prvků, které jsou nezbytně nutné ke jeho správnému fungování. Nejprve je nutné vytvořit trať pro Transporter. K tomu se používá prvek modelu Track. Směr, tvar a délka Tracku se nastavuje stejně jako v případě nastavení dopravníku (Line). Následně je důležité zakomponovat do modelu dvě TransferStation, které slouží k nakládání (resp. vykládání) výrobků z Transporterů. U TransferStation se musí nastavit její typ (nakládání, vykládání, posunutí či znovupoužití). Kromě toho se nastavují místa, ze kterých má TransferStation výrobky nakládat, a kam je má nakládat. Obr. 55 znázorňuje okno nastavení TransferStation použité při nakládání výrobků na Transporter, který se nachází na Tracku, u pracoviště DMLS tiskáren.



Obr. 55 Nastavení TransferStation

Na Tracku bylo nutné vytvořit bod (senzor), kde se Transporter zastaví a počká na naložení. Nastavení TransferStation, které slouží k vykládání je velmi podobné nastavení TransferStation, která slouží k nakládání výrobků, jen je důležité změnit typ TransferStation na „Unload“. Aby bylo možné dodat Transporter na Track, musí se použít další „Zdroj MU“ (Source), který místo entit (prášku, palet) produkuje Transportery. Celkový počet Transporterů mezi DMLS tiskárnami a EDM drátořezy byl stanoven pouze na 1, protože není potřeba mít více Transporterů. Mezi pecí na tepelné zpracování budou pro jistotu použity 2 Transportery. Na závěr se musí určit kapacita Transporteru. Pro Transporter přepravující vytištěné palety mezi DMLS tiskárnami a pracoviště EDM řezání drátem byla stanovena kapacita Transporteru na 6 palet. Jelikož rozměry tisknuté palety s artefakty mají nastavený universální rozměr (1x1x1) a požadovaná kapacita je 6 palet, musí se změnit rozměry Transporteru, který přepravuje vytištěné palety. Kapacita Transporteru se nastavuje pomocí součinu všech rozměrů (X-Y-Z). Je proto možné použít více kombinací rozměrů (např. 6x1x1, 3x2x1). V tomto případě byly použity rozměry 3x2x1. Rozměry Transporteru mezi pecí a CNC frézky (resp. omílacím bubnem) jsou stanoveny na 20 kusů. Použité rozměry Transporterů připravující výrobky mezi pecí a CNC frézky (resp. omílacím bubnem) jsou 4x5x1. Počet Transporterů přepravující výrobky od pracoviště tepelného zpracování je 2. Celková vzdálenost, kterou urazí výrobky během celého výrobního procesu na Transporterech činí 52 metrů. Použití Tracku, Transporteru a dvou TransferStation je zobrazeno na zjednodušeném simulačním modelu (viz. Obr. 56).



Obr. 56 Zjednodušený simulační model při použití Transporteru

### Vyhodnocení varianty 3

Během simulace varianty 3 bylo za sledované období vyrobeno celkem 23821 kusů výrobků (artefaktů) (viz. Obr. 57). Oproti předchozí variantě došlo k poklesu o 134 kusů. Vstupní parametry modelu (výrobní a dávkové časy, počet strojů a nastavení směnnosti) byly použity stejné jako v předchozí variantě. Bylo rozřezáno celkem 1211 kusů vytištěných palet. Oproti předchozí variantě se počet rozřezaných palet snížil o 7. Tento pokles může být způsoben nakládáním vytištěných palet s artefakty na Transporter v okamžik uplynutí 365 dnů (zpoždění kvůli přepravě).

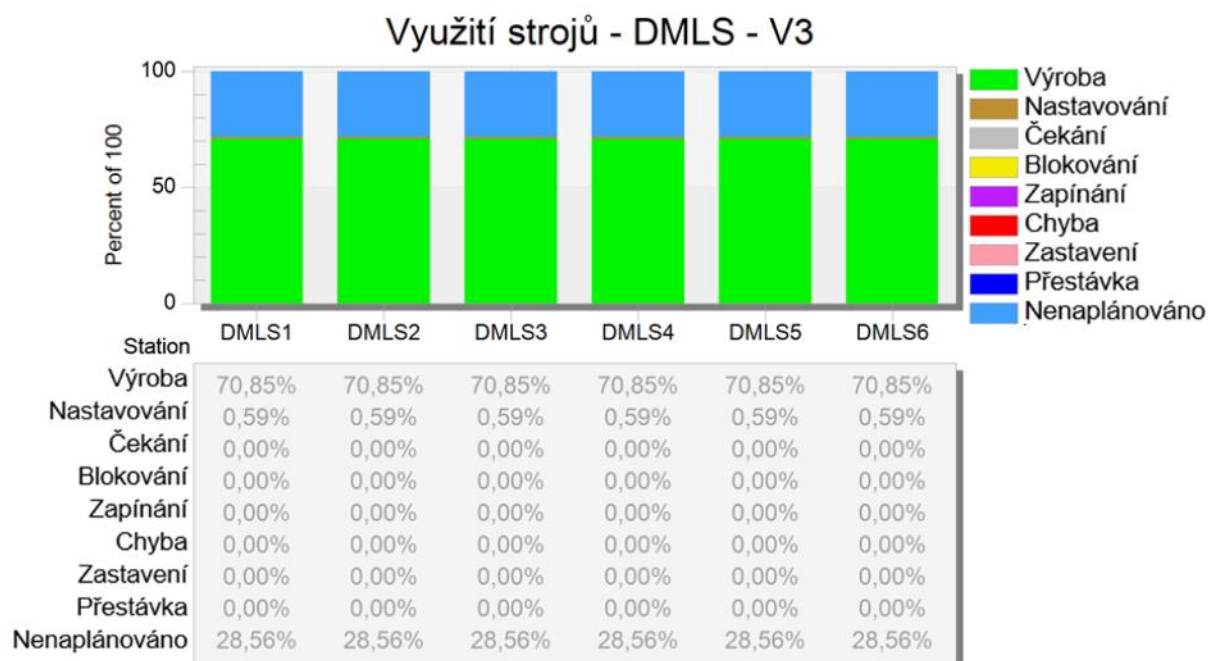
**Simulation time:** 365:00:00:00.0000

**Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted**

Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
Drain_Hotove_Vyrobky	A	4:18:33:57.7938	5955	1	3.94%	0.84%	95.22%	1.82%	
Drain_Hotove_Vyrobky	B	4:17:47:56.4825	5955	1	3.81%	2.36%	93.83%	1.83%	
Drain_Hotove_Vyrobky	C	4:14:52:22.6105	5955	1	1.16%	4.04%	94.81%	0.62%	
Drain_Hotove_Vyrobky	D	4:14:11:44.1569	5956	1	1.15%	5.66%	93.19%	0.62%	
Drain_palety	Paleta	15:46.0719	1211	0	100.00%	0.00%	0.00%	89.94%	

