



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

## ODBOR INŽENÝRSTVÍ RIZIK

DEPARTMENT OF RISK ENGINEERING

# MANAGEMENT SPOLEHLIVOSTI VÝROBY VE VYBRANÉ SPOLEČNOSTI

PRODUCTION RELIABILITY MANAGEMENT IN A SELECTED COMPANY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Šimon Bubník

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Karel Pospíšil, Ph.D., LL.M.

BRNO 2024

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Šimon Bubník**  
Studijní program: Řízení rizik technických a ekonomických systémů  
Studijní obor: Řízení rizik technických systémů  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Karel Pospíšil, Ph.D., LL.M.**  
Akademický rok: 2023/24  
Ústav/odbor: Odbor inženýrství rizik

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

## Management spolehlivosti výroby ve vybrané společnosti

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V teoretické části se zaměřte rovněž na problematiku použití výstupů diplomové práce v řízení rizik vybrané společnosti. V metodologické části se pokuste k řešení spolehlivosti využít Petriho sítě. V diskusi, krom zhodnocení výsledků, se zabývejte též možnostmi dalšího zvyšování spolehlivosti výroby, a to jak na úrovni technické, tak organizační (manažerské). Osnova i popis úkolu mohou být dílčím způsobem modifikovány na základě konzultací s vedoucím diplomové práce v závislosti na postupu řešení úkolu.

### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je vhodnými parametry posoudit spolehlivost výroby ve vybraném podniku a následně posoudit, zda navržená opatření k jejímu zvýšení měla či neměla statisticky významný přínos. Práci zpracujte v tomto členění:

- Úvod (motivace k řešení)
- Stav poznání (přístupy k řešení spolehlivosti ve výrobních společnostech; management spolehlivosti, vazba na TQM)
- Metody řešení (určení parametrů, kterými se bude posuzovat spolehlivost; popis způsobů zjištění určených parametrů; způsob vyhodnocení spolehlivosti; způsob vyhodnocení přínosů opatření ke zvýšení spolehlivosti)
- Výsledky (určení parametrů spolehlivosti před zavedením opatření a vyhodnocení; určení parametrů spolehlivosti po zavedení opatření a vyhodnocení; porovnání spolehlivosti výroby před a po zavedení opatření)
- Diskuse
- Závěr
- Literatura
- Přílohy (např. tabulky naměřených hodnot)

**Seznam literatury:**

ČSN EN 60 300: Management spolehlivosti (sada norem)

ČSN EN 61 703: Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby

ČSN EN 62551: Techniky analýzy spolehlivosti – Techniky Petriho sítí

ČSN 01 0103: Výpočet ukazatelů spolehlivosti dvoustavových soustav

webové stránky: [tc56.iec.ch](http://tc56.iec.ch)

Vyhledání další literatury je předmětem úkolu zpracování diplomové práce

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Karel Pospíšil, Ph.D., LL.M.  
ředitel

### ***Abstrakt***

Cílem této diplomové práce je posoudit spolehlivost výroby ve vybraném podniku pomocí vhodně zvolených parametrů a následně analyzovat, zda navržená a implementovaná opatření přispěla ke zvýšení této spolehlivosti statisticky významným způsobem. Práce se zaměřuje na identifikaci klíčových problémů, návrh a implementaci opatření ke zvýšení spolehlivosti, a statistické vyhodnocení jejich přínosu. Výstupem práce je komplexní hodnocení spolehlivosti výroby ve vybraném podniku, což zahrnuje identifikaci klíčových problémů, návrh a implementaci opatření ke zvýšení spolehlivosti, a statistické vyhodnocení jejich přínosu. Tento postup umožní objektivně posoudit efektivitu zavedených opatření a poskytne podklad pro další zlepšování spolehlivosti výrobních strojů.

### ***Abstract***

The aim of this thesis is to assess the reliability of production in a selected company using appropriately chosen parameters and subsequently analyze whether the proposed and implemented measures contributed to a statistically significant increase in this reliability. The thesis focuses on identifying key issues, designing and implementing measures to improve reliability, and statistically evaluating their impact. The outcome of this work is a comprehensive assessment of the production reliability in the selected company, which includes the identification of key issues, the design and implementation of measures to improve reliability, and the statistical evaluation of their impact. This approach will allow for an objective assessment of the effectiveness of the implemented measures and provide a basis for further improvements in the reliability of production machinery.

### ***Klíčová slova***

Spolehlivost, Petriho sítě, analýza rizik, FTA, FMEA

### ***Keywords***

Reliability, Petri nets, risk analysis, FTA, FMEA

### ***Bibliografická citace***

BUBNÍK, Šimon. *Management spolehlivosti výroby ve vybrané společnosti* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/153293>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Odbor inženýrství rizik. Vedoucí práce Karel Pospíšil.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „*Management spolehlivosti výroby ve vybrané společnosti*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně .....

.....

Podpis autora

### ***Poděkování***

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Karlu Pospíšilovi, Ph.D., LL.M. za odbornou pomoc a velmi cenné rady při řešení diplomové práce. Poděkování patří také celé mé rodině za velkou podporu během celého magisterského studia. Rovněž děkuji Mgr. Kristýně Vajdíkové za trpělivost a pochopení.

## OBSAH

1	ÚVOD .....	15
2	STAV POZNÁNÍ.....	16
2.1	Řešení spolehlivosti ve výrobních společnostech.....	16
2.1.1	<i>Definice spolehlivosti.....</i>	17
2.1.2	<i>Vanová křivka .....</i>	19
2.2	Management spolehlivosti.....	21
2.2.1	<i>Vazba na TQM.....</i>	22
2.3	Management rizik .....	22
2.3.1	<i>Nebezpečí .....</i>	24
2.3.2	<i>Nejistota .....</i>	25
2.3.3	<i>Riziko.....</i>	26
2.3.4	<i>Analýza rizik.....</i>	28
3	FORMULACE PROBLÉMŮ A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ.....	30
4	POUŽITÉ METODY A JEJICH ZDŮVODNĚNÍ .....	31
4.1	Ukazatele spolehlivosti .....	31
4.1.1	<i>Pravděpodobnost bezporuchového provozu.....</i>	32
4.1.2	<i>Intenzita poruch .....</i>	33
4.1.3	<i>Střední doba mezi poruchami .....</i>	33
4.1.4	<i>Střední doba provozu mezi poruchami .....</i>	35
4.1.5	<i>Střední doba provozu do poruchy .....</i>	36
4.2	Petriho síť .....	37
4.2.1	<i>Princip Petriho sítě .....</i>	37
4.2.2	<i>Vztah mezi Petriho sítěmi a spolehlivostí .....</i>	39
4.2.3	<i>Struktura Petriho sítě.....</i>	41
4.3	FTA.....	44
4.3.1	<i>Pojmy a definice .....</i>	44
4.3.2	<i>Struktura FTA .....</i>	45
4.3.3	<i>Sériová konfigurace systému .....</i>	45
4.3.4	<i>Paralelní konfigurace systému.....</i>	46
4.3.5	<i>Použité značky .....</i>	48
4.4	FMEA .....	49
4.4.1	<i>Analýza kritičnosti .....</i>	51
4.4.2	<i>Kombinace analýz FTA a FMEA .....</i>	52



5	VLASTNÍ ŘEŠENÍ / DOSAŽENÉ VÝSLEDKY .....	53
5.1	Analýza dat.....	53
5.2	Statistické ověření účinnosti opatření.....	60
5.2.1	<i>Kolmogorov-Smirnov test</i> .....	61
5.2.2	<i>Výpočet parametrů Weibullova rozdělení</i> .....	62
5.2.3	<i>Říjen</i> .....	63
5.2.4	<i>Listopad a prosinec</i> .....	64
5.2.5	<i>Březen</i> .....	65
5.3	Výpočet ukazatelů spolehlivosti .....	66
5.3.1	<i>Říjen</i> .....	66
5.3.2	<i>Listopad</i> .....	67
5.3.3	<i>Prosinec</i> .....	68
5.3.4	<i>Březen</i> .....	69
5.4	Modelování Petriho sítěmi.....	70
5.4.1	<i>Globální struktura stroje</i> .....	71
5.4.2	<i>Porucha nástroje</i> .....	72
5.4.3	<i>Výměna nástroje</i> .....	73
5.4.4	<i>Nedostatek materiálu</i> .....	74
5.4.5	<i>Problém s kvalitou</i> .....	75
5.4.6	<i>Opravy stroje</i> .....	76
5.5	FTA 1 .....	77
5.6	FTA 2 .....	78
5.7	FMEA .....	79
5.7.1	<i>Klasifikační systém</i> .....	79
5.7.2	<i>FMEA matice + provedená opatření</i> .....	81
6	DISKUZE / ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ .....	82
7	ZÁVĚR .....	85
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	86
	SEZNAM TABULEK.....	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	91

# 1 ÚVOD

V dnešním dynamickém a konkurenčním prostředí je spolehlivost výrobních procesů klíčovým faktorem pro úspěch podniku. Spolehlivost ovlivňuje jak ekonomický výkon společnosti, tak i její schopnost konkurovat na trhu a udržet si loajalitu zákazníků.

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku spolehlivosti ve výrobní společnosti a její význam v kontextu současného podnikatelského prostředí. Existuje několik klíčových motivací pro provádění této práce. Za prvé, ekonomický dopad spolehlivosti výrobních procesů nelze podceňovat. Optimalizace spolehlivosti může přispět k redukci nákladů a zvýšení ziskovosti společnosti. Za druhé, zlepšení konkurenceschopnosti je důležité pro dlouhodobý úspěch podniku. Spolehlivost může být klíčovým faktorem pro získání a udržení konkurenční výhody na trhu. Dále, zajištění zákaznické spokojenosti je zásadní pro dlouhodobé vztahy se zákazníky a budování pozitivní pověsti společnosti. Spolehlivost výrobků a služeb hraje klíčovou roli v dosahování této spokojenosti. Spolehlivost výrobních procesů může přispět k zajištění bezpečnosti a dodržování příslušných právních předpisů. Nakonec, udržitelnost je stále důležitějším tématem ve světě podnikání. Efektivní využívání zdrojů a minimalizace ekologického dopadu jsou klíčovými cíli, které lze dosáhnout pomocí zlepšení spolehlivosti výrobních procesů.

Práce je rozdělena do sedmi hlavních částí. První část práce se věnuje teoretickým základům problematiky pojetí spolehlivosti ve výrobních společnostech. Následující část obsahuje analýzu současného stavu spolehlivosti ve vybrané výrobní společnosti. Poté následuje část zaměřená na identifikaci klíčových faktorů ovlivňujících spolehlivost a analýzu rizik. V další části jsou navržena konkrétní opatření a doporučení pro zlepšení spolehlivosti výrobních procesů. Nakonec je provedeno zhodnocení navržených opatření a formulovány závěry práce.

## 2 STAV POZNÁNÍ

### 2.1 ŘEŠENÍ SPOLEHLIVOSTI VE VÝROBNÍCH SPOLEČNOSTECH

Kuba ve své knize Hodnocení provozní spolehlivosti strojů [1] popisuje, že nároky na spolehlivost zařízení při jejich provozu neustále narůstají s rostoucí výkonností a komplexitou. Z tohoto důvodu je klíčové systematicky analyzovat faktory ovlivňující spolehlivost a provádět detailní diagnostiku zařízení s cílem optimalizovat jejich ekonomickou efektivitu a zároveň zvýšit spolehlivost. Ve vyspělých průmyslových ekonomikách je dnes prioritou při konstrukci a vývoji nových zařízení maximalizovat jejich spolehlivost a obecně platí, že vyšší úroveň spolehlivosti přispívá k vyšší konkurenceschopnosti a úspěšnosti na trhu. Hodnocení provozní spolehlivosti představuje klíčovou fází v rámci komplexního programu zaměřeného na zajištění maximální spolehlivosti nových či stávajících zařízení. Tento proces umožňuje porovnávat inovovaná zařízení s těmi staršími, srovnávat zařízení od různých výrobců a posuzovat úspěšnost konstrukčních změn. Jeho úspěšnost závisí na přesně definovaných postupech a metodách, které vedou k dosažení požadovaných hodnot spolehlivosti. Prvním krokem je sjednocení terminologie, což je zajištěno normami stanovujícími význam klíčových pojmů.[1]

Karaulova et al. ve svém vědeckém článku zaměřeném na popis analýzy poruch výrobního systému uvádí, že v dnešním konkurenčním prostředí jsou výrobní společnosti stále více nuceny přizpůsobovat svou organizační strukturu a konkurenční strategie různým požadavkům trhu. Kalaulova ve shodě s Kubou [1] ve svém článku uvádí, že je rozhodující vyvinout účinné techniky posuzování spolehlivosti pro složité výrobní systémy, aby byla zajištěna dostatečná výkonnost v případě nastání extrémních nebo nejistých podmínek. Z toho důvodu nabývá na důležitosti hodnocení a předvídání spolehlivosti během různých fází procesu.[2]

Podle Kuby [1] je také důležitým krokem výběr vhodných ukazatelů spolehlivosti, které umožňují komplexní charakterizaci provozních podmínek daného zařízení. Následně je klíčové organizovat sledování vybraného zařízení tak, aby poskytlo přesné, úplné a objektivní informace pro vyhodnocení zvolených ukazatelů spolehlivosti. Dalším důležitým aspektem je odhadování ukazatelů spolehlivosti a provádění analýz poruchovosti soustav a komponentů sledovaného zařízení. Nicméně nejdůležitějším krokem je návrh a realizace nápravných opatření, která ověřují správnost a účinnost předchozích procesů. Po implementaci nápravných opatření se celý cyklus opakuje, s výjimkou prvních dvou kroků. Tato neustálá cykličnost ukazuje, že snaha o dosažení

vyšší úroveň spolehlivosti nikdy neskončí. V případě nových nebo inovovaných zařízení vyžaduje tento proces také práci na teoretickém základě.[1]