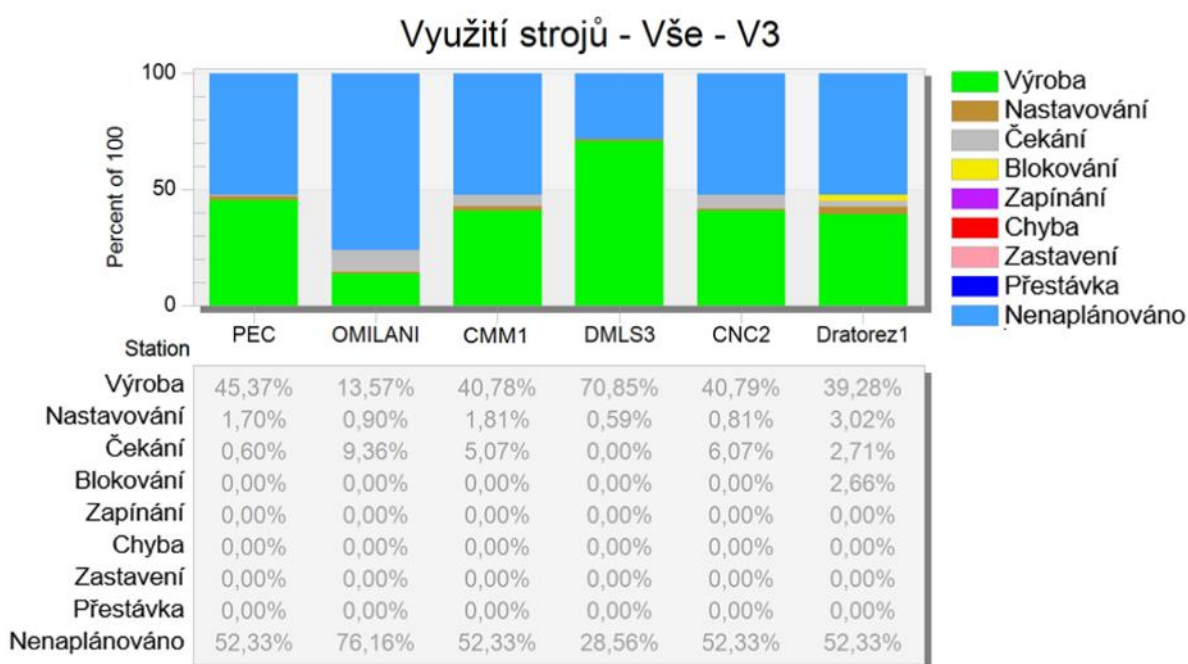
Obr. 57 Výsledek simulace - V3

Na následujícím obrázku (Obr. 58) je znázorněno využití DMLS tiskáren. Při porovnání hodnot s předchozí variantou nedošlo ke žádné změně a všechny hodnoty jsou stejné. Tím pádem je ověřeno, že logistické prvky neměly vliv na využití DMLS tiskáren.



Obr. 58 Využití strojů I. - V3

Při sledování využití jednotlivých strojů (Obr. 59) došlo např. na pracovišti EDM řezání drátem na stroji č.1 (Dratorez1) ke snížení celkové doby blokace o cca 0,5 %. To může být způsobeno zvýšením přepravního času výrobků na pracoviště. Jelikož se na rozřezání dostalo méně palet (bylo odděleno méně artefaktů), netvořila se tak velká fronta výrobků čekajících na tepelné zpracování. Využití na ostatních pracovištích se oproti předchozí variantě změnilo maximálně o 0,3 %.

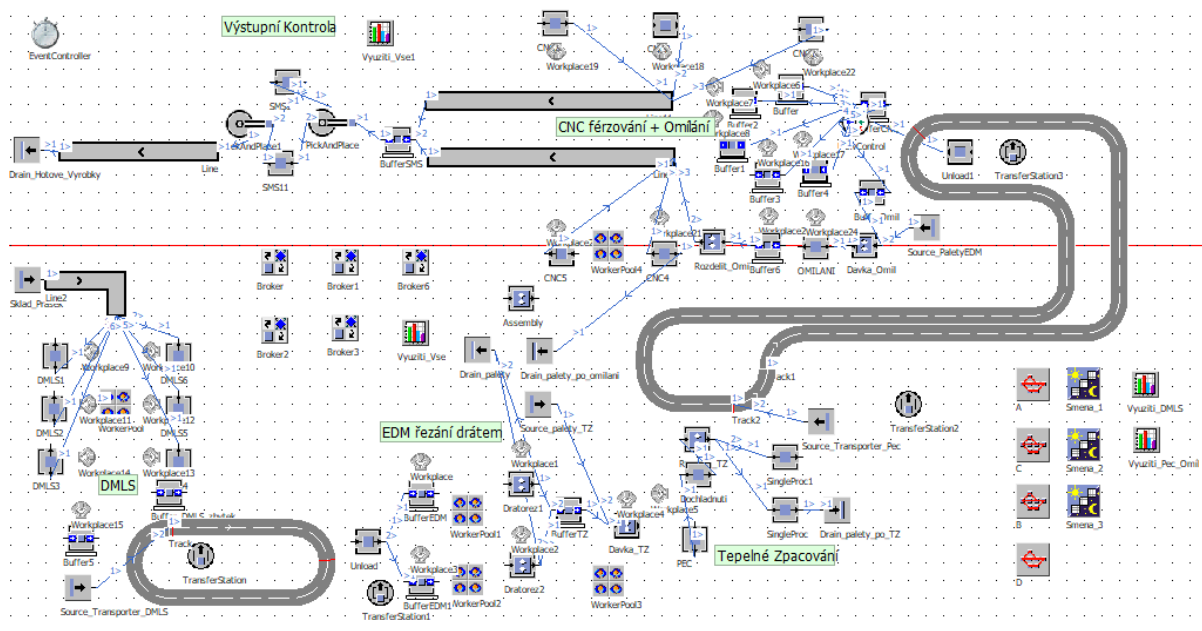


Obr. 59 Využití strojů II. - V3

## 5.4 Varianta 4

Tato varianta je finální variantou vývoje návrhu modelu digitální továrny. Doposud simulační modely neuvažovaly manipulační časy mezi stroji a buffery na daném pracovišti. Jednotlivé prvky modelu byly spojeny pomocí Connectorů a tím pádem přesun výrobků nezabíral žádný čas. Aby se model co nejvíce přiblížil realitě, je nutné zakomponovat do simulačního modelu čas manipulace s výrobky ze stroje do bufferu. Na pracovišti výstupní kontroly (CMM) by použit koncept, který byl využit na strojírenském veletrhu v Brně v roce 2018, kde Fakulta strojní ČVUT v Praze představovala využití kolaborativních robotů v metrologii za použití CMM Duramax od firmy Zeiss. Kolaborativní robot YuMi od firmy ABB byl zvolen z důvodu možnosti jeho využití např. pracovišti ruční montáže drobných dílů (montáž el. zásuvek) ve spolupráci s člověkem. Důvodů, proč byl vybrán právě CMM Duramax jsou možnosti jeho použití. CMM Duramax lze přemístit pomocí paletového vozíku a není nutné mít v jeho blízkosti kompresor na natlakování vzduchového vedení. Další výhodou tohoto stroje je jeho teplotní stabilita (může pracovat za teplot v rozmezí od 18 °C do 30 °C. [27] [28])

Kolaborativní robot od firmy ABB (YuMi) zakládal do speciálního přípravku v souřadnicovém měřicím stroji součástky a oba stroje mezi sebou vzájemně komunikovaly. Docházelo tedy k měření dané součásti bez nutné přítomnosti obsluhy. Aby byl pozorovatelný rozdíl ve vyrobených kusech za sledované období jsou vstupní parametry modelu (směny, počet strojů, výrobní a dávkové časy, délka dopravníků) stejné jako v předchozí variantě. Simulační model varianty 4 je možné vidět na obrázku níže (Obr. 60).



Obr. 60 Simulační model 2D - V4

V předchozí variantě byl zmíněn návrh layoutu strojního zařízení. Simulační software Plant Simulation umožňuje zobrazit vytvořený simulační model také ve 3D pohledu (Obr. 61). Aby se zlepšila grafická

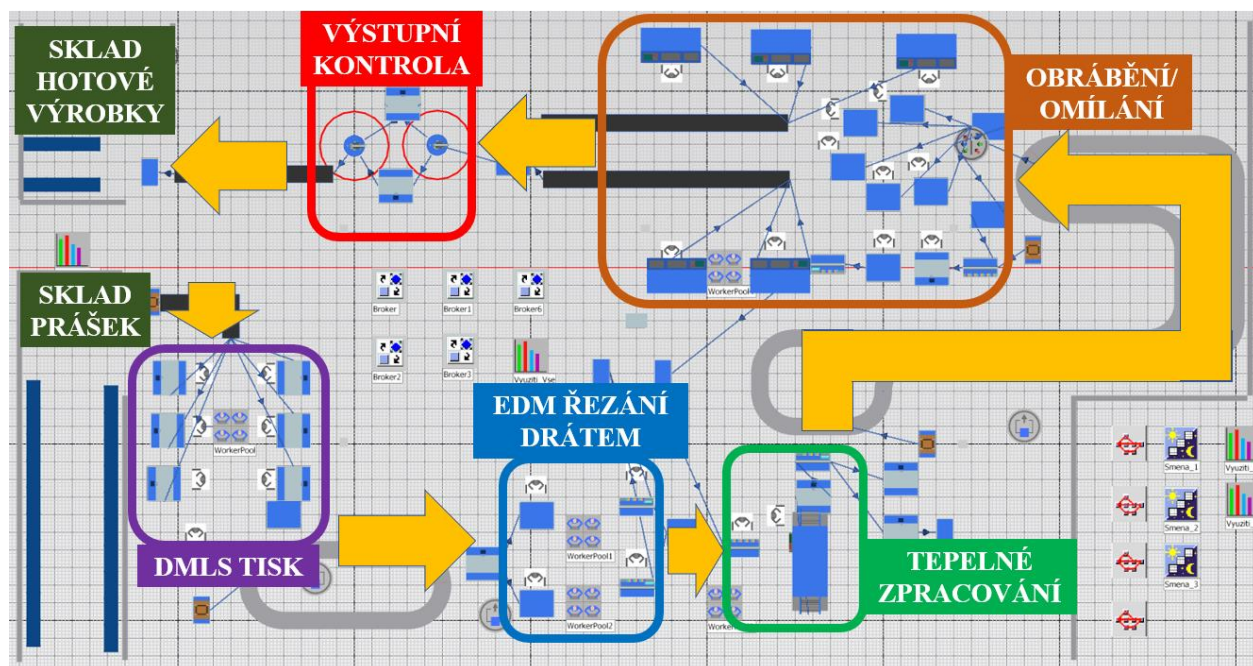
podoba simulačního modelu, byly do simulačního modelu přidány zdi, nosné sloupy, u některých strojů byla změněna grafika a byl vytvořen sklad kovového prášku a sklad hotových výrobků.



Obr. 61 Simulační model 3D - V4

Pro zobrazení materiálového toku navrženého výrobního systému digitální továrny bylo vytvořeno schéma níže (Obr. 62). Kovový prášek je pomocí dopravníku dopraven k DMLS tiskárnám. Vytisknuté palety jsou naloženy na Transporter o celkové kapacitě 6 palet, který palety odveze na apretaci na pracoviště EDM řezání drátem. Po odřezání jednotlivých artefaktů od základní desky a odstranění podpor, které jsou nedílnou součástí výrobku 3D tisku, se artefakty musí tepelně zpracovat. Jakmile žíhané výrobky vychladnou, jsou naloženy na další Transporter o celkové kapacitě 20 výrobků, který je odveze na pracoviště CNC obrábění a omílání. Od CNC frézek a omílacího bubnu jsou výrobky přemístěny pomocí dopravníku k CMM. Posledním pracovištěm je výstupní kontrola, kde první kolaborativní robot umístí jednotlivé výrobky do přípravku v CMM. Jakmile je artefakt změřen, druhý kolaborativní robot jej vyjme z přípravku a umístí na dopravník vedoucí do skladu hotových výrobků.

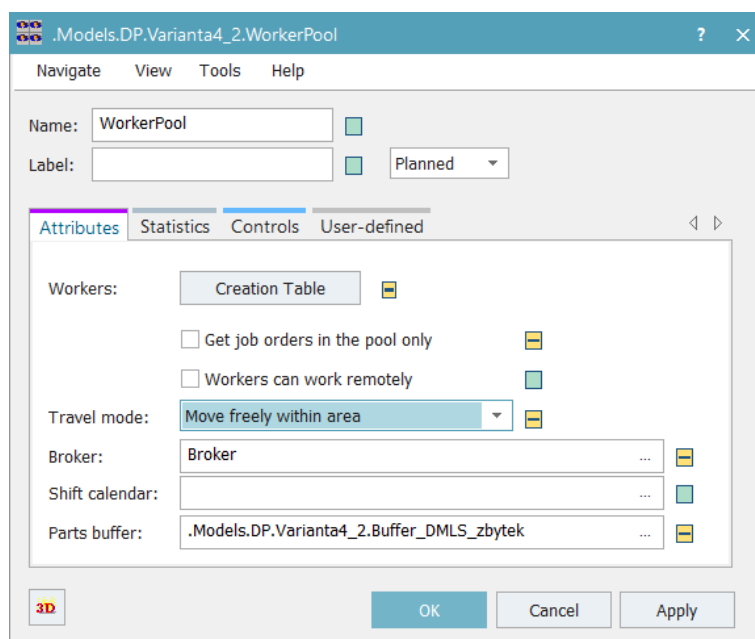




Obr. 62 Materiálový tok - V4

### Nastavení pracovníků

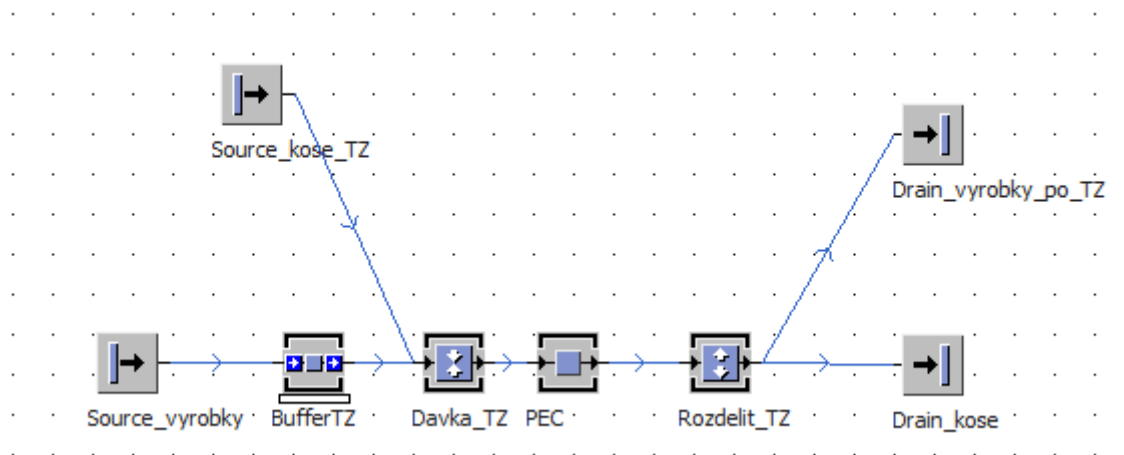
Pracovník může v modelu sloužit k výrobě, seřizování stroje, přenosu některých MU a také může opravovat stroje v případě jejich poruchy. Daný pracovník je přiřazen k pracovnímu místu (objekt Workplace) či více místům a může vykonávat i více činností (servis, výroba, manipulace). Přiřadit některé úkoly pracovníků lze i bez znalosti programovacího jazyka SimTalk. Základními prvky, které je nutné použít v případě vytváření simulačního modelu s pracovníky je WorkerPool a Broker. WorkerPool (jehož hlavní okno je znázorněno na Obr. 63) je místo, ze kterého pracovníci docházejí k úkolu. V jeho nástrojích je možné nastavit počet pracovníků a také přiřadit k jednotlivým pracovníkům specializovanou pozici (např. pracovník č.1 dělá pouze seřizování a pracovník č.2 dělá pouze přenos výrobků z místa na místo). Dále je nutné nastavit Broker (tzv. správce pracovníků), který vysílá pracovníky k jejich úkolu. Důležitým nastavením je pohyb pracovníků. Pracovníci se mohou pohybovat volně, po vyznačených trasách nebo jsou ukotveni k pracovnímu místu. V případě, že by se vytvářel velmi důkladný simulační model, bylo by nutné nastavit parametry pracovníka (efektivita, rychlost pohybu a kapacitu přenášeného břemena) a použít programovací jazyk, aby bylo možné pracovníkovi přiřadit více činností, které by vykonával.



Obr. 63 Nastavení WorkerPool

Pro každé pracoviště byl použit jeden WorkerPool. Ten byl umístěn do strategického místa z hlediska vzdálenosti od stroje či bufferu tak, aby byl co nejbližší k objektům, které pracovník obsluhuje. Pro každý WorkerPool v simulačním modelu bylo nutné použít jiný Broker, aby nedocházelo k tomu, že pracovníci budou chodit po všech strojích a dělat i práci, kterou by dělat neměli.