V současné době na globalizovaném a propojeném trhu podle Zhang [3] čelí výrobní odvětví dynamickému a nepředvídatelnému prostředí s rostoucí složitostí při vytrvalé snaze o snižování nákladů a optimalizaci efektivity. Výrobní systémy jsou nuceny stát se vnitřně spolehlivějšími vůči různým rizikům. Mezi nepříjemnosti nespolehlivého výrobního systému patří ztráty z prostojů výroby, vysoké náklady na údržbu, vysoké celkové zásoby, zhoršení kvality a zpoždění dodací lhůty. Tyto nepříjemnosti jsou zásadními problémy při skutečném řízení výroby a vyplývá z nich, že je třeba zaujmout pragmatický přístup ke spolehlivosti a udržitelnosti výrobních systémů.[3]

Kuba doplňuje, že pro výrobce a uživatele zařízení a technických systémů je hodnocení spolehlivosti standardním postupem. Historicky bylo pro každého uživatele i výrobce důležité vědět, jak dlouho bude dané zařízení fungovat spolehlivě. Spolehlivost zařízení byla považována za vysokou, pokud bylo schopno plnit své funkce s minimálními nároky na opravy a údržbu. Nicméně toto hodnocení bylo subjektivní. Teprve s rozvojem matematické statistiky začaly být některé aspekty spolehlivosti zařízení lépe definovány pomocí číselných ukazatelů spolehlivosti. Díky těmto ukazatelům je možné analyzovat poruchovost hodnocených zařízení a na základě této analýzy navrhnout opatření, která povedou ke zvýšení jejich spolehlivosti. Nicméně tato práce vyžaduje použití metod matematické statistiky.[1]

S odkazem na zdroje [1] [2] lze konstatovat, že každý, kdo se zabývá spolehlivostí zařízení a technických systémů, by měl mít základní znalost těchto metod. Pracovník, který se v průmyslovém prostředí věnuje spolehlivosti zařízení, brzy zjistí, že tato práce je náročná a časově náročná, a že výsledky mají omezenou platnost. Proto jsou pro něj nejcennějším zdrojem jeho vlastní zkušenosti.

### **2.1.1 Definice spolehlivosti**

Podle platné normy ČSN 01 0103 Výpočet ukazatelů spolehlivosti dvoustavových soustav údržby je spolehlivost definována jako „*obecná vlastnost (schopnost) výrobku plnit po stanovenou dobu požadované funkce při zachování provozních parametrů výrobku, daných technickými podmínkami*“. [4]

Norma rovněž udává, že tato schopnost je závislá na mnoha faktorech jako například jakosti řešení úloh v předvýrobní fázi (tj. úkolů vývoje, výzkumu, konstrukce, technologie, technické

přípravy apod.), na důsledném dodržení předem definovaných provozních podmínek, pro které je výrobek konstruován (např. produktivita, rychlost, spotřeba energie), včetně pokynů pro obsluhu, opravu a údržbu. Dále je závislý také na jakosti výrobního provedení a montáže příslušného výrobku. Je nutné podotknout, že v mnoha případech hraje velmi důležitou roli i lidský činitel. Proto je obzvlášť důležité exaktně specifikovat požadované tech. vlastnosti, provozní parametry, kritéria poruch a parametry daného technologického procesu.[4]

Podle normy ČSN EN 60300-1 Management spolehlivosti – část 1: Systémy managementu spolehlivosti lze spolehlivost definovat jako: „*schopnost fungovat tak, jak je požadováno, a tehdy, kdy je požadováno*“. [5]

K této definici je nutno dodat, že spolehlivost je souhrnnou komplexní vlastností, která je tvořena dílčími *spolehlivostními vlastnostmi*, jimiž jsou:

- *Bezporuchovost – schopnost plnit po stanovenou dobu a podmínek požadované funkce. Kvantitativně je nejčastěji vyjádřena pravděpodobností bezporuchového provozu v určitém intervalu, střední dobou bezporuchového stavu a intenzitou poruch.*
- *Udržovatelnost – vlastnost, která při předepsané údržbě spočívá ve způsobilosti k předcházení vzniku poruch*
- *Opravitelnost – způsobilost, která spočívá ke zjištění příčin vzniku poruch a k odstranění jejich nedostatků. Kvantitativně je vyjádřena pravděpodobností provedené opravy ve stanovené době, střední dobou opravy nebo intenzitou oprav.*
- *Pohotovost – vlastnost, která zahrnuje v podmínkách provozu bezporuchovost a opravitelnost. Kvantitativně je vyjádřena pravděpodobností, že bezporuchového stavu v libovolně zvoleném okamžiku.*
- *Životnost – schopnost plnit požadované funkce až do dosažení mezního stavu při stanoveném systému předem určených oprav a údržby. Je vyjádřena středním technickým životem nebo technickým životem s předepsanou pravděpodobností. [6]*

Klimeš však ve své literatuře [7] upozorňuje, že je nutné si všimnout, že tyto definice jsou ve své podstatě jen kvalitativní. Je možné pouze konstatovat, že zařízení je nebo není spolehlivé během stanovené doby. Při konstrukci, výrobě a provozu strojů je potřeba, aby byla spolehlivost či nespolehlivost vyjádřena nějakou číselnou mírou, čili vyjádřena kvantitativně. To ovšem předchozí definice neumožňují. Proto, aby byla spolehlivost vyjádřena numericky neboli číselně, často bývá používána jedna z jejich nejdůležitějších charakteristik, která bývá v užším smyslu chápána jako spolehlivost, a to pravděpodobnost bezporuchového provozu. Tuto charakteristiku je možné definovat jako pravděpodobnost, že k poruše stroje nedojde do jisté doby po jeho uvedení do

provozu. Stejným způsobem lze stanovit pravděpodobnost poruchy  $Q(t)$ , což je pravděpodobnost, že ve stanovené době dojde k poruše od uvedení do provozu. Protože bezporuchová činnost a porucha jsou navzájem disjunktní (vylučující se) jevy a může nastat pouze jeden z nich, musí být součet jejich pravděpodobností roven číslu 1.[7]

Další důležitou spolehlivostní charakteristikou je tzv. intenzita poruch  $\lambda(t)$ . Je jí vyjádřen časový průběh vzniku poruch a lze říci, že je s časem proměnlivá. Rovnice 1 udává vztah pro intenzitu poruch:

$$\lambda = \frac{n(t)_i}{N(t)_i \cdot \Delta t_i} \quad (1)$$

kde:

$n(t)_i$  – počet porušených výrobků

$N(t)_i = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}$  – počet správně pracujících výrobků

$\Delta t_i$  – sledovaný časový interval

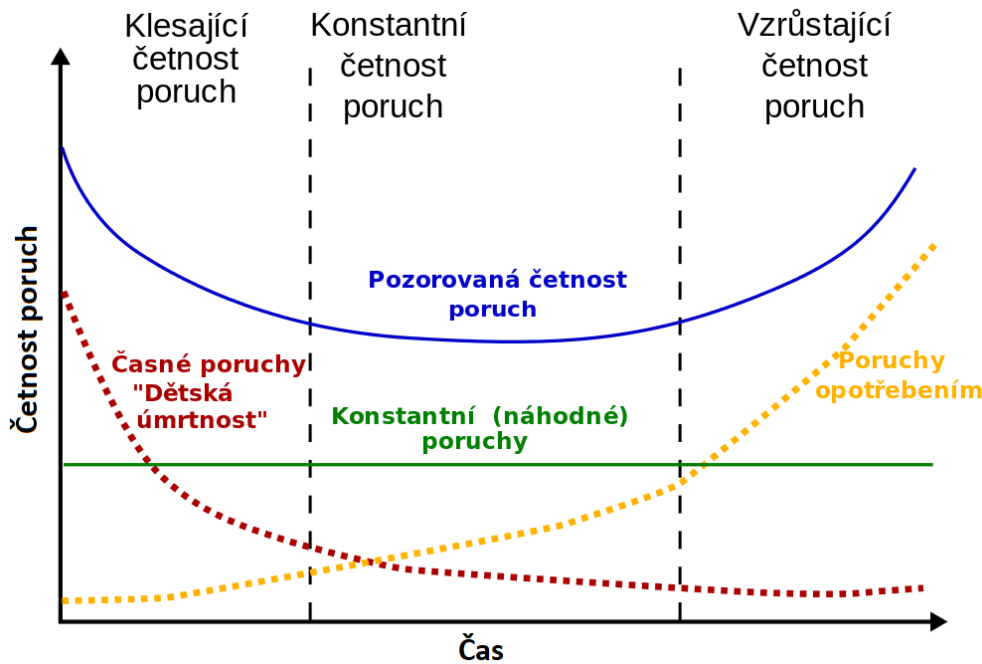
$N_{i-1}$  – počet správně pracujících výrobků na začátku sledovaného intervalu  $\Delta t_i$

$N_i$  – počet správně pracujících výrobků na konci sledovaného intervalu  $\Delta t_i$

### 2.1.2 Vanová křivka

Znázornění průběhu intenzity poruch  $\lambda(t)$  pro určitý objekt (obr. 1) je v literatuře [7] definováno jako charakteristická křivka, která se nazývá vanová. Její název je odvozen od průřezu vany – strmé boky a ploché dno. Tato křivka je široce používána v inženýrství spolehlivosti a popisuje zvláštní formu nebezpečnosti, která se skládá ze tří částí: [7]

- První částí je klesající míra poruch, tzv. časné poruchy nebo "dětská úmrtnost".
- Druhou částí je konstantní míra poruch, známá jako konstantní (náhodné) poruchy.
- Třetí část je rostoucí míra poruch, známá jako opotřebení.



Obrázek 1 – Vanová křivka [8]

Klutke et al. ve svém odborném článku [9] popisují, že vanová křivka vzniká zmapováním míry počátečních poruch "dětské úmrtnosti" při prvním uvedení do provozu, míry náhodných poruch s konstantní mírou poruch během "životnosti" a nakonec míry poruch "opotřebení", když výrobek překročí svou návrhovou životnost. Méně technicky řečeno, v počátcích životnosti výrobku, který se drží vanové křivky, je míra poruchovosti vysoká, ale rychle klesá, protože vadné výrobky jsou identifikovány a vyřazeny a jsou překonány rané zdroje potenciálních poruch, jako jsou chyby při manipulaci a instalaci. V polovině životnosti výrobku – obecně poté, co se dostane ke spotřebitelům – je míra selhání nízká a konstantní. Na konci životnosti výrobku se míra poruchovosti zvyšuje, protože se na výrobku podepisuje jeho stáří a opotřebení. [9]

Autoři zmíněného článku [9] doplňují, že ačkoli je vanová užitečná, ne každý výrobek nebo systém se řídí funkcí nebezpečnosti podle této křivky. Například pokud jsou jednotky vyřazeny z provozu nebo mají snížené používání během období opotřebení nebo před jeho začátkem, budou vykazovat méně poruch na jednotku kalendářní doby (nikoli na jednotku doby používání) než podle vanové křivky. Termín "vojenská specifikace" se často používá k popisu systémů, u nichž byla část vaničkové křivky týkající se dětské úmrtnosti vyhořelá nebo odstraněná. To se provádí hlavně u životně důležitých nebo systémově kritických aplikací, protože to výrazně snižuje možnost selhání systému na počátku jeho životnosti. Výrobci to provedou za určitou cenu zpravidla podobnými prostředky, jako je zátěžová kontrola prostředí.[9]

## 2.2 MANAGEMENT SPOLEHLIVOSTI

Norma ČSN EN 60300-1 popisuje management spolehlivosti jako zásadní součást širších systémů managementu organizace, zejména financí, majetku a kvality. Zahrnuje plánování a použití organizačních uspořádání, procesů a technik a přidružených metod s cílem dosáhnout co nejvyšší výkonnosti organizace. Norma rovněž dodává, že cílem managementu spolehlivosti je systematicky snižovat poruchy produktů, četnosti výpadků, dob nepoužitelného stavu služby a dalších nežádoucích událostí se snahou minimalizace jejich důsledků. To je dosaženo zásahy, jako je odstranění kořenových příčin poruchy, zjednodušení procesů, podpora odolnosti proti poruchovým stavům v návrhu a použitelnosti, zmírňováním následků anomálií, řízením činností údržby, prosazováním toho, aby se zabránilo poruchovým stavům a předcházelo chybám a zajištěním důvěry uživatele během životního cyklu. Klíčové je časné zohlednění spolehlivosti během životního cyklu, protože opravit návrh, který je zapříčiněn nedostatečnou spolehlivostí, bývá později mnohdy složitější, dražší a časově náročnější. [5]

Mezi nejzásadnější přínosy managementu spolehlivosti patří:

- Vyhovění cílům a požadavků zainteresovaných stran
- Udržování rozsahu výroby nebo produkce za pomoci zvýšené pohotovosti
- Dosažení očekávané úrovně tržeb
- Snižování dopadů na životní prostředí včasným zjištěním a vyřešením škodlivých následků
- Systematické zlepšování kvality [5]

Autoři článku *What is Reliability Maintenance Management?* [10] definují řízení spolehlivosti jako soubor vzájemně propojených činností, které zahrnují návrh spolehlivosti, provozuschopnosti, udržitelnosti, bezpečnosti a kontrolovatelnosti vývoj a revizi plánů údržby a kalibrace s ohledem na kritičnost a stav aktiva a kritéria pro vytváření efektivních plánů údržby a kalibrace v systému EAMS/CMMS, který umožňuje koordinaci, sledování a monitorování funkcí, které udržují zařízení, nástroje a související aktiva, aby byla zajištěna jejich dostupnost pro výrobu a zajištěno plánování reaktivní, periodické, preventivní nebo proaktivní údržby, zahrnující vyvážení nákladů, zdrojů, příležitostí a rizik s požadovaným výkonem pro dosažení cílů organizace.