Doposud nebylo nutné u tepelného zpracování a omílání do modelu zadávat seskupení výrobků na palety kvůli velikosti dávek. V minulých variantách byl výrobní a dávkový čas upraven tak, že se vydělil počtem kusů v dávce a získal se dávkový čas, který je vztažený na jeden výrobek. Předchozí nastavení bylo možné použít z důvodu nulových přepravních časů mezi stroji a buffery (objekty byly propojeny Connectory). Kdyby musel pracovník jít s každým kusem do stroje zvlášť, znamenalo by to zkreslení výsledků simulace. Před pecí na tepelné zpracování si pracovník vytvoří dávku a objemu 40 kusů (koš). Tento koš umístí do pece a po skončení tepelného zpracování výrobky jsou výrobky z koše naloženy jednotlivě na Transporter, který výrobky dopraví k ostatním strojům (CNC frézky a omílací buben). Toto nastavení modelu je ve zjednodušené podobě znázorněno na Obr. 64. Stejný princip byl použit u pracoviště omílání. Díky tomuto nastavení modelu je možné zjistit celkový počet dávek a ověřit, zda tento počet odpovídá kapacitním propočtům.



Obr. 64 Vytvoření dávek

Všechny technologie použité v tomto výrobním systému umožňují použití vícestrojové obsluhy. Proto není nutné mít na každém pracovišti stejný počet pracovníků jako strojů. Pracovníci na DMLS tiskárnách mají za úkol pouze nastavit stroj a po vytištění přemístit vytištěnou paletu s artefakty na Transporter, který dopraví palety k EDM drátořezům. Prášek je k tiskárnám dopravován pomocí dopravníku (viz. varianta 3). DMLS tiskárny obsluhují pouze 2 pracovníci, protože by bylo zbytečné mít více pracovníků, když samotné tisknutí palety zabere 30 hodin.

Na pracovišti EDM drátového řezání jsou z důvodu omezených možností při vytváření simulačního modelu bez použití programovacího jazyka SimTalk dva pracovníci, jenž každý z nich obsluhuje jeden stroj (jsou-li v provozu oba stroje najednou). Pracovník umísťuje palety s artefakty do stroje a nastavuje stroj.

Obsluha pece na tepelné zpracování má za úkol nandat výrobky do koše na tepelné zpracování a následně koš odnést do pece. Z pece koš automaticky vyjíždí na místo, kde se výrobky dochlazují a následně jsou výrobky z koše odebrány a naloženy na Transporter. Jelikož je pec pouze jedna, není nutné mít více než jednoho pracovníka na směně.

Po vykládce výrobků z Transporterů dochází k selekci výrobků. Toto třídění probíhá automaticky pomocí prvku FlowControl. Obsluha na pracovišti CNC frézování obsluhuje i omílací buben. Obsluhování omílacího bubnu není složité, a proto není důvod, aby jej pracovníci obsluhující CNC frézky nemohli obsluhova. Na tomto pracovišti jsou na směně celkem 3 pracovníci. Na pracovišti CNC frézek má obsluha donést neobrobený artefakt do stroje a ten následně nastavit. U omílacího bubnu musí pracovník celou dávku, která již byla omílána, přenést do DismantleStation (náhrada za čas vyložení na dopravní pás). Po opracování artefaktů výrobky putují pomocí dopravníků do bufferu u CMM strojů. Artefakty jsou umístěny pomocí kolaborativního robota do přípravku v CMM Duramax. Vyjmutí změřených výrobků zajišťuje další robot, který odkládá zkontrolované a vyhovující výrobky na další dopravník, který dopraví artefakty do skladu hotových výrobků. Z důvodu přenosu výrobků pracovníky a také použití vícestrojové obsluhy se

očekává značné snížení vyrobených kusů za sledované období a s tím spojené snížení využití jednotlivých strojů.

### Nastavení PickAndPlace

Objekt PickAndPlace lze chápat jako manipulační robot, který má za úkol výroby přemísťovat z místa na místo (z anglického jazyka *pick and place*). Samotné nastavení PickAndPlace není složité. Je nutné nastavit pouze místo, ze kterého se budou výrobky odebírat, a kam se budou jednotlivé výrobky zakládat. Jelikož je na obou CMM nastavena stejná směnnost, u bufferu před CMM stroji postačuje cyklické nastavení Exit Strategy (strategie výstupu) tzn. že výrobky jsou zakládány do přípravku v CMM střídavě do obou CMM.

Pokud se nastaví místo odložení výrobku a zároveň místo, ze kterého si robot výrobek odebírá, jsou automaticky zobrazeny úhly (Obr. 65), o které se musí robot otočit, aby mohl bezpečně uložit artefakty do přípravku resp. odebrat z přípravku v CMM a naložit na dopravník. V levé části Obr. 65 jsou znázorněny časy přesunu výrobku mezi jednotlivými místy. Tyto časy byly automaticky vypočítány simulačním softwarem Plant Simulation.

Full\Empty	Default Angle	BufferSMS	SMS1	SMS11
Default Angle	0.0000	0.2375	4.1296	4.7161
BufferSMS	0.0000	0.0000	4.3671	4.4786
SMS1	0.0000	4.3671	0.0000	3.1543
SMS11	0.0000	4.4786	3.1543	0.0000

	Name	Angle
1	BufferSMS	7.19
2	SMS1	236.11
3	SMS11	141.48

Obr. 65 Úhly natočení a časy při přesunu výrobků

### Výsledky varianty 4

Během simulace varianty 4 bylo za sledované období vyrobeno 23660 kusů. V minulé variantě bylo vyrobeno o 161 kusů více. Zakomponování pracovníků do simulačního modelu mělo poměrně velký vliv na počet vyrobených kusů. Ze všech provedených variant byl pokles celkového počet vyrobených kusů v této variantě nejvyšší i přes to, že byl rozřezán stejný počet vytisknutých palet.