Článek [10] také doplňuje, že řízení spolehlivosti by mělo poskytovat správná rozhodnutí pro optimalizaci poskytování hodnoty s cílem zajistit optimální rovnováhu mezi spolehlivostí, dostupností, udržitelností a bezpečností všech aktiv při optimálních nákladech a za uspokojivých



podmínek kvality, bezpečnosti a ochrany životního prostředí, při zachování zdrojů společnosti tak, aby provoz probíhal efektivně a aby se neplýtvalo penězi na neefektivitu.

### **2.2.1 Vazba na TQM**

He et al. [11] s odkazem na článek [12] označují spolehlivost jako kvalitu v čase. Vysoce spolehlivý výrobek je pak výstupem vysoce kvalitních procesů a vysoce spolehlivých výrobních systémů, které jsou základními složkami systému řízení kvality ve výrobním podniku. Patrick & Andre [13] doplňují, že aby bylo možné vyhovět těmto stále přísnějším požadavkům na kvalitu a spolehlivost, je nutné, aby zabezpečování spolehlivosti pokračovalo i ve fázi výroby a bylo koordinováno s ostatními činnostmi zabezpečování kvality. Této výzvě pak podle Biroliniho [14] čelí výrobní podniky a v nemenší míře i pokroky v zajišťování spolehlivosti během výrobní fáze.

Ve shodě s článkem [11] Madu zase ve svém výzkumném článku [15] doplňuje, že výkonnost firmy v oblasti kvality se často posuzuje podle spolehlivosti firemních produktů, zařízení nebo strojů. Přesto se spolehlivosti nevěnuje stejná pozornost jako kvalitě. Několik organizací dnes funguje efektivně, protože strojní zařízení, které zajišťuje systém je vysoce spolehlivé. Je proto nutné vyvinout vazbu mezi kvalitou, spolehlivostí a udržitelností a přimět podniky, aby se zaměřily na otázky spolehlivosti, a také stanovit souvislost mezi spolehlivostí hospodářským výsledkem společnosti a přežitím společnosti. Větší zaměření na celkovou spolehlivost managementu (TRM) pomůže firmám zvýšit produktivitu a efektivitu a zároveň snížit spolehlivost. nákladů a zvýšit jejich konkurenceschopnost.

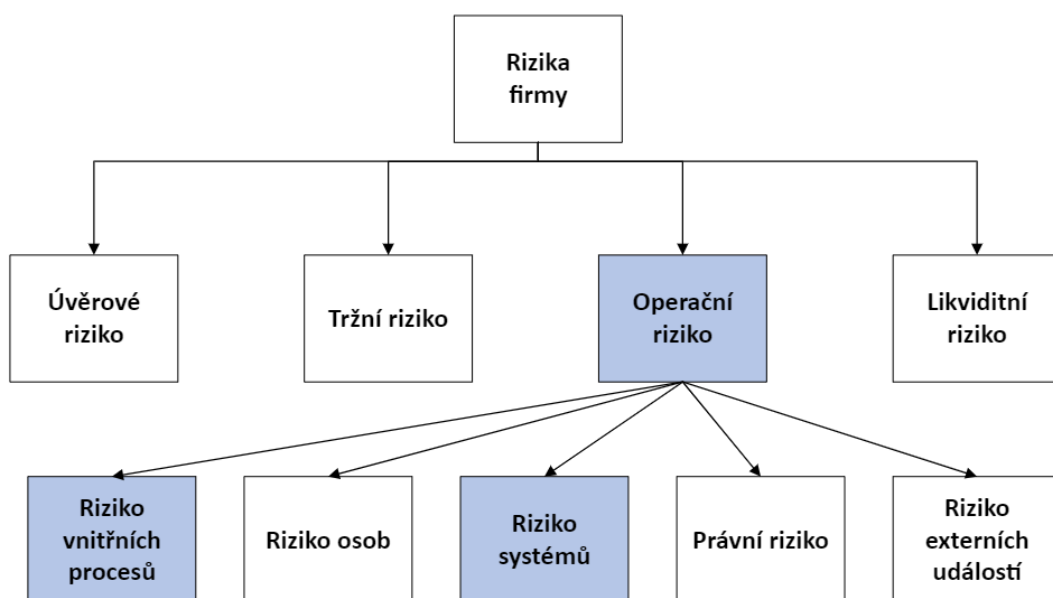
## **2.3 MANAGEMENT RIZIK**

Řízení rizik popisuje ve své literatuře Yoe [16] jako rozhodování, které se vyvíjí s tím, jak se snižuje nejistota. Je na pomezí vědy a hodnot. Řízení rizik je záměrné, pokud jde o jeho proces, zabývá se nejistotou při rozhodování a zaměřuje se na výsledky. Existuje mnoho používaných modelů řízení rizik, většina z nich zahrnuje odhad rizika, hodnocení rizika, kontrolu rizika a monitorování rizika. Odhad rizika vyžaduje, aby manažeři identifikovali riziko, stanovili cíle řízení rizika, vyžádali si informace potřebné pro rozhodování, zahájili nezávislý proces hodnocení rizika a zvážili výsledky tohoto procesu. Hodnocení rizik vyžaduje, aby manažeři rizik stanovili přijatelnou a tolerovatelnou úroveň rizika a na základě těchto stanovení rozhodovali o tom, zda jednat, nebo nejednat. Řízení rizik vyžaduje, aby manažeři rizik dohlíželi na to, aby byly formulovány, vyhodnocovány a porovnávány možnosti řízení rizik, což vede k výběru nejlepší možnosti řízení rizik s ohledem na dostupné důkazy a zbývající nejistotu. Rozhodnutí o řízení rizik jsou podmíněna

informacemi dostupnými v době rozhodování. V důsledku toho je nutné sledovat účinky těchto rozhodnutí, aby bylo zajištěno dosažení požadovaných výsledků.

Řízení rizik ve výrobním procesu je podle Leeho [17] náročné, protože rizika jsou rozptýlena v různých jednotkách distribučního systému a je obtížné realizovat agregační nebo přenosový efekt rizika. Součástí problému je nevědomost a přílišný optimismus, protože vrcholové vedení se může více zajímat o zisk a produktivitu než o řízení rizik. Špatné řízení rizik však může vést ke zpoždění, nízké propustnosti a vysokým nákladům, proto je důležité uvědomit si účinnost řízení rizik. Typické řízení rizik zahrnuje identifikaci rizik, hodnocení rizik, migraci rizik a monitorování rizik.

Na obr. č. 2 jsou vyobrazeny druhy rizik, se kterými se může firma (výrobní společnost) potýkat. Tato diplomová práce se bude primárně zaměřovat na rizika operační.



Obrázek 2 - Rizika firmy [18]

Mazánková a Němec [19] ve shodě se zdrojem [18] označují operační riziko jako „riziko ztráty vlivem nedostatků či selhání vnitřních procesů, lidského faktoru nebo systémů či riziko ztráty vlivem externích událostí, včetně rizika právního“.

Jak z ilustrace vyplívá, tato práce se bude primárně věnovat rizikům systémů a vnitřních procesů.

### 2.3.1 Nebezpečí

Nebezpečím (anglicky hazard) je v knize Ovládání rizika: analýza a management [20] označována reálná hrozba, která by za určitých podmínek mohla poškodit vyšetřovaný objekt nebo proces. Pokud není nebezpečí známé, hrozba neexistuje a tím pádem nejde o nebezpečí, proto je nutné, aby byla řeč pouze o nebezpečích známých. Pojem „neznámé nebezpečí“ však nelze opomíjet. Z těchto typů nebezpečí vycházejí tzv. zbytková rizika, které ač nejde matematicky vyjádřit, jejich hodnota může natolik významná, že může převážit míru dosud známých a popsanych, proto je nutné s nimi počítat. Odhad těchto zbytkových rizik vychází převážně ze zkušeností a intuice a je nutné na ně přihlížet s rozpočtovými rezervami. Zbytková rizika se nejvíce uplatňují na úvahách, které jsou založeny na základě předběžné opatrnosti. [20]

Gravley zase ve svém odborném článku [21] uvádí, že na nebezpečí je nejlépe nahlížet jako na přirozeně se vyskytující nebo člověkem způsobený proces nebo událost potenciálně způsobující ztráty.

Z hlediska typologie lze podle Tichého [20] nebezpečí rozdělit na absolutní a relativní. Rozdíl spočívá v tom, že absolutní nebezpečí je nepříznivou událostí vždy a pro každého, relativní nebezpečí však může být pro někoho událostí příznivou. Jelikož je jen málo událostí, které by byly nepříznivé vždy a pro každého, z všeobecného hlediska převažují nebezpečí relativní. Příkladem relativního rizika může být ve výrobní společnosti výpadek kvůli technické poruše nebo přírodní události, což by mělo za následek ztrátu produktivity a zisku. Pro pojišťovnu by však tento scénář mohl být značně výhodný, protože by mohla společnosti nabídnout pojištění, kterým by způsobené škody pokryla. Pojišťovna by tak mohla získat stabilní příjem z pojistných poplatků a současně poskytnout ochranu proti nečekaným událostem, což by bylo výhodné pro obě strany. Tichý také nastiňuje, že realizace nebezpečí však se může projevit více než jedním způsobem. Každý způsob realizace, který se vyznačuje výskytem určitých skutečností, nazýváme „scénář nebezpečí“. Je nutné zmínit, že tento scénář je se mění v závislosti na čase a v rizikové analýze lze k jednomu nebezpečí uvést hned několik scénářů nebezpečí. Nebezpečí pro poruchu stroje se například liší v závislosti na čase, jelikož čím déle stroj pracuje, tím větší je v důsledku opotřebení pravděpodobnost poruchy. Samotná porucha může vyústit hned několika scénáři nebezpečí, jako může být například zastavení výroby, poškození výrobků či zraněním zaměstnanců.[20]

### 2.3.2 Nejistota

Informace, které běžně využíváme nebo se s nimi setkáváme v analýzách rizik nemají podle knihy Ovládání rizika: analýza a management [20] všechny stejnou spolehlivost ani významnost. I navzdory tomu se však dají odstupňovat. Výchozím pojmem je jistota, kdy všechny skutečnosti mají jednoznačný charakter a výsledek činností, o kterých se rozhodovalo se nemůže nijak odchýlit od předpokladu. Pokud se však jistota ztratí, je nutné počítat s nejistotou.

Tento pojem zahrnuje podle normy ČSN EN 31010 ed. 2:2020 [22] mnoho základních termínů a typů, o jejichž kategorizaci bylo učiněno mnoho pokusů. Nejistoty lze z hlediska typologie rozdělit na aleatorní a epistemické. U aleatorní nejistoty se uznává vlastní variabilita nějakého jevu, kterou nelze snížit dalším zkoumáním. Příkladem může být hod kostkou. Epistemická nejistota vyplývá z nedostatku znalostí, ovšem lze ji obecně snížit sběrem více dat či zpřesněním modelů.

Nejistota se může vyskytovat ve dvou uznávaných formách, a to v jazykové, u kterých se uznává neurčitost a nejednoznačnost, která je mluveným jazykům blízká a nejistotě rozhodování, která má velkou významnost ve strategiích managementu rizik. Je zde identifikována nejistota sdružená s hodnotovými systémy, hodnotami společnosti, společenskými normami a profesionálními posudky. Mezi příklady nejistot lze zařadit:

- Nejistota o pravdivost předpokladů o chování lidí nebo systémů
- Parametrová variabilita, na které se má rozhodnutí zakládat
- Nedostatek znalostí vzniklý během rozpoznávání nejistoty, která není zcela pochopena
- Nepředvídatelnost
- Nejistota spojená s živelními pohromami
- Události, jejichž charakter, výskyt nebo následky jsou nejisté (včetně změn podmínek nebo okolností)

Ne však všem nejistotám lze porozumět a stanovení nebo ovlivnění významnosti může být velmi obtížné nebo zcela nemožné. Pokud však dojde k rozpoznání existence nejistoty ve specifikovaném kontextu, je možné proaktivně a včasné zavést systémy včasného varování k detekování změny a provedení opatření k vytvoření odolnosti s cílem zvládnout neočekávané okolnosti.

### 2.3.3 Riziko

Jedná se o historický výraz, který podle Smejkal a Raise [23] pochází ze 17. století, kde se objevil v souvislosti s lodní dopravou. Termín "risico" pochází z italštiny a označoval úskalí, kterému se museli mořeplavci vyhnout. Následně se tím vyjadřovalo „vystavení nepříznivým okolnostem“. Ve starších literaturách je možné nalézt pod tímto heslem vysvětlení, že se jedná o nebezpečí či odvahu, nebo že „riskování“ znamená něčeho se odvážit. Teprve později se objevuje význam možné ztráty. V dnešní době jsou názvem „riziko“ kvalitativně označovány velmi rozdílné, byť velice příbuzné pojmy. Při hledání definice rizika jde o problém, který není univerzálně řešitelný – sémantický. Velice záleží na oboru, problematice, odvětví, co se pod tímto termínem rozumí; záleží taktéž i na jazyku, ve kterém se o riziku komunikuje (v českém jazyce má slovo „riziko“ negativní odstín). Existuje několik skupin definic, kterými je možné riziko definovat (technické, sociální, ekonomické).