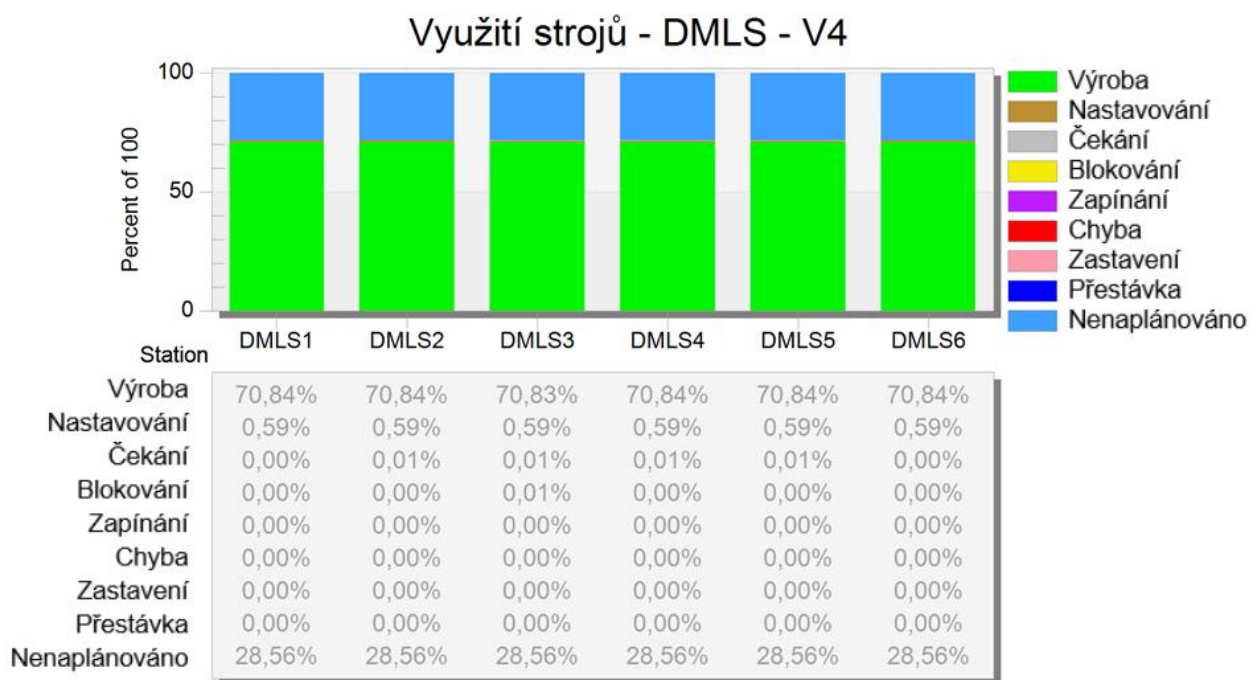
Simulation time: 365:00:00.0000

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted

Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
Drain_Hotove_Vyrobky	A	6:14:32:24.2358	5917	1	3.33%	30.85%	65.82%	1.14%	
Drain_Hotove_Vyrobky	B	6:13:40:37.6058	5917	1	3.33%	31.12%	65.55%	1.14%	
Drain_Hotove_Vyrobky	C	7:10:48:12.6010	5913	1	0.88%	43.95%	55.17%	0.17%	
Drain_Hotove_Vyrobky	D	7:10:24:43.5216	5913	1	0.84%	44.05%	55.11%	0.17%	
Drain_palety	Paleta	52:49.3208	1211	0	100.00%	0.00%	0.00%	22.09%	
Drain_palety_po_omilani	Paleta_Omil	2:21:59:32.8336	296	0	100.00%	0.00%	0.00%	5.71%	
Drain_palety_po_TZ	Paleta_TZ	2:13:19:23.8160	594	0	77.97%	22.03%	0.00%	17.42%	

Obr. 66 Výsledek simulace - V4

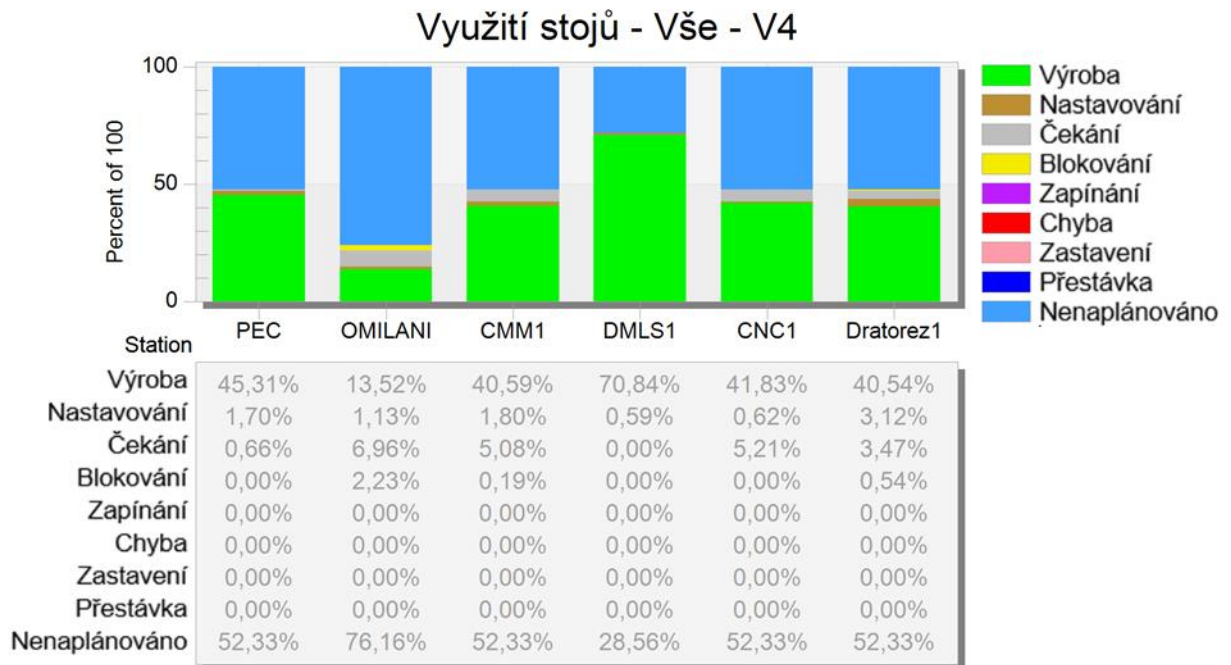
Na obrázku znázorňující využití DMLS tiskáren (Obr. 67) si je možné všimnout času čekání u jedné tiskárny a zároveň i malého blokování. Čas čekání je z největší pravděpodobnosti způsoben cestou pracovníka z „WorkerPoolu“ na pracoviště (k tiskárně). Hodnotu 0,01 % lze považovat za zanedbatelnou, a tudíž je možné říci, že zakomponování pracovníků při použití vícestrojové obsluhy nemělo u DMLS tiskáren vliv na využití DMLS tiskáren.



Obr. 67 Využití strojů I. - V4

Na první pohled nejsou oproti využití vybraných strojů z předchozí varianty patrné rozdíly. Při důkladnějším pozorování se zjistí, že u omílacího bubnu vzrostl čas nastavování stroje o 0,2 %. Lze říci, že v přechodí variantě (varianta 3) byl u omílacího bubnu čas čekání 9,36 %. Tento čas byl ve variantě 4 pravděpodobně rozložen do času blokování (2,24 %) a čekání (6,95 %). To mohlo být zapříčiněno

přemístěním celé dávky (40 kusů) pracovníkem z omílacího bubnu do DismantleStation, která měla znázornit vyložení kusů na dopravník. Stroj byl proto blokován a nemohl pracovat.



Obr. 68 Využití strojů II. - V4

## 6 Technicko-ekonomické zhodnocení variant

Celkem byly provedeny 4 simulace vytvořeného simulačního modelu v softwaru Plant Simulation, který měl znázorňovat výrobu artefaktů pomocí DMLS tiskáren a použití konvenčních technologií, nezbytných pro úpravu vytištěných artefaktů. Vycházelo se z kapacitních propočtů, které byly vytvořeny na základě podobnosti s jiným výrobním systémem, který využíval aditivní technologie ve spojení s konvenčními. Jedním z hlavních požadavků pro vytváření jednotlivých variant modelu bylo maximální využití DMLS tiskáren z důvodu jejich vysoké pořizovací ceny a provozních nákladů. Dalším sledovaným parametrem byl počet vyrobených kusů za sledované období. Toto období bylo nastaveno na 365 dní (1 rok). Postupně byl simulační model optimalizován a sledoval se vliv jednotlivých změn na celkový počet vyrobených kusů a využití strojů. Počet strojů byl určen již před samotným vytvářením simulačního modelu na základě kapacitních propočtů. Tento počet nebyl ve vytvořených variantách pozměněn.

Tabulka níže (Tab. 10) srovnává počet vyrobených kusů za sledované období v porovnání s kapacitními propočty. Výsledek simulace prvních dvou variant (varianta 1 a varianta 2) nezaznamenal žádnou změnu v počtu vyrobených kusů. Ve variantě 2 byla řešena kapacita bufferů u jednotlivých pracovišť (strojů). Kapacita jednotlivých bufferů byla sledována v průběhu celé simulace první varianty a na základě výsledků se kapacita bufferů v další variantě upravila. Buffer před pecí na tepelné zpracování obsahoval v průběhu simulace první varianty až 733 kusů. Takto velká fronta čekajících výrobků byla způsobena větším počtem pracovních dnů v simulaci, než kapacitní propočty uvažovaly. Na základě výsledků využití strojů byla upravena směnnost na jednom pracovišti – EDM řezání drátem. Kapacitní propočty udaly počet potřebných EDM drátořezů pro vyrobení požadovaného počtu kusů - 1,39 stroje. Do modelu byly vloženy dva stroje, které fungovaly v první variantě na dvousměnný provoz. Byla upravena směnnost – stroj č.1 běží na dvousměnný provoz a stroj č.2 pouze na jednosměnný. Touto změnou nastavení se využití obou strojů dostalo téměř k maximálního možné hodnotě (nevznikaly skoro žádné prostoje ve výrobě).

Ve třetí variantě byly do modelu zakomponovány logistické prvky – dopravníky a Transportery. Na základě provedené rešerše o problematice plánování byl navrhnout layout výrobního systému. Použití dopravníků a Transporterů znamenalo pokles vyrobených výrobků za sledované období o 134 kusů. Tím, že se snížil počet vyrobených kusů, došlo k nepatrnému snížení vytížení jednotlivých strojů.

Poslední varianta byla obohacena o pracovníky. Předpokládalo se, že čas přemístění výrobků na pracovišti bude mít poměrně velký vliv na počet vyrobených kusů a na využití některých strojů. Počet pracovníků na jednotlivých pracovištích byl stanoven tak, aby stroje příliš dlouho nečekaly na obsluhu a zároveň, aby jejich počet nebyl zbytečně moc vysoký. Kromě pracoviště EDM drátořezu bylo možné použít vícestrojovou obsluhu na všech zbylých pracovištích. Práce, kterou pracovníci vykonávali, spočívala v přípravě stroje a v manipulaci s výrobkem mezi strojem a bufferem či v zakládání výrobku do stroje. Jelikož nebylo použito programování simulačního modelu pomocí programovacího jazyka SimTalk a prvku Methods, pracovníci mohli vykonat pouze 2 typy činností. Mohli nastavovat stroje, přemístit výrobky ze

stroje či přemístit výrobky do stroje. Na celkový počet vyrobených kusů měli pracovníci poměrně velký vliv. Došlo k poklesu oproti předchozí variantě (varianta 3) celkem o 161 vyrobených kusů. To je nejvyšší hodnota poklesu z provedených variant. Zároveň došlo k mírnému snížení využití jednotlivých strojů, protože stroje musely čekat na příchod pracovníků.

Z vyhodnocených dat byla vytvořena tabulka, která ukazuje vývoj počtu vyrobených kusů během jednotlivých variant (Tab. 10). Z tabulky je patrné, že zakomponování pracovníků do simulačního modelu mělo za následek pokles počtu vyrobených kusů v porovnání s předchozí variantou (varianta 3) téměř o 0,7 %. V poslední variantě (varianta 4) bylo vyrobeno za sledované období celkem 23660 kusů výrobků. Oproti kapacitním propočtům je to pokles o 1,42 % (340 kusů). Toto zjištění by bylo v případě použití v reálném provozu důležité, protože by mohlo dojít např. k opoždění zakázky.



Tab. 10 Porovnání variant - počet vyrobených kusů

Varianta	Počet vyrobených kusů	Rozdíl od kapacitních propočtů [ks]	Rozdíl od kapacitních propočtů [%]	Rozdíl od předchozí varianty [ks]	Poznámka
1	23 955	-45	-0,19	-	Zákl. model
2	23 955	-45	-0,19	0	Směny, velikost bufferů
3	23 821	-179	-0,75	-134	Dopravníky, Transportery
4	23 660	-340	-1,42	-161	Pracovníci, PickAndPlace

V tabulce níže (Tab. 11) jsou zobrazeny pořizovací náklady na jednotlivé stroje. Jak již bylo několikrát zmíněno v průběhu práce, nejvyšší pořizovací cena je v případě DMLS tiskáren a pro výpočet nákladů byla stanovena na 15 mil. Kč. Celkové náklady na pořízení veškerého strojního vybavení pro uskutečnění navrženého výrobního systému činí 125 300 000 Kč. Na pořízení DMLS tiskáren bude vynaloženo zhruba 72% z celkových nákladů na výrobní zařízení.

Tab. 11 Pořizovací náklady na strojní vybavení

Stroj	Počet	Pořizovací cena stroje [Kč]	Celk. pořizovací náklady na stroje [Kč]
DMLS	6	15 000 000	90 000 000
EDM Drátořez	2	3 000 000	6 000 000
Pec	1	500 000	500 000
CNC frézka	5	4 000 000	20 000 000
Omílací buben	1	800 000	800 000
CMM	2	4 000 000	8 000 000
		<b>Celkem</b>	<b>125 300 000</b>

Ve druhé variantě došlo na základě výsledků první simulace ke snížení směnnosti na pracovišti EDM drátového řezání, kdy se na jednom stroji snížil provoz z dvousměnného na jednosměnný. Díky tomuto opatření ušetří podnik na nákladech na mzdy zaměstnance za 1 rok více než 602 000 Kč (viz. Tab. 12). K výpočtu posloužil tabulkový editor MS Excel a uvažovaly se následující hodnoty: superhrubá hodinová mzda dělníka 300 Kč/hod, ročního fond využití 251 dnů a délka směny 8 hod.

Tab. 12 Výpočet roční úspory snížením stavu pracovníků

Počet směn	Superhrubá mzda zaměstnance	Celkové náklady na 1 zaměstnance za rok
1	300 Kč/hod	602 400 Kč

Simulační model poslední varianty již obsahoval pracovníky. Na většině pracovišť byla použita vícestrojová obsluha. Počet zaměstnanců a náklady spojené se zaměstnanci v případě použití vícestrojové obsluhy jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 13). Celkové roční náklady na mzdy zaměstnanců činí 11 445 600 Kč. V poslední variantě byly místo pracovníků v simulačním modelu použity kolaborativní roboti YuMi. Tento fakt nebyl brán v potaz z důvodu zjišťování vlivu vícestrojové obsluhy na výši nákladů.

Tab. 13 Náklady na zaměstnance I.

Pracoviště	Počet zaměstnanců/směna	Počet směn	Počet zaměstnanců celkem	Superhrubá mzda [Kč/hod]	Celkové náklady na zaměstnance/rok [Kč/rok]
DMLS	2	3	6	300	3 614 400
EDM Drátořez	2	2 (1)	3	300	1 807 200
Tepelné zpracování	1	2	2	300	1 204 800
CNC obrábění	2	2	4	300	2 409 600
Omílání		1			
Výstupní kontrola	2	2	4	300	2 409 600
				<b>Celkem</b>	<b>11 445 600 Kč</b>

V případě, že by nebyla použita vícestrojová obsluha, znamenalo by to mnohonásobné zvýšení nákladů na zaměstnance. Tabulka nákladů, která uvádí celkové náklady na zaměstnance, kteří se přímo podílejí na výrobě, je uvedena níže (Tab. 14). Celkové náklady na zaměstnance v případě, že nebude použita vícestrojová obsluha, činí 22 891 200 Kč. Tato hodnota je dvakrát větší než v případě použití vícestrojové obsluhy.

Tab. 14 Náklady na zaměstnance II.

Pracoviště	Počet zaměstnanců/směna	Počet směn	Počet zaměstnanců celkem	Superhrubá mzda [Kč/hod]	Celkové náklady na zaměstnance/rok [Kč/rok]
DMLS	6	3	18	300	10 843 200
EDM Drátořez	2	2 (1)	3	300	1 807 200
Tepelné zpracování	1	2	2	300	1 204 800
CNC obrábění	5	2	10	300	6 024 000
Omílání	1	1	1	300	602 400
Výstupní kontrola	2	2	4	300	2 409 600
				<b>Celkem</b>	<b>22 891 200 Kč</b>

Tabulka níže (Tab. 15) udává roční náklady spojené se strojním zařízením. Jelikož stroje je možné zahrnout do odpisů (pořizovací cena se rozloží do několika roků – v případě strojů 10 roků), není nutné do ročních nákladů uvádět celkovou pořizovací cenu. Kromě zmíněných odpisů jsou v tabulce uvedeny odhadované náklady na energie, software a náklady na materiál, nástroje a přípravky. Suma těchto nákladů překračuje hranici 27 milionů korun (přesněji 27 015 000 Kč).