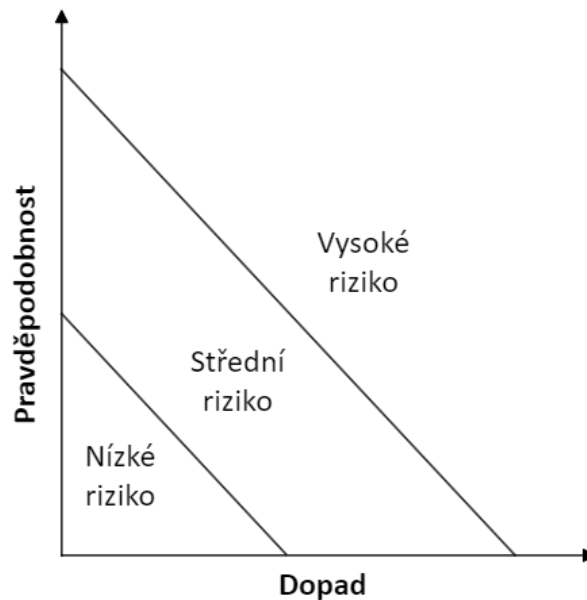
Kniha Ovládání rizika: analýza a management [20] definuje riziko jako *„pravděpodobná hodnota ztráty vzniklé nositeli, popř. příjemci rizika realizací scénáře nebezpečí, vyjádřena v penězích nebo jiných jednotkách“*

Z této definice je patrné, že riziko není veličina, která by vedla k exaktním hodnotám, nýbrž je to veličina jejíž hodnota je buďto empirickým, nebo analytickým odhadem. Tato definice směřuje k matematicky formulovatelnému analytickému odhadu, proto je možné se s ní v technickém odvětví setkat velmi často.

Další definicí popsanou v knize Řízení rizik ve firmách a organizacích: 3., rozšířené a aktualizované vydání [23] je riziko definováno jako *možnost, že dojde s určitou pravděpodobností k nežádoucí události (která se odlišuje od předpokládaného průběhu) a jejích důsledků pro nositele rizika.*

Autoři normy [22] doplňují, že riziko bývá často popisováno v podobě zdrojů rizika, potenciálních událostí, následků a pravděpodobností výskytu. Každá událost může mít několik příčin a může vést k několika následkům. Ty mohou mít charakter diskrétních hodnot (každý z těchto následků má jasné a konkrétní možnosti, které mohou nastat v důsledku rizika), mohou být spojitě proměnné (možnosti následků jsou plynulé mohou nabývat hodnot v určitých rozmezí) nebo neznámé. Následky nemusejí být ze začátku měřitelné nebo zjistitelné, ale jsou kumulovatelné v čase. Zdroje rizik mohou zahrnovat vlastní variabilitu nebo nejistoty, které se týkají řady faktorů, např. lidského chování, organizačních struktur nebo společenských vlivů, které jsou těžko předvídatelné z hlediska konkrétních událostí, které by mohly nastat. Z toho plyne, že

není vždy snadné riziko sestavit do podoby tabulky jako soubor událostí, jejich pravděpodobností a následků možností výskytu. Riziko také zahrnuje důsledky nejistoty jakékoliv formy popsané v předchozí kapitole. Na obr. č. 3 je vykreslena závislost pravděpodobnosti na dopadu.



Obrázek 3 - graf rizik [24]

Hodnota, neboli míra rizika je vyjádřena součinem pravděpodobnosti a dopadu. Pokud je stanoven dopad a pravděpodobnost pro určitý i-tý případ, riziko lze však vyjádřit matematicky vztahem:

$$R = P * D \quad (2)$$

kde:

$R$  – riziko

$P$  – pravděpodobnost toho, že nastane nějaký jev

$D$  – důsledky realizace nežádoucího jevu (obvykle ve finančním vyjádření)

U pojmů „nebezpečí“ a „riziko“ velice často dochází k jejich záměně či překrytí, nebo dokonce připsání stejného významu, a to i v oficiálních rozikologických člancích, skriptech a jiných dokumentech. Z toho vznikají dorozumívací problémy, nikoliv však závažné. [23]

### 2.3.4 Analýza rizik

Marhaviš et. al ve svém výzkumném článku [25] uvádějí, že zájem veřejnosti o oblast analýzy rizik se v posledních třech desetiletích skokově rozšířil a analýza rizik se stala účinným a komplexním postupem, který doplňuje celkové řízení téměř všech aspektů našeho života. Manažeři zdravotní péče, životního prostředí a systémů fyzické infrastruktury zahrnují analýzu rizik do svého rozhodovacího procesu. Všudypřítomné adaptace analýzy rizik mnoha obory spolu s jejím nasazením v průmyslu a vládních agenturách při rozhodování navíc vedly k nebývalému rozvoji teorie, metodologie a praktických nástrojů.

ČSN ISO 31073 [26] definuje analýzu rizik jako proces pochopení povahy rizika a stanovení úrovně rizika, což je kombinace dopadu a jeho možnosti výskytu.

Smejkal a Rais [23] rozdělují analýzu rizik do 4 fází, a to:

1. identifikaci rizik – vymezení posouzeného subjektu a popis aktiv, které vlastní
2. stanovení hodnoty aktiv – určení hodnoty aktiv a jejich významu pro subjekt, hodnocení možného dopadu, změny nebo poškození na existenci či chování subjektu.
3. Identifikaci hrozeb a slabín – určení druhu událostí a akcí, které mohou negativně ovlivnit hodnotu aktiv, určení slabých míst objektu, které mohou umožnit působení hrozeb.
4. Stanovení závažnosti nebezpečí a míru zranitelnosti – určení pravděpodobnosti výskytu hrozby a míry zranitelnosti objektu vůči dané hrozbě.

Lee et al ve svém článku [17] k prvnímu kroku doplňují, že identifikace rizik představuje první krok řízení rizik, kdy si uvědomíme potenciální rizika v nejistých situacích. Zkušený manažer dokáže identifikovat zdroje rizik, protože je citlivý a dokáže odhalit neobvyklé jevy. Rizikové faktory se mohou u různých organizací lišit v závislosti na struktuře, velikosti, obchodních hodnotách, produktech a cílech organizace. Riziko soustředěné v určitém modulu nebo subsystému se řeší relativně snadněji než rizika rozložená v různých modulech. V důsledku toho je důležité řídit a pochopit tok procesu a vzájemně souvisejících činností v systému, což může odborníkům pomoci identifikovat potenciální riziko. Pomocí Petriho sítí lze realizovat tok procesu a definovat syntaxi a výkonnou sémantiku. Po identifikaci rizik během výrobního procesu mohou Petriho sítě graficky znázornit chování systému pomocí přechodů a stavů.

Autoři v článku [17] dodávají, že hodnocení rizik je proces, při kterém by manažeři měli analyzovat potenciální dopady identifikovaných rizik na organizaci. Vrcholový management by měl identifikovat různé hrozby, které by mohly mít na organizaci strategický nebo provozní dopad, a výrobci musí rizika kvantifikovat pomocí matematických modelů a přiřadit jim rozdělení pravděpodobnosti. Na základě výsledků simulace mohou výrobci pochopit rizikové faktory v rámci různých scénářů, takže vedení může formulovat migrační plán na zmírnění rizik a vyhodnotit důsledky těchto rizik. Příslušné činnosti řízení rizik by měly být prováděny s ohledem na různé scénáře.



### **3 FORMULACE PROBLÉMŮ A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ**

V současné době čelí vybraný podnik výzvě nízké spolehlivosti výrobních strojů, což má negativní dopad na produktivitu a efektivitu výrobních procesů. Nízká spolehlivost se projevuje častými poruchami a neplánovanými odstávkami, které vedou k zvýšeným nákladům na údržbu a opravárenské práce, snížení výrobní kapacity a zpoždění dodávek produktů zákazníkům. Identifikace a implementace vhodných opatření ke zvýšení spolehlivosti strojů je proto klíčová pro zajištění kontinuity a efektivity výroby.

Cílem této práce je posoudit spolehlivost výroby ve vybraném podniku pomocí vhodně zvolených parametrů a následně analyzovat, zda navržená a implementovaná opatření přispěla ke zvýšení této spolehlivosti statisticky významným způsobem.

Výstupem práce bude komplexní hodnocení spolehlivosti výroby ve vybraném podniku, zahrnující identifikaci klíčových problémů, návrh a implementaci opatření ke zvýšení spolehlivosti a statistické vyhodnocení jejich přínosu. Tento postup umožní objektivně posoudit efektivitu zavedených opatření a poskytne podklad pro další zlepšování spolehlivosti výrobních strojů.

## 4 POUŽITÉ METODY A JEJICH ZDŮVODNĚNÍ

Tato kapitola se zaměřuje na metodologii použitou k analýze spolehlivosti výrobních procesů ve zkoumané společnosti. Prvním krokem při analýze spolehlivosti je definice a identifikace klíčových ukazatelů spolehlivosti, které slouží jako měřítko pro hodnocení výkonnosti procesů. Dále je představena Petriho síť jako nástroj pro modelování a vizualizaci výrobních procesů, což umožňuje identifikovat možné problémové oblasti a optimalizovat průběh procesů. [4; 27]

Metody analýzy rizik, jako jsou FTA (Fault Tree Analysis) a FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), jsou klíčové pro identifikaci potenciálních rizik a jejich následků na spolehlivost výrobních procesů. FTA se zaměřuje na identifikaci příčin selhání a konstrukci stromových diagramů, zatímco FMEA se soustředí na analýzu jednotlivých způsobů selhání a jejich dopadů na procesy. Tyto metody umožňují systematické vyhodnocení rizik a identifikaci klíčových oblastí, které vyžadují pozornost a opatření. Provedené analýzy a modely poskytnou důležité informace pro návrh konkrétních opatření a strategií pro zlepšení spolehlivosti výrobních procesů ve zkoumané společnosti. [28; 29; 24]

### 4.1 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI

Jedná se o číselné charakteristiky jedné nebo několika dílčích vlastností spolehlivosti. Hodnocení spolehlivosti spočívá ve stanovení číselných hodnot ukazatelů a v jejich srovnání s hodnotami, které byly stanoveny nebo s hodnotami ukazatelů obdobných objektů. Jak již bylo zmíněno, spolehlivost je komplexní vlastnost a z toho důvodu ji nelze popsat jedním ukazatelem. Všechny známé a používané ukazatele charakterizují buďto jednu dílčí vlastnost (jednoduchý ukazatel) nebo charakterizují více dílčích vlastností (komplexní ukazatel). Spolehlivost bývá obecně popsána specifickým souborem těchto jednoduchých a komplexních ukazatelů. Dále lze ukazatele rozdělit na základě toho, podle čeho je určena jejich hodnota. Pokud je hodnota stanovena výpočtem z konečného počtu údajů, které byly získány sledováním pozorovaného objektu, mluvíme o pozorovaném ukazateli. Pokud je hodnota ukazatele vyjádřena jediným číslem, jedná se o bodový odhad ukazatele. Pokud je však hodnota vyjádřena v podobě hraničních hodnot, které jsou v určitém rozmezí, jedná se o intervalový odhad ukazatele. V následujících podkapitolách budou zmíněny a popsány vybrané ukazatele spolehlivosti.[1]

### 4.1.1 Pravděpodobnost bezporuchového provozu

Ukazatel, udávající s jakou pravděpodobností bude daný objekt plnit během časového intervalu svoje funkce za určitých podmínek. Je obecně předpokládáno, že na začátku časového intervalu je objekt schopen plnit požadované funkce. Kritérium, kterým je ukončena schopnost plnit požadované funkce se nazývá porucha. Anglický překlad pro pravděpodobnost bezporuchového stavu je reliability a je dána vztahem: [4; 30; 31]

$$R(t_1, t_2) = R(t_2) + \int_0^{t_1} R(t_2 - t)z(t)dt \quad (3)$$

kde:

$R(t_2)$  – pravděpodobnost dožití do doby  $t_2$

$z(t)$  – nepodmíněná okamžitá intenzita poruchy, hustota obnovy základního procesu obnovy

$\int_0^{t_1} R(t_2 - t)$  – pravděpodobnost obnovy po poruše v okamžiku  $t$ , kdy  $t < t_1$  a také pravděpodobnost dožití do okamžiku  $t_2$ . [4; 30]

Pokud je bezporuchovost objektu sledována od samotného začátku jeho uvedení do provozu, čili  $R(t) = R(0, t)$ , je pravděpodobnost bezporuchového stavu dána vztahem: [4; 30]

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt \quad (4)$$

kde:

$f(t)$  – funkce hustoty pravděpodobnosti poruchy [4; 30]

Hustota pravděpodobnosti poruchy vyjadřuje rychlost, se kterou vznikají poruchy v libovolném okamžiku  $t$ . Pokud je však intenzita poruch konstantního charakteru a doby do poruchy jsou rozloženy exponenciálně, pro pravděpodobnost bezporuchového stavu platí následující zjednodušení: [4; 30]

$$R(t_1, t_2) = \exp [-\lambda * (t_1 - t_2)] \quad (5)$$

Kde:

$\lambda$  – intenzita poruch

$t_1$  – start sledování objektu

$t_2$  – konec sledování objektu [4; 30]

#### 4.1.2 Intenzita poruch

Ukazatel vyjadřující limitu poměru podmíněné pravděpodobnosti, pokud vznik poruchy objektu leží v intervalu  $(t, t + \Delta t)$ , k době časového intervalu  $\Delta t$ , jestliže  $\Delta t$  se blíží nule. Podmínkou je, aby se objekt na začátku sledovaného intervalu nacházel v použitelném (provozoschopném) stavu. Stručněji řečeno vyjadřuje, jaká část doposud fungujících objektů bude mít poruchu v určitém časovém intervalu. Označuje se  $\lambda(t)$ , její anglický překlad je failure rate a je dána vzorcem: [4; 30; 31]

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} * \frac{1}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6)$$

Kde:

$f(t)$  – hustota pravděpodobností poruchy

$R(t)$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu [4; 30]

#### 4.1.3 Střední doba mezi poruchami

Tento ukazatel vyjadřuje střední hodnotu mezi dvěma po sobě následujícími poruchami stejného původu (střední hodnota = aritmetický průměr ze všech uvažovaných hodnot). Zahrnuje rovněž dobu provozu a prostoje nezávisle na tom, zda se objekt nachází v provozuschopném stavu či nikoliv, nebo zda je, nebo není v provozu. Nemusí však být vyjádřena pouze časovými jednotkami, ale také například počtem pracovních cyklů nebo množstvím vykonané práce. Anglický překlad tohoto ukazatele je „mean time between failures“ a je definován následujícím vzorcem: [4; 30; 32]

$$MTBF = MUT + MDT \quad (7)$$

kde:

MTBF – střední doba mezi poruchami

MUT – střední doba použitelného stavu (mean up time)

MDT – střední doba nepoužitelného stavu (mean down time) [4; 30]

Střední dobou použitelného a nepoužitelného stavu (anglicky mean up time a mean down time) se rozumí časový interval, během kterého je objekt buďto v použitelném, nebo nepoužitelném stavu. [30]

V okolnostech, kdy není počítáno s tzv. preventivní údržbou (údržba, která se provádí dle předepsaných kritérií nebo v předem definovaných intervalech zaměřená na co největším snížení pravděpodobnosti vzniku poruchy nebo degradace fungování objektu) je střední doba mezi poruchami rovna tzv. střední době do obnovy. [4; 30]

$$MTBF = MUT + MTTR \quad (8)$$

kde:

MTBF – střední doba mezi poruchami

MUT – střední doba použitelného stavu

MTTR – střední doba do obnovy [30]

Střední doba do obnovy (anglicky mean time to restoration) je ukazatel označován jako MTTR a definován jako časový interval, během kterého dojde k obnovení systému po poruše. Jeho hodnota obsahuje čas pro diagnostiku problému, dobu, za kterou se dopraví servisní technik na místo a čas, který je potřebný pro fyzickou opravu systému nebo objektu. Platí, že čím delší je prodleva MTTR, tím horší je kvalita systému. [4; 30]

Pokud je objekt provozován nepřetržitě, střední doba použitelného stavu se rovná střední době provozu do poruchy (mean time to failure). Tento ukazatel je označován MTTF a je popsán jako průměrná doba provozu objektu od okamžiku jeho uvedení do použitelného stavu až do stavu

poruchy, nebo od okamžiku obnovy do příští poruchy. Střední doba mezi poruchami je pro snadnější porozumění vyobrazena na obr. č. 4 a dána vztahem: [4; 30]

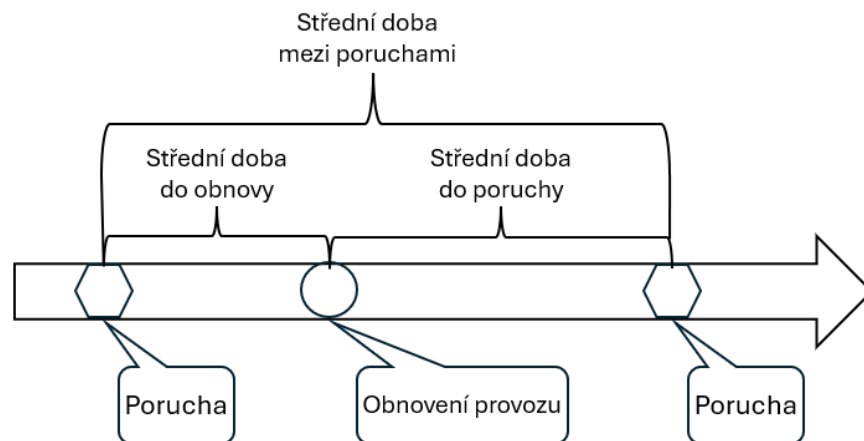
$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (9)$$

Kde:

*MTBF* – střední doba mezi poruchami

*MTTF* – střední doba do poruchy

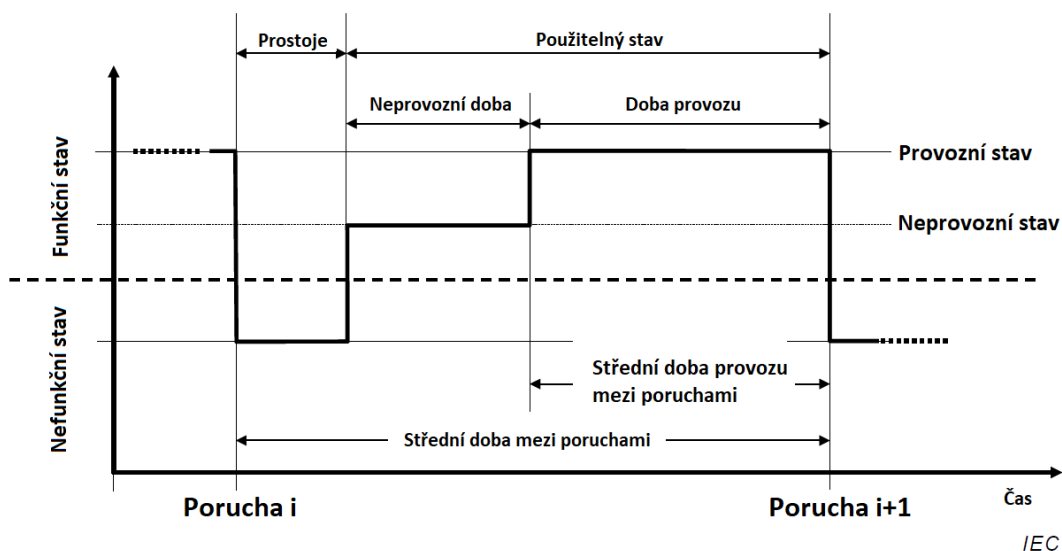
*MTTR* – střední doba do obnovy



Obrázek 4 – Střední doba mezi poruchami [33]

#### 4.1.4 Střední doba provozu mezi poruchami

Ukazatel, značící se MOTBF (anglicky mean operating time between failures) je speciální případ doby provozu do poruchy, který je použitelný pouze u opravitelných objektů. Střední doba provozu mezi poruchami na rozdíl od MTBF zahrnuje pouze čas, kdy je zařízení v provozu, nikoliv však dobu, kdy je mimo provoz například kvůli plánované údržbě. Podrobněji je tento rozdíl znázorněn na obr. č. 5: [4; 30; 31]



Obrázek 5 - rozdíl mezi MOTBF a MTBF [30]

#### 4.1.5 Střední doba provozu do poruchy

Tento ukazatel je označován mezinárodní ustálenou zkratkou MTTF (anglicky mean time to failure) a je popsán jako průměrná doba provozu objektu od okamžiku jeho uvedení do použitelného stavu až do stavu poruchy, nebo od okamžiku obnovy do příští poruchy. Je vyjádřen vztahem: [4; 30; 31]

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (10)$$

kde:

$MTTF$  – střední doba provozu do poruchy

$f(t)$  – hustota pravděpodobnosti poruchy

$t$  – čas [30]

U objektů, které nejsou opravovány a mají exponenciální charakter rozdělení provozní doby do poruchy a jejichž intenzita poruch je konstanta, se jedná o dobu do vzniku mezního stavu, takže tato doba udává současně dobu technického života objektu a je vztáhnuta tedy k životnosti objektu. V takovém případě je možné střední dobu do poruchy definovat vztahem: [4; 30]

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

kde:

*MTTF* – střední doba do poruchy

$\lambda$  – intenzita poruch [4; 30]

Technickým, neboli užitným životem je rozuměn časový interval, který začíná daným časovým okamžikem a končí v okamžiku, kdy je intenzita poruch pro objekt nepřijatelná, nebo pokud je daný objekt z důvodu poruchového stavu považován v jistých podmínkách za neopravitelný. Jinak řečeno, jedná se o součet všech dob provozu od počátku až po vznik mezního stavu. Poté, co je technický život ukončen je objekt vyřazen z provozu, v případě že není provedena generální oprava, díky které by objekt byl znovu schopný plnit své požadované funkce. [4; 30]

## 4.2 PETRIHO SÍŤ

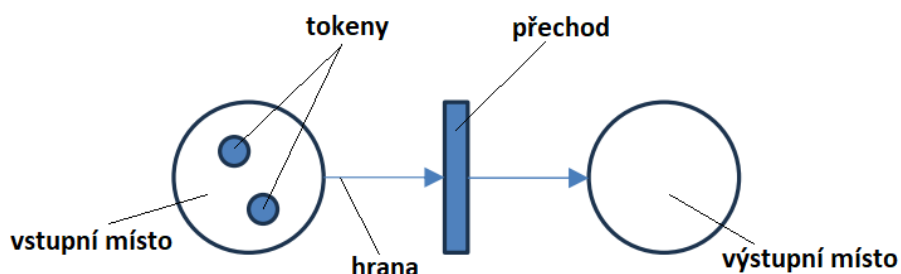
Hlavní síla použití modelování pomocí Petriho sítí tkví v schopnosti popsat chování systému díky modelování vztahu mezi lokálními událostmi a stavy. Petriho síť na základě těchto skutečností nachází širokého uplatnění ve velkém množství průmyslových oblastech použití (například energetice, zpracovatelské oblasti, dopravní a výrobní). Výhodou oproti konvenčním metodám (např. blokových diagramů bezporuchovosti nebo stromu poruchových stavů), je schopnost modelování dynamického chování systému a zacházení s více stavovými systémy. Další výhodou narozdíl např. od Markovova procesu je, že nejsou náchylné k prudkému vzrůstu kombinací stavů, se kterými se má zacházet. Díky těmto vlastnostem je vždy na místě mít tuto alternativní metodu k dispozici. Spolehlivostní výpočty průmyslového systému jsou určeny k modelování různých stavů procesů a vývoje systému z jednoho stavu do druhého, když dojde k nějakým událostem ovlivňujících spolehlivost (opravy, poruchy nebo periodické testy). Pro technické pracovníky, kteří se zabývají spolehlivostí konkrétního systému nebo objektu, jsou Petriho síť velmi slibnou modelovací metodou hlavně díky své velmi přívětivé grafické podpoře. [27; 34]

### 4.2.1 Princip Petriho sítí

Petriho síť lze z časového hlediska rozdělit na nečasované a časované. Časované Petriho síť jsou grafy, kdy jsou rozlišeny aktivní a pasivní uzly. Pasivními prvky se rozumí místa (značka P), která modelují např. lokální stavy nebo podmínky a pokud je lokální stav splněn, označí se tokeny.