Tab. 15 Roční náklady spojené s výrobním zařízením

Pracoviště	Roční náklady na software	Roční náklady na materiál/nástroje/přípravky	Roční náklady na energie	Odpisy strojů
DMLS	30 000 Kč	5 000 000 Kč	400 000 Kč	9 000 000 Kč
EDM Drátořez	15 000 Kč	300 000 Kč	150 000 Kč	6 000 000 Kč
Tepelné zpracování	-	20 000 Kč	80 000 Kč	50 000 Kč
CNC obrábění	30 000 Kč	1 750 000 Kč	1 000 000 Kč	2 000 000 Kč
Omílání	-	20 000 Kč	40 000 Kč	80 000 Kč
Výstupní kontrola (bez Yumi)	50 000 Kč	150 000 Kč	50 000 Kč	800 000 Kč
<b>Celkem</b>	<b>125 000 Kč</b>	<b>7 240 000 Kč</b>	<b>1 720 000 Kč</b>	<b>17 930 000 Kč</b>

V poslední variantě (varianta 4) byly na pracovišti výstupní kontroly použity 2 kolaborativní roboty, kteří měly za úkol zakládat jednotlivé výrobky do přípravků a následně vyndat změřené výrobky z přípravku stroje a umístit je na dopravník. Konkrétně se jednalo o kolaborativní roboty YuMi od firmy ABB. Tento typ kolaborativního robota představila firma ABB v roce 2015 a v průmyslu se používá na mnoho prací

(manipulace s předměty do 0,5kg) i ve spolupráci s člověkem. Bylo důležité si vypočítat dobu návratnosti investice. Předpokládá se, že roboty budou schopni vykonávat práci bez nutné přítomnosti obsluhy. V případě vyhodnocení nějakého problému se stroje zastaví a musí se vyčkat na příchod obsluhy. Životnost robota pro tuto činnost byla stanovena na 5 roků. Pořizovací cena dvou robotů činí 1 800 000 Kč. Cena přípravků, naprogramování a servis robotů byla stanovena na 5 000 000 Kč během životnosti robota (5 roků). Na základě těchto hodnot bylo možné vypočítat celkové roční náklady na provoz robota a porovnat je s již známou hodnotou nákladů na zaměstnance na pracovišti CMM (2 409 600 Kč). Při porovnání vyšla roční úspora nákladů 1 034 600 Kč ve prospěch kolaborativních robotů.

Tab. 16 Doba návratnosti investice do kolaborativních robotů

Roční náklady na energii	Roční náklady na přípravky/programování/servis	Roční odpisy	Celkové roční náklady na roboty	Celkové roční náklady na zaměstnance	Rozdíl ročních nákladů
15 000 Kč	1 000 000 Kč	360 000 Kč	1 375 000 Kč	2 409 600 Kč	1 034 600 Kč

Aby bylo možné stanovit celkové výrobní náklady na výrobu jednoho kusu výrobku (nerozlišuje se druh výrobku), je třeba sečíst veškeré náklady spojené s výrobou těchto výrobků. Tyto náklady jsou uvedené v tabulce níže (Tab. 17). Výrobní náklady jednoho artefaktu byly v závislosti na výrobním systému stanoveny na 824,01 Kč. Do této částky nejsou započteny náklady nevýrobních oddělení (marketing, vedení, administrativa), požadovaný zisk, náklady na servis stojů a náklady spojené se zmetky. V případě, že by se jednalo o reálný výrobní systém a chtěly by se určit celkové náklady na jeden výrobek, které je potřeba vynaložit na jeho výrobu a následný prodej, bylo by nutné získat z jiných vnitropodnikových útvarů jejich přesné náklady.

Tab. 17 Stanovení výrobní ceny 1 kusu výrobku

Položka ročních nákladů	Výše nákladů
Na zaměstnance	9 036 000 Kč
Na software	125 000 Kč
Na energie	1 720 000 Kč
Na nástroje/materiál/přípravky	7 240 000 Kč
Na robotické pracoviště	1 375 000 Kč
<b>Celkem</b>	<b>19 496 000 Kč</b>
<b>Cena 1 kusu výrobku (artefaktu)</b>	<b>824,01 Kč</b>

## 7 Závěr

Předmětem diplomové práce bylo navrhnout simulační model výrobního systému digitální továrny, která využívá aditivní a konvenční technologie. Aditivní technologie nabízí nové možnosti výroby, ale z několika důvodů (pořizovací cena, málo informací o vlivu této technologie na výrobu a malé rentabilitě v případě použití v sériové výrobě) se podniky pro implikaci této technologie nerozhodly. Na začátku diplomové práce byla vytvořena rešerše, která shrnula problematiku projektování výrobních systémů a vytváření simulací. Zjištěné informace byly poté použity v praktické části k návrhu a vytvoření simulačního modelu výrobního systému.

V praktické části byl poslán návrh simulačního modelu výrobního systému digitální továrny. Nejprve byly určeny výrobní technologie, které by měly být ve výrobním systému použity. Dále bylo nutné vypracovat kapacitní propočty, na jejichž základě byl vytvořen v simulačním softwaru Plant Simulation simulační model, který simuloval výrobu 4 druhů artefaktů pomocí DMLS 3D tisku a jejich následnou úpravu za použití konvenčních technologií.

První varianta měla za úkol ověřit funkčnost a správnost nastavení simulačního modelu. Aby bylo možné zkoumat náchylnost vytvořeného simulačního modelu na změny v nastavení modelu (velikost bufferů, nastavení směnnosti, vliv logistických prvků a obsluhy výrobního zařízení) byly vytvořeny další 3 varianty. Nově vytvořená varianta vždy vylepšovala tu předchozí. Na základě informací z vytvořené rešerše, a aby bylo možné zkoumat náchylnost navrženého výrobního systému na vliv logistických prvků a obsluhy strojního zařízení se vytvořil layout výrobního systému pomocí simulačního softwaru Plant Simulation.

V závěru práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení vytvořených variant simulačního modelu navrženého výrobního systému digitální továrny. Sledovalo se využití jednotlivých strojů v závislosti na provedených optimalizačních změnách v nastavení modelu. Ve finální variantě byly na pracovišti výstupní kontroly k zakládání výrobků do přípravků v CMM použity kolaborativní roboty místo zaměstnanců. Aby se ověřila ekonomická výhodnost této investice, byla pomocí výpočtů stanovena doba návratnosti investice. Dále byla provedena analýza nákladů na pořízení a provoz strojů, nákladů na materiál a nákladů na mzdy zaměstnanců. Na základě této analýzy byla stanovena výše výrobních nákladů vztažená na jeden výrobek (824,01 Kč).

## 8 Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam zkratky
atd.	a tak dále
tzn.	to znamená
apod.	a podobně
tj.	to jest
min	minuta
ks	kusů
hod	hodina
MU	Mobile Unit (přepravní jednotka)
obr.	obrázek
tab.	tabulka
TZ	tepelné zpracování
Např.	například
ČVUT	České vysoké učení technické
EDM	Electric Discharge Machining (elektroerozivní obrábění)
DMLS	Digital Metal Laser Sintering (spékání kovového prášku pomocí laseru)
MS	Microsoft
CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Computer Numerical Control

## 9 Bibliografie

- [1] TOMEK, Gustav a Věra VÁVROVÁ. *Řízení výroby a nákupu*. Praha: Grada, 2007. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-1479-0.
- [2] HEŘMAN, Jan. *Řízení výroby*. Slaný: Melandrium, 2001. ISBN 80-861-7515-4.
- [3] ZHANG, Jie. *Multi-Agent-Based Production Planning and Control*. 1. Shanghai Jiao tong University: National Defense Industry Press, 2017. ISBN 978-1-118-89006-6.
- [4] RŮŽIČKA, Tomáš. Výrobní systém a automatizace. *MM Průmyslové spektrum* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobni-system-a-automatizace.html>
- [5] KAVAN, Michal. *Výrobní a provozní management*. Praha: Grada, 2002. Expert (Grada). ISBN 80-247-0199-5.
- [6] KEŘKOVSKÝ, Miloslav a Ondřej VALSA. *Moderní přístupy k řízení výroby*. 3., dopl. vyd. V Praze: C.H. Beck, 2012. C.H. Beck pro praxi. ISBN 978-80-7179-319-9.
- [7] HORVÁTH, Gejza a Josef BASL. *Metodika řízení výroby: základy*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-708-2171-X.
- [8] ZELENKA, Antonín. *Projektování výrobních procesů a systémů*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03912-0.
- [9] RUMÍŠEK, Pavel. *Technologické projekty*. Brno: VUT Brno, 1991. ISBN 80-214-0385-3.
- [10] TOMEK, Gustav a Věra VÁVROVÁ. *Řízení výroby*. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2000. Expert (Grada). ISBN 80-716-9955-1.
- [11] KYNCL, Jiří. *Přednášky z předmětu PVS (Projektování Výrobních Systémů)*. 2018.
- [12] SDRUŽENÍ MTM PRO ČESKOU REPUBLIKU A SLOVENSKOU REPUBLIKU, Z.S., . *Základy normování práce: seminář*. 2016.
- [13] MILLER, A, M BUREŠ, V ŠRAJER a J PEŠL. *Projektování výrobní základny - teoretická část*. 1.vydání. Plzeň: SmartMotion s.r.o, 2013. ISBN 978-80-87539-30-9.