Token je základním prvkem, který reprezentuje jednotlivé stavy a přechody v síti. Aktivními prvky se zase nazývají přechody. Značí se díky kterým lze modelovat změny z jednoho stavu do druhého. Přechody a místa se nazývají uzly. Vztahy mezi jevy, které reprezentují přechody a místa jsou popsány pomocí různých druhů hran (značka F), pomocí kterých dochází ke spojení uzlů. Příklad uzlu lze demonstrovat na obr. 6: [27; 35]



Obrázek 6 - Uzel Petriho sítě [36]

Přechod se stává proveditelným za podmínky, jestliže všechna jeho místa vstupní množiny, která jsou s ním spojena obyčejnými, nebo testovacími hranami jsou a označena potřebným počtem tokenů. V případě spojení inhibičními hranami ke spojení dojde za předpokladu, že předem nastavená místa vstupní množiny jsou neoznačena. Pro aktivaci (proveditelnost) přechodu je u každé hrany okomentován potřebný počet tokenů. Příklady přechodů u takto specifikovaných hran budou uvedeny v dalších kapitolách. [27]

Za okolnosti, že je přechod proveditelný, může dojít k odpalu, tj. změny značení modelu. To však může změnit pouze značení míst, která jsou s ním spojena obyčejnými hranami. Odpal funguje na principu absorpce tokenů z odpovídajících míst v jejich vstupní množině a vložení těchto tokenů do množiny výstupní. Počet tokenů, u kterých lze provést absorpci a vložení je specifikován návěstím hrany. Pokud však není uvedeno žádné návěstí, počet tokenů je roven jedné. Z toho plyne, že hrany, místa a přechody tvoří statické prvky a vztahy systému, zatímco tokeny mohou mizet nebo být vkládány podle modelovaných stavů systému. V tabulce č. 1 jsou vyobrazeny prvky Petriho sítě. [27; 35]

Značka místa (používána také pro vícenásobná místa)	Přechod	Obyčejná hrana	Testovací hrana	Inhibiční hrana	Token

Tabulka 1 – prvky Petriho sítí [27]

Jestliže by se však jednalo o časované Petriho sítě, je možné použít jak časované, tak i nečasované přechody. K odpalu tokenu je ovšem nezbytné, aby byl časovaný přechod po specifickou dobu v proveditelném stavu. Tato specifická doba může být deterministická (doba mezi událostmi je pevně stanovená a nemění se) nebo stochastická (spojena s náhodností a pravděpodobností). V situaci, kdy jsou proveditelné dva nebo více přechodů zároveň, pak je odpal přechodů určen další specifikací, a to tzv. politikou soupeření. Mimo to musejí být kromě rozdělení doby odpalu specifikovány volby týkající se politiky provádění a paměti. Poté, co tato doba uplyne, je možné přechod odpálit. Běžně používané přechody v časových sítích jsou uvedeny v tabulce č. 2.: [27; 35]

	Přechod			
	Deterministický		Stochastický	
	Nulové zpoždění	Zpoždění	S geometrickým nebo exponenciálním rozdělením	S libovolným rozdělením
Parametr		d	$\lambda$	$\Phi$ Libovolné rozdělení
Značka				

Tabulka 2 - Běžně používané přechody [27]

S odkazem na specifikovaný typ časovaného přechodu lze každému přechodu s deterministickou dobou odpalu přisoudit časový parametr, který definuje dobu trvání daného odpalu a u přechodů s libovolně rozdělenými dobami přechodu jejich konstantní intenzitu. [37]

#### 4.2.2 Vztah mezi Petriho sítěmi a spolehlivostí

Tyto dva pojmy jsou spojeny v oblasti analýzy a modelování spolehlivosti. Zatímco Petriho sítě poskytují velmi užitečný grafický model pro popis dynamických systémů procesů, spolehlivost

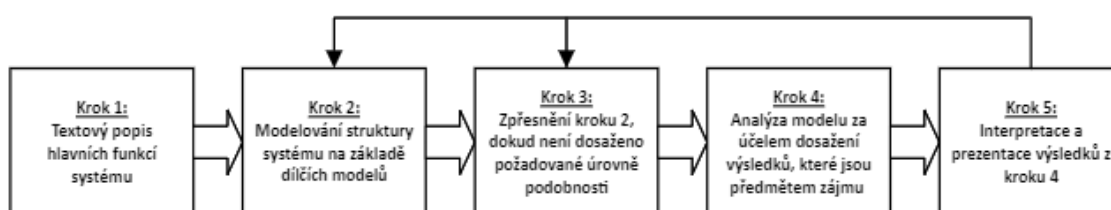
se věnuje pravděpodobnostním vlastnostem těchto systémů, a to zejména jejich schopnosti fungovat bez poruch. Mezi konkrétní způsoby, které spolehlivost a Petriho sítě spojují, lze zařadit modelování, analýzu a optimalizaci spolehlivosti. [27; 38]

Při modelování spolehlivosti, jak již bylo zmíněno, stavy v Petriho sítích reprezentují různé operační podmínky systému. Přejchody symbolizují události, jako jsou například poruchy, opravy nebo jiné události měnící stav systému. Pomocí míst jsou zase modelovány lokální (např. poruchové) stavy. Každý uzel reprezentuje odpovídající rys spolehlivosti a pokud je to požadováno, udává i související součást. Pokud jsou pojmy Petriho sítí interpretovány tímto způsobem, je možné hovořit o „spolehlivostně interpretovaných Petriho sítích.“ V tabulce č. 3 se uvádí přehled některých důležitých pojmů používaných obecně v systémech, Petriho sítích a spolehlivosti. [27; 34]

Hledisko	Systém	Petriho síť	Spolehlivost
Dynamické	Událost	Porucha	Oprava
Statické	Lokální stav	Poruchový stav	V provozu

Tabulka 3 - Odpovídající si pojmy v systémech, Petriho sítích a spolehlivosti [27]

Na základě přiměřeně podrobného modelu je možné provést analýzu systému. Tato analýza Petriho sítí slouží k identifikaci slabých míst nebo kritických bodů v systému, které mohou ovlivnit jeho spolehlivost. Pomocí simulačních technik lze zkoumat chování systému v určitých podmínkách, což může poskytnout cenné informace a poznatky o jeho spolehlivosti. Výsledky této analýzy musí být reprezentovány uživatelsky přívětivým způsobem. Na obrázku č. 7 jsou popsány hlavní kroky při procesu modelování a analýze spolehlivosti. Přestože může tento proces vypadat přímočaře, je nutné počítat s tím, že se jedná o velmi iterativní proces. Konkrétně zpřesňování modelu obvykle vyžaduje hned několik iterací. Všechny kroky je nutné dokumentovat. [27; 35]



Obrázek 7 - proces analýzy a modelování [27]

V prvním kroku dochází pomocí tabulek, volného textu a obrázků k popisu hlavních funkcí. Je nutné aby byly identifikovány a důkladně popsány představy o systému, který má být modelován a analyzován. Tento popis by měl především obsahovat:

- požadavky, prostředí, kontext a hranice (z hlediska spolehlivosti)
- hlavní části (například regulovaná soustava a řídicí zařízení)
- hlavní funkce (například provozní nebo řídicí) a jejich účel

Následuje krok č. 2, ve kterém se na základě dílčích modelů Petriho sítí modeluje struktura modelu, která se následně zdokumentuje. Systémy dynamického charakteru, například automatické systémy je možné rozdělit na subsystemy, tzv. neřízená regulovaná soustava a řídicí zařízení. Tato neřízená regulovaná soustava je řízena řídicím zařízením tak, aby se soustava nedostala do nežádoucích stavů (neřízená regulovaná soustava se stává řízenou). Z toho vyplývá, že spolehlivost systému je závislá na spolehlivosti jeho řídicího zařízení.

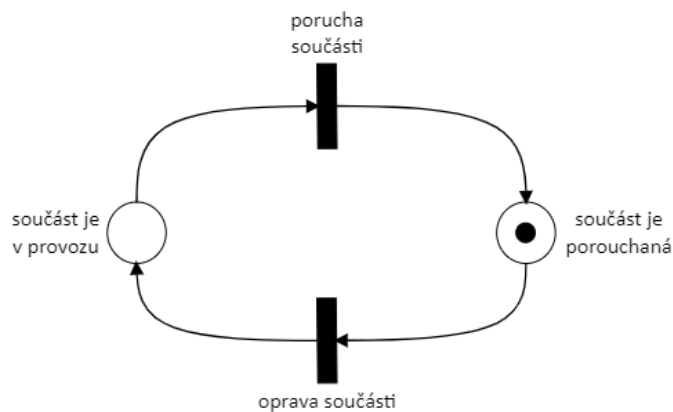
V třetím kroku se model z druhého kroku zpřesňuje, dokud nedosáhne požadované úrovně podrobnosti a zahrnutí všech potřebných informací, které jsou nezbytné pro pozdější analýzu. Mezi formy zpřesňování patří například povinné označení každého uzlu návěstím s jedinečným identifikátorem. Všeobecně je doporučeno použití značek z tabulky č. 2. Tento model se taktéž dokumentuje. Dokumentaci je možné provádět během postupného zpřesňování. Tato dokumentace musí obsahovat:

- Reprezentaci subsystemu, případně celého modelu Petriho sítěmi
- Textový popis všech subsystemů

V následujícím, tj. čtvrtém kroku, je provedena analýza modelu za účelem dosažení výsledků, které jsou předmětem zájmu a v pátém kroku je provedena interpretace výsledků.

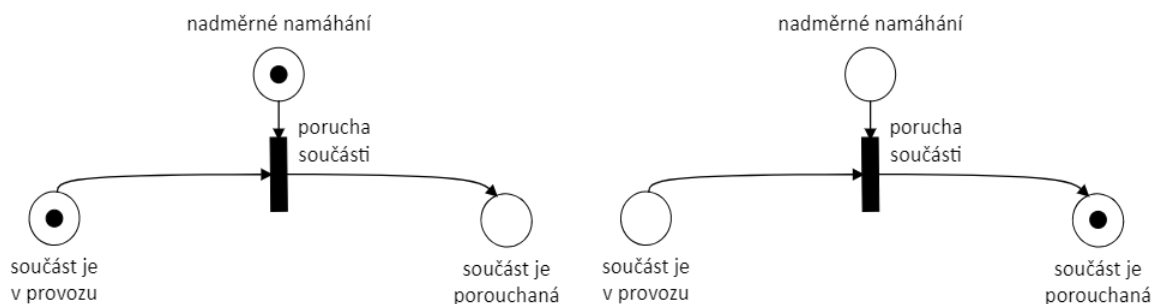
### **4.2.3 Struktura Petriho sítě**

Každá hrana Petriho sítí je spojena s dvěma různými druhy uzlů. Je to z toho důvodu, že se jedná od dvoustranné grafy. Na základě toho lze konstatovat, že mezi kterýmkoliv po sobě jdoucími stavy (poruchovým a provozním) existuje nějaká událost, která vede z jednoho stavu do druhého (porucha, oprava). Petriho sítě modelují všechny příslušné stavy, které je možné zaujmout a všechny možné vztahy příčina-následek, které se mohou v určitých podmínkách vyskytovat. [27; 39]



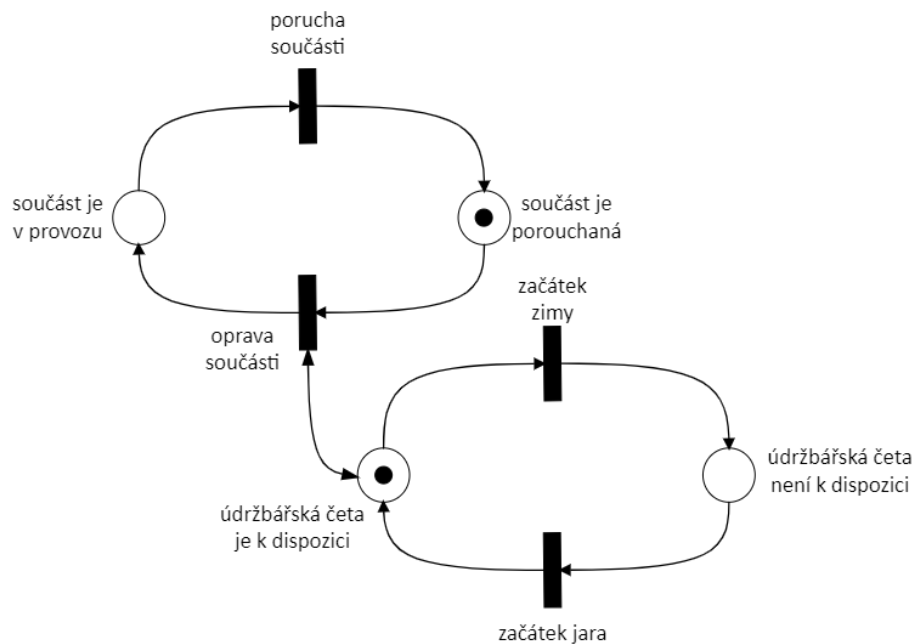
Obrázek 8 - Cyklus stav-přechod pohotovosti součásti [27]

Pokud jsou všechna místa výchozí množiny označena příslušným počtem tokenů, je možné přechod odpálit. Provedený přechod odstraňuje tokeny z výchozí množiny a vytváří tokeny v místech výstupní množiny. Jedná se tedy pouze o absorpci a vytváření tokenů, nikoliv o tok sítě. Jestliže dojde k nějaké události (poruše), stav systému se změní (ze stavu provozu do poruchového stavu). Z hlediska spolehlivosti se výskyt poruchy změnit stav systému z „v provozu“ na „porouchaný“ a podmínka může být například nadměrné namáhání. [27; 39]



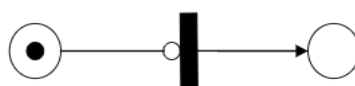
Obrázek 9 - Přechod do poruchového stavu [27]

Přechody mohou být také spojeny tzv. testovacími hrany. Tyto přechody nemění na místě počet tokenů a udávají, zda je nebo není místo označeno. Jsou značeny oboustrannými šipkami a na obrázku č. 10 je popsán princip, na kterém testovací hrany fungují. [27; 39]



Obrázek 10 - Příklad testovacích hran [27]

Posledním typem hran jsou tzv inhibiční hrany. Na rozdíl od ostatních typů hran se místo šipky značí malým kroužkem. Přechody, které přes tyto hrany vedou a jsou spojeny s místy množiny jsou uskutečnitelné, pokud počet tokenů je v těchto místech nižší, než je váha odpovídajících inhibičních vah. Jestliže jsou tedy váhy rovny jedné, přechod se provede pouze tehdy, pokud jsou daná místa bez tokenu. Na obr. č. 11 a 12 jsou vyobrazeny příklady těchto hran. U obr. č. 11 je patrné, že přechod není proveditelný, jelikož vstupní množina obsahuje token. Obr. č. 12 demonstruje proveditelný přechod pře a po odpalu.



Obrázek 11- Neproveditelný přechod [27]



Obrázek 12 - Značení před odpalem a po odpalu [27]

## 4.3 FTA

Analýza stromu poruch (FTA – Fault tree analysis) se používá k identifikaci a analýze podmínek a faktorů, které způsobí, nebo potenciálně mohou způsobit vrcholové události. Při analýze touto metodou je vrcholovou událostí obvykle označováno „zaseknutí“ nebo zhoršení fungování systému, zhoršení důležitých provozních a spolehlivostních atributů a bezpečnosti. Tato analýza je často používána z hlediska spolehlivosti k analýze pohotovosti a udržitelnosti, lze ji ovšem využít i k analýze bezpečnosti systémů. Pro jednoduchost se však v této diplomové práci bude k reprezentaci těchto hledisek používat termín „bezporuchovost“. [29]

Existují dva přístupy této analýzy. Prvním je kvalitativní přístup, během kterého se nepočítá s pravděpodobností událostí a faktory, které k ní přispívají (např. vstupní události). Je prováděna detailní kvalitativní analýza událostí, nebo poruchových stavů a je možné tuto analýzu označit jako tradiční FTA. Je nejvíce používána v jaderném průmyslu a mnoha dalších oblastech při hledání potenciálních příčin poruchových stavů, u kterých pravděpodobnost jejich výskytu není předmětem zájmu. Druhým přístupem, který hojně využívá v mnoha průmyslových oblastech je kvantitativní přístup. Pomocí tohoto přístupu se modeluje celý systém, proces nebo produkt a většina událostí (poruchových stavů) má v modelu nějakou pravděpodobnost výskytu vrcholové události, která reprezentuje pravděpodobnost bezporuchového provozu, nebo naopak stavu poruchového či poruchy. [29]

V této diplomové práci bude využit kvalitativní princip.

### 4.3.1 Pojmy a definice

V této metodice se k bližšímu vysvětlení záměru analýzy nebo procesu využívá mnoho termínů. V této části budou zmíněny ty nejdůležitější, a to:

- *Událost – výskyt určité podmínky nebo děje.*
- *Vrcholová událost – výstup kombinací všech vstupních událostí.*
- *Jednobodová porucha (událost) – poruchová událost, která, jestliže nastane, způsobí celkovou poruchu systému sama o sobě, bez ohledu na jiné události, nebo jejich kombinace, způsobí vrcholovou událost.*
- *Události se společnou příčinou – odlišné události v systému nebo ve stromu poruch, které mají stejnou příčinu svého výskytu.*
- *Hradlo – značka, která se používá ke stanovení symbolické vazby mezi výstupní událostí a odpovídajícími vstupy. [29]*

### 4.3.2 Struktura FTA

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jedná se o analytickou metodu používanou mimo jiné i pro analýzu spolehlivosti. Tuto metodu lze kombinovat i s jinými metodami (FMEA, ETA, Markovovy analýzy) a záleží na analytikovi, pro jaký účel FTA využije. Strom poruchových stavů je organizovaná grafická reprezentace faktorů udávajících výskyt vrcholové události a je to metoda deduktivní, prováděná shora dolů (určení příčin, které mohou vést k vrcholové události) a lze ji použít pro složité systémy s interakcemi i mezi softwarem a hardwarem. Cíle provedení této analýzy mohou být například:

- Vyhledání události nebo kombinaci událostí, které jsou s nejvyšší pravděpodobností příčinou toho, že dojde k vrcholové události.
- Posouzení dopadu událostí.
- Vypočtení pravděpodobností výskytu událostí.
- Prokázání, že jsou předpoklady učiněné v jiných analýzách (FMEA) účinné. [29]

Použití FTA je možné u všech nových nebo modifikovaných objektů ve všech etapách návrhu pro identifikaci potenciálních problémů, včetně časných etap, kdy nejsou informace o podrobnosti návrhu zcela úplné. Další využití lze nalézt i ve fyzickém návrhu produktu, v namáhání provozem nebo prostředím, ale také v chybách ve výrobních procesech a v provozních či údržbářských podmínkách. [29]

### 4.3.3 Sériová konfigurace systému

Montážní sestavy při modelování bezporuchovosti jsou v sériové konfiguraci, jestliže by porucha těchto sestav znamenala poruchu celého systému. Model, který odpovídá těmto charakteristikám je takový, že všechny tyto hradla nebo události (bloky) vstupují do hradla OR.

Matematicky lze tento výraz pro pravděpodobnost bezporuchového provozu vrcholového systému, který se skládá z „n“ bloků vyjádřit jako: [29]

$$R_s(t) = R_1(t) * R_2(t) * R_3(t) * \dots R_i(t) \dots R_n(t) \quad (12)$$

Aby byl systém provozuschopný, musí být blok 1 i blok 2 i provozuschopné. V analýze FTA je však využívána malinko jiná (opačná) logika. Poruchový stav vznikne za předpokladu poruchy součásti 1 nebo při poruše součásti 2. Sériový systém je tedy z tohoto důvodu označen



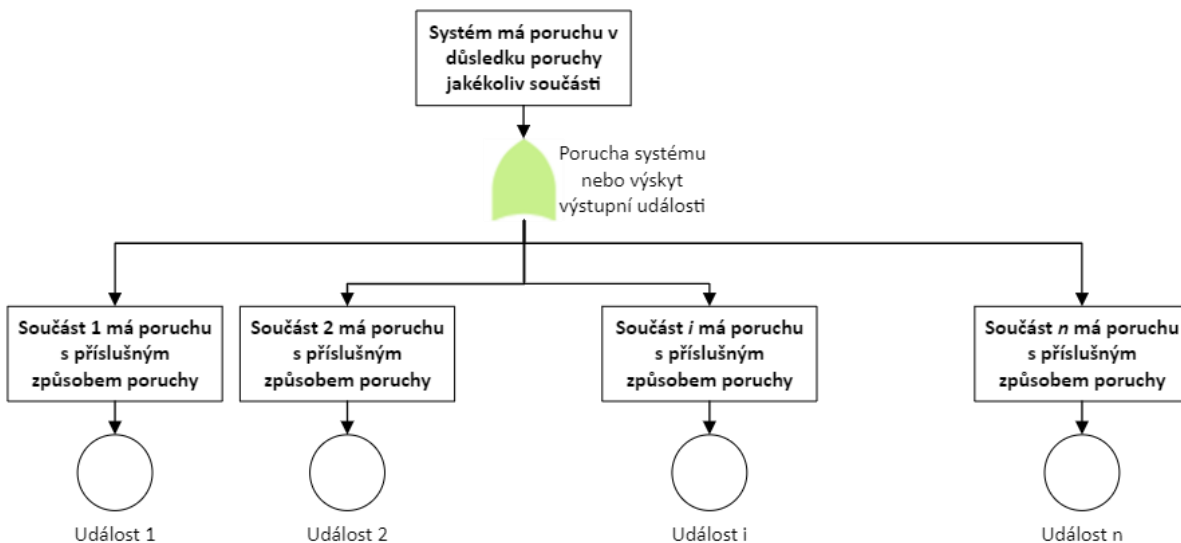
a reprezentován hradlem OR s výjimkou toho, že se vyjadřuje pravděpodobností poruchy  $F(t)$ , což doplněk k pravděpodobnosti bezporuchového provozu a je dán vztahem: [29]

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (13)$$

Pokud by byl systém reprezentován výstupem hradla OR a skládal se se  $n$  nezávislých vstupních hradel, byl by vyjádřen vztahem:

$$F_s(t) = 1 - [1 - F_1(t)] * [1 - F_2(t)] * [1 - F_3(t)] * \dots [1 - F_i(t)] * \dots [1 - F_n(t)] \quad (14)$$

Stručně řečeno, systém má poruchu v případě, že má poruchu jakákoliv jeho součást. Příkladem hradla obr je obr. č. 13:



Obrázek 13 - Sériová konfigurace [29]

#### 4.3.4 Paralelní konfigurace systému

Pokud Výstupní událost hradla nastane za předpokladu, že nastaly všechny nezávislé přispívající události na vstupu hradla, jsou tyto události spojovány hradlem AND. Výhodou této konfigurace je, že je možné ji zálohovat. Ve vztahu k analýze bezporuchovosti lze mluvit o tzv. paralelním systému,

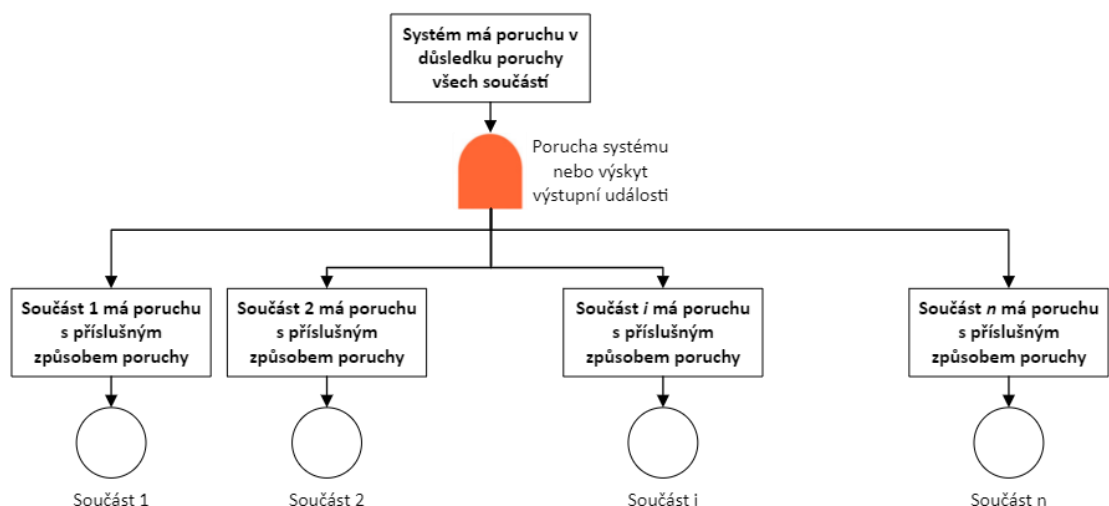
Matematicky lze tento výraz pro pravděpodobnost bezporuchového provozu vyjádřit způsobem, že systém je provozuschopný za předpokladu, že součást 1 či součást 2 nebo jakákoliv z jiných součástí, nejméně jedna z nich, zůstává provozuschopná. Jinak řečeno, pokud mají všechny jeho součásti poruchu, má poruchu i celý systém a je vyjádřen vztahem: [29]

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (15)$$

V analýze stromu poruch je tento typ logiky vyjádřen hradlem AND, které má „n“ událostí či hradel na vstupu s významem, že se systém nachází v poruchovém stavu za předpokladu, že součást 1 i, součást 2 i a všechny ostatní součásti mají poruchu, s obdobným matematickým vyjádřením. Pravděpodobnost poruchy je pak dána vztahem: [29]


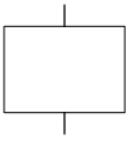



$$F_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [F_i(t)] \quad (16)$$

Stručněji řečeno, pro úspěšný provoz je tedy dostatečné, aby byla ve funkčním stavu pouze jedna součást, nebo má systém poruchu v případě, že jsou porouchány všechny součásti viz obr. č. 14: [29]



Obrázek 14 - Paralelní konfigurace [29]

### 4.3.5 Použité značky

Značka	Název a popis
	Blok s názvem nebo popisem vrcholové události
	Blok s názvem nebo popisem události
	Základní událost
	Hradlo AND - událost nastane jen tehdy, pokud současně nastanou všechny události
	Hradlo OR - událost nastane tehdy, pokud nastane kterákoliv událost

Tabulka 4 - Použité značky [29]