- [14] ČUJAN, Zdeněk a Zdeněk MÁLEK. *Výrobní a obchodní logistika*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008. ISBN 978-80-7318-730-9.
- [15] MILO, Peter. *Technologické projektovanie v praxi*. 2. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00103-7.
- [16] HLAVENKA, Bohumil. *Manipulace s materiálem: (systémy a prostředky manipulace s materiálem)*. 3. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1990. ISBN 80-214-0068-4.
- [17] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-06-16].
- [18] *HOW MUCH DOES A 3D PRINTER COST?* [online]. b.r. [cit. 2019-06-16]. Dostupné z: <https://www.fusion3design.com/how-much-does-a-3d-printer-cost/>
- [19] ASTM INTERNATIONAL, . *Designation: F2792 – 12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-06-16].
- [20] FÁBRY, Jan. *Počítačová simulace logistických procesů II: 7. přednáška - Struktura simulačního modelu*. 2017.
- [21] KOŽÍŠEK, Jan. *Statistika*. Vyd. 5., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3567-0.
- [22] FÁBRY, Jan. *Počítačová simulace logistických procesů II: Přednášky 1 - 12*. 2017.
- [23] FÁBRY, Jan. *Počítačová simulace logistických procesů II: 2. přednáška - Vysvětlení témat semestrálního projektu*. 2017.
- [24] FÁBRY, Jan. *Počítačová simulace logistických procesů II: 5. přednáška - Plant Simulation*. 2017.
- [25] BANGSOW, Steffen. *Manufacturing simulation with Plant Simulation and Simtalk: usage and programming with examples and solutions*. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-05073-2.
- [26] *TECNOMATIX Plant Simulation Basics Student Guide: Course code: PLT100*. 9.0.1. 2009. MTXP100-S-0901.
- [27] ZEISS DuraMax: Průmyslová metrologie. Zeiss [online]. b.r. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/production-cmms/duramax.html>
- [28] ABB: YUMI [online]. b.r. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/yumi>



## 10 Seznam obrázků

Obr. 1 Dělení výrobního procesu [6].....	9
Obr. 2 Dělení výrobního procesu podle technického hlediska [6] .....	10
Obr. 3 Závislosti nákladů a objemu výroby [6].....	10
Obr. 4 P-Q diagram kusové výroby [7] .....	11
Obr. 5 P-Q diagram sériové výroby [7].....	11
Obr. 6 P-Q diagram hromadné výroby [7] .....	12
Obr. 7 Dělení výrobního procesu podle hlediska plynulosti výroby [7] .....	12
Obr. 8 Dělení technické přípravy výroby [8] .....	13
Obr. 9 Dělení výrobního procesu dle hlediska výrobních etap [7].....	13
Obr. 10 Dělení kapacitních propočtů [8].....	15
Obr. 11 Rozdělení technologické standardizace [11].....	16
Obr. 12 Dělení pracovních norm [12] .....	16
Obr. 13 Dělení normy spotřeby práce [12].....	17
Obr. 14 Dělení spotřeby času [8].....	18
Obr. 15 Schéma rozdělení času pracovníka [8].....	20
Obr. 16 Rozdělení snímku pracovního dne [8].....	21
Obr. 17 Postup při tvorbě snímku dne [8] .....	22
Obr. 18 P-Q diagram pro technologické uspořádání strojů a pracovišť [5] .....	23
Obr. 19 Volné uspořádání strojů a pracovišť [9].....	23
Obr. 20 Technologické uspořádání strojů a pracovišť [9].....	24
Obr. 21 Předmětné uspořádání strojů a pracovišť [9] .....	24
Obr. 22 Modulární uspořádání strojů a pracovišť [9].....	25
Obr. 23 Buňkové uspořádání strojů a pracovišť [9] .....	25
Obr. 24 Dělení podlahové plochy výrobní haly [13].....	26
Obr. 25 Postup při tvorbě layoutů .....	27
Obr. 26 Dělení simulace [21] .....	30
Obr. 27 Pracovní prostředí programu Plant Simulation .....	33
Obr. 28 Class Library – MaterialFlow .....	34
Obr. 29 Class Library - Fluids.....	34
Obr. 30 Class Library – Resources.....	35
Obr. 31 Class Library - InformationFlow.....	36
Obr. 32 Class Library – UserInterface .....	36
Obr. 33 Class Library – Mus .....	37

Obr. 34 Class Library – Tools .....	37
Obr. 35 Class Library - Models.....	38
Obr. 36 Výrobní proces artefaktů.....	39
Obr. 37 Nastavení ShiftCalendaru.....	44
Obr. 38 Sankey diagramy .....	45
Obr. 39 Simulační model - V1 .....	46
Obr. 40 Nastavení DMLS tiskárny I.....	47
Obr. 41 Nastavení DismantleStation .....	48
Obr. 42 Nastavení FlowControleru .....	49
Obr. 43 Nastavení Source.....	49
Obr. 44 Sankey diagramy - V1.....	50
Obr. 45 Výsledek simulace - V1 .....	51
Obr. 46 Využití strojů I. - V1 .....	52
Obr. 47 Využití strojů II. - V1.....	53
Obr. 48 Vkládání detailně rozebraného pracoviště do hlavního framu .....	54
Obr. 49 Výsledky simulace - V2 .....	55
Obr. 50 Využití strojů I. - V2 .....	56
Obr. 51 Využití strojů II. - V2.....	57
Obr. 52 Využití strojů III. - V2.....	58
Obr. 53 Simulační model - V3 .....	58
Obr. 54 Zjednodušený simulační model při použití dopravníku .....	59
Obr. 55 Nastavení TransferStation .....	60
Obr. 56 Zjednodušený simulační model při použití Transporteru.....	61
Obr. 57 Výsledek simulace - V3 .....	61
Obr. 58 Využití strojů I. - V3 .....	62
Obr. 59 Využití strojů II. - V3.....	62
Obr. 60 Simulační model 2D - V4 .....	63
Obr. 61 Simulační model 3D - V4 .....	64
Obr. 62 Materiálový tok - V4.....	65
Obr. 63 Nastavení WorkerPool .....	66
Obr. 64 Vytvoření dávek .....	67
Obr. 65 Úhly natočení a časy při přesunu výrobků .....	68
Obr. 66 Výsledek simulace - V4 .....	69
Obr. 67 Využití strojů I. - V4 .....	69
Obr. 68 Využití strojů II. - V4.....	70

## 11 Seznam tabulek

Tab. 1 Vysvětlení symbolů I. [8].....	19
Tab. 2 Vysvětlení symbolů II. [8] .....	19
Tab. 3 Vysvětlení symbolů III. [8] .....	19
Tab. 4 Vysvětlení symbolů IV. [8].....	19
Tab. 5 Vysvětlení symbolů V. [8] .....	19
Tab. 6 Kapacitní propočty .....	40
Tab. 7 Nastavení výrobních a dávkových časů - V1 .....	47
Tab. 8 Směnnost a počet strojů - V1 .....	48
Tab. 9 Kapacita bufferů.....	54
Tab. 10 Porovnání variant - počet vyrobených kusů.....	73
Tab. 11 Pořizovací náklady na strojní vybavení .....	73
Tab. 12 Výpočet roční úspory snížením stavu pracovníků .....	74
Tab. 13 Náklady na zaměstnance I.....	74
Tab. 14 Náklady na zaměstnance II. ....	75
Tab. 15 Roční náklady spojené s výrobním zařízením.....	75
Tab. 16 Doba návratnosti investice do kolaborativních robotů.....	76
Tab. 17 Stanovení výrobní ceny 1 kusu výrobku .....	76