## 4.4 FMEA

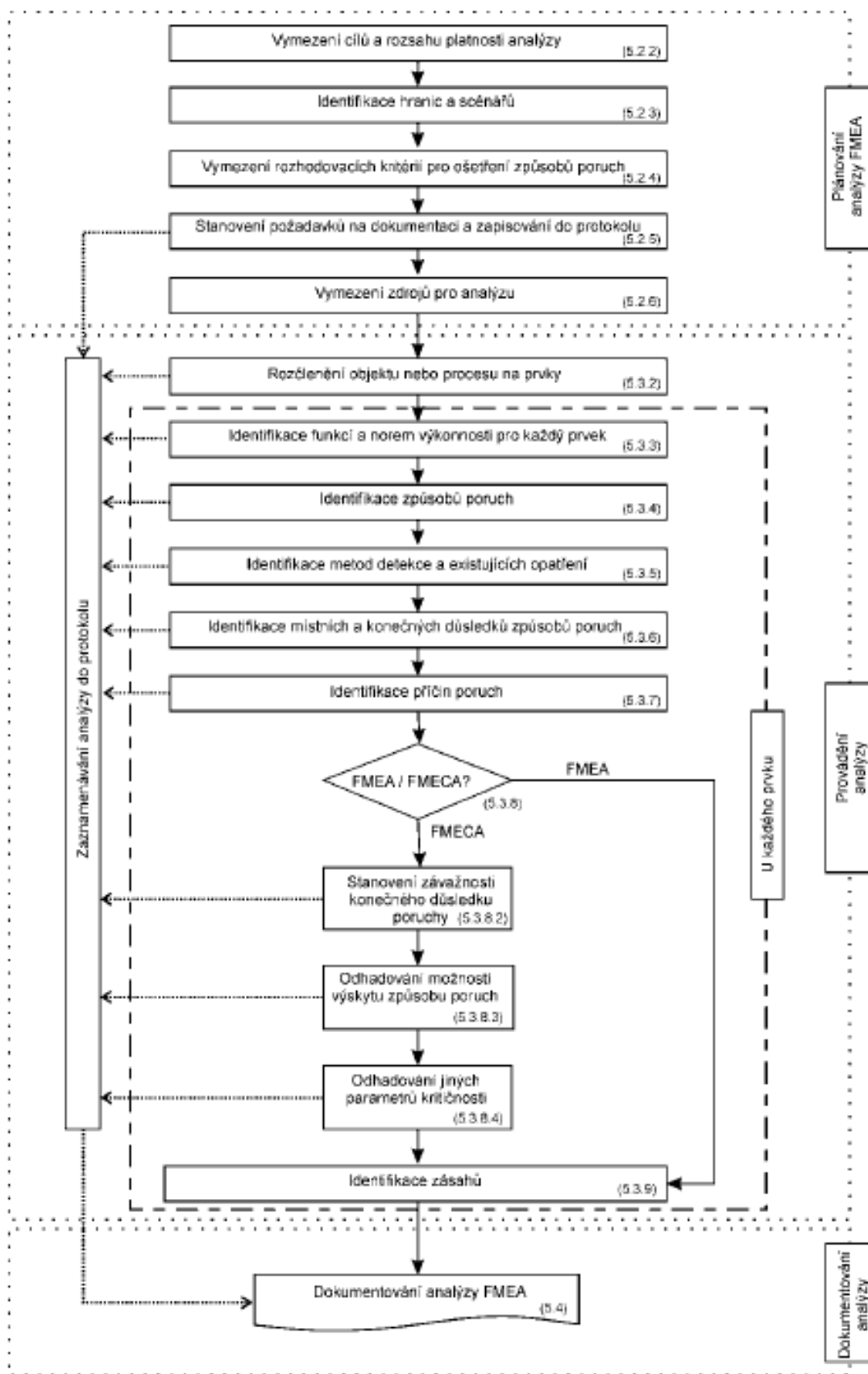
Jedná se o systematickou metodu hodnocení procesu nebo objektu, která má za cíl identifikovat způsoby, kterými by potenciálně mohl objekt porouchat a zároveň určit důsledky těchto poruch na spolehlivost nebo výkonnost procesu nebo objektu a na okolní prostředí a pracovníky. Provedení FMEA analýzy je za účelem zlepšení výstupů podpořením rozhodnutí, jež snižují možnost výskytů poruch a jejich důsledků. Tím lze docílit z hlediska spolehlivosti systému zlepšením bezporuchovosti a snížením nákladů na provoz. Hlavní výhodou FMEA je její schopnost přizpůsobení se jakémukoliv průmyslovému odvětví. Další výhodou je její provedení v jakémkoliv průběhu života stejného objektu či procesu. Během časných etap plánování a návrhu lze FMEA použít jako předběžnou analýzu následovanou podrobnější analýzou, doplněnou o více informací. Lze do ní zakomponovat stávající nebo doporučená opatření, které lze využít k redukci možnosti vyskytnutí nějakého způsobu poruchy nebo jeho důsledku. [24]

Důvody pro provedení analýzy FMEA mohou být následující:

- Identifikace poruch, které mají nežádoucí důsledky pro provoz systému (zhoršují nebo dokonce znemožňují provoz)
- Zlepšení návrhu a vývoje procesu nebo objektu včasným zásahem v programu vývoje
- Poskytnout informace pro jiné analýzy spolehlivosti
- Identifikace rizika jako součást managementu rizik [24]

Provádění analýzy FMEA zahrnuje 3 etapy, a to plánování, provádění a dokumentování. Nejčastěji se tyto činnosti provádějí následně, nicméně však mohou existovat iterace, neboli postupně se opakované činnosti. Příkladem může být provedení během vývojového programu nebo během změny objektu, který je analyzován. Provedení FMEA by mělo být v souladu s platnou legislativou v rámci rozsahu platnosti. [24]

Na obr. 15 je vyobrazen vývojový diagram činností které analýza FMEA zahrnuje:



Obrázek 15 - Vývojový diagram činností FMEA [24]

#### 4.4.1 Analýza kritičnosti

Tyto analýzy stanovují prostředky pro stanovení priorit způsobů poruch. Metody popsané v této diplomové práci jsou pouze takové, ve kterých jsou kombinovány ukazatele pro tyto parametry: pravděpodobnost výskytu poruchy, dopad poruchy a v případě čísla priority rizika i pravděpodobnost odhalení poruchy. Parametry mohou být vyjádřeny kvalitativně a kvantitativně. Body na měřících stupnicích se označují na základě použití. Pro kvalitativní analýzu odpovídají popisným třídám a pro kvalitativní analýzu bodovým odhadům. Tyto stupnice by měly být vymezeny od nejzávažnějšího po nejmíň škodlivý dopad a od nejvyšší po nejnižší pravděpodobnost výskytu. Body na těchto stupnicích by měly mít přesné a jasné vymezení, aby byla zajištěna konzistence a srozumitelnost pro soby, které analýzu provádějí. [24]

Kvalitativní parametry lze definovat za pomoci popisných kategorií vyobrazených na obr. 16, v tzv. matici kritičnosti.

		Závažnost			
		Katastrofická	Velká	Okrajová	Malá
Možnost výskytu	Vysoká	X	X	1	2
	Střední	X	X	1	2
	Nizká	X	X	1	2
	Velmi nízká	X	1	1	2
	Velmi slabá	1	2	2	3

Obrázek 16 - Matice kritičnosti [24]

V analýze s použitím matice kritičnosti bývá stanovena míra významnosti kombinací hodnot pro pravděpodobnost výskytu a závažnosti. Tato matice je rovněž známá jako matice rizik. Z ilustrace je patrné, že hodnoty pro každý parametr jsou formovány do matice a stupeň kritičnosti je rozvržen do každé buňky vně matice. [24]

Druhou možností vyjádření parametrů je kvantitativní způsob, a to posouzení kritičnosti pomocí čísla priority rizika (RPN). Toto číslo je vyjádřeno součinem hodnot pro dopad, pravděpodobnost výskytu a pravděpodobnost odhalení a matematicky je vyjádřen vztahem:

$$RPN = P * D * O \quad (17)$$

kde:

RPN – číslo priority rizika (risk priority number)

P – pravděpodobnost výskytu

D – dopad

O – pravděpodobnost odhalení

Rozsah hodnot RPN je závislý na měřících stupnicích, pro tyto tři parametry, které obvykle nabývají hodnot od 1 do 10. Celkové hodnoty RPN jsou tedy v rozpětí od 1 do 1000. [24]

#### **4.4.2 Kombinace analýz FTA a FMEA**

Nejčastěji se tato kombinace analýz využívá v bezpečnostních a dopravních normách. Mezi největší přínosy této kombinace patří:

- Zvýšení efektivity obou metod
- Výsledky analýzy FMEA mohou vést k identifikaci základních událostí pro analýzu FTA
- Každá jednobodová porucha (porucha způsobující poruchu celého systému) v analýze FTA by se měla objevit v analýze FMEA.
- doplnění FMEA uvažující pouze nezávislými poruchami o vzájemnou závislost poruchových událostí, jako je pořadí, podmíněná pravděpodobnost a výlučnost výskytu nebo poruchy se společnou příčinou.
- FMEA je analýza zdola nahoru zatímco FMEA shora dolů a použití jak induktivního, tak deduktivního zdůvodnění je považováno za dobrý argument při poskytování důvěry.

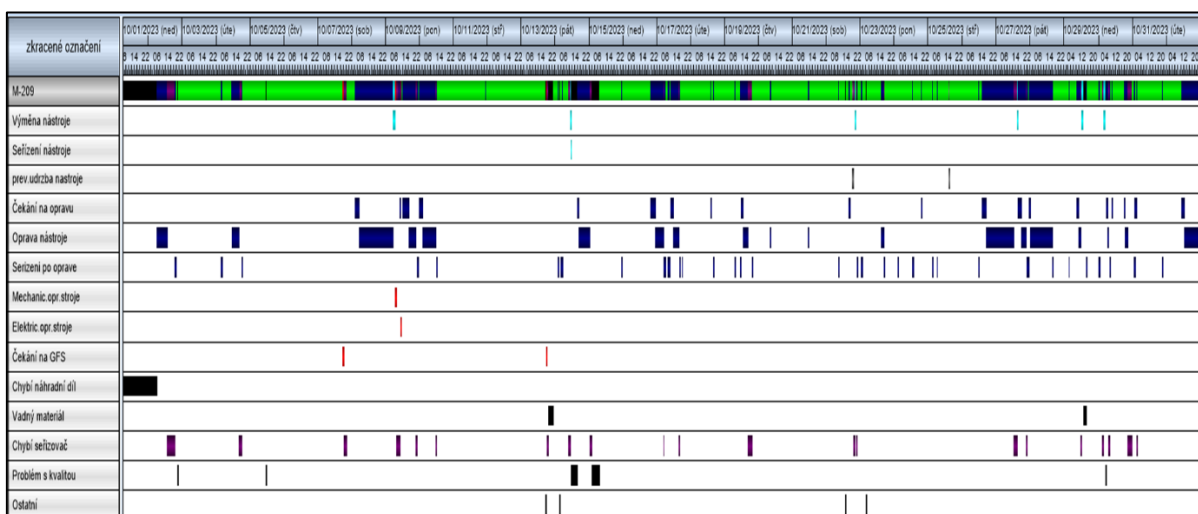
Význam této konsistenční kontroly se rapidně zvyšuje, jsou-li tyto analýzy prováděny nezávisle na sobě. [24]

## 5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ / DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Tato kapitola obsahuje popis řešení spolehlivosti ve vybrané výrobní společnosti. Zkoumaným objektem byl vstřikolis vyrábějící plastové součástky pro automobilový průmysl. Jelikož automobilový průmysl podléhá přísným kvalitativním normám a zároveň klade důraz na co nejlevnější výrobu, management firmy tedy usiluje o co nejlépe nastavené výrobní procesy s co nejmenšími prostoji.

### 5.1 ANALÝZA DAT

Nejprve bylo nutné získat data a tyto data detailně analyzovat. Data byla získána ze softwaru MES HYDRA X®, který se používá v mnoha výrobních firmách zaměřených nejen na automobilový průmysl. Prvním analyzovaným časovým obdobím výroby byl měsíc říjen 2023. Na obr. 17 je znázorněna časová osa celého měsíce a jednotlivé eskalace, které během zkoumaného období narušily stav provozu.



Obrázek 17 - Časová osa – říjen 2023 (vlastní)

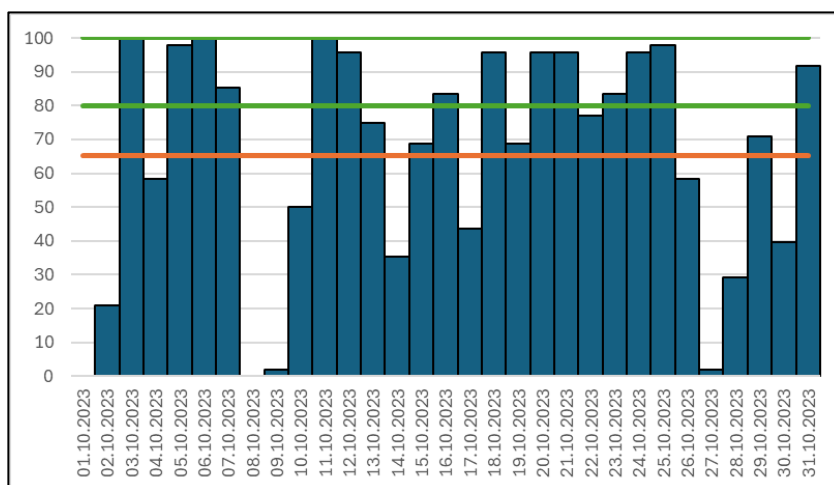
Z ilustrace je patrné, že časová je pro další výpočty nedostatečná, jelikož neobsahuje číselné hodnoty, které jsou pro následující výpočty nezbytné. Proto bylo za potřebí tuto analýzu zpřesnit a jednotlivé časové údaje vyčíslit. Údaje byly analyzovány a zapsány do tabulky č. 5.



Datum	Výroba	Výměna nástroje	Čekání na opravu	Oprava nástroje	Seřízení po opravě	Preventivní údržba	Mechanic. oprava stroje	Elektric. oprava stroje	Čekání na GFS	Chybí náhradní díl	Vadný materiál	Chybí seřizovač	Problém s kvalitou	Ostatní	Výkon
01.10.2023	0									24					0,00
02.10.2023	5			8	1					4		3,5	2,5		20,83
03.10.2023	24												0		100,00
04.10.2023	14			6	2,5							1,5			58,33
05.10.2023	23,5												0,5		97,92
06.10.2023	24														100,00
07.10.2023	20,5								1			2,5			85,42
08.10.2023	0		3	21											0,00
09.10.2023	0,5	1,5		8	8,5	1		1	0,5			3			2,08
10.10.2023	12		1,5	9,5	0,5							0,5			50,00
11.10.2023	24														100,00
12.10.2023	23		1												95,83
13.10.2023	18								0,5		4	1		0,5	75,00
14.10.2023	8,5	0,5	1	8	1							1,5	3	0,5	35,42
15.10.2023	16,5				0,5							2	5		68,75
16.10.2023	20		2	2											83,33
17.10.2023	10,5		3	7	2,5							1			43,75
18.10.2023	23		0,5		0,5										95,83
19.10.2023	16,5		1,5	2,5	0,5							3			68,75
20.10.2023	23			1											95,83
21.10.2023	23			1											95,83
22.10.2023	18,5	0,5	1		1	1						1,5		0,5	77,08
23.10.2023	20			2	1							0,5		0,5	83,33
24.10.2023	23		0,5		0,5										95,83
25.10.2023	23,5					0,5									97,92
26.10.2023	14		2	7	1										58,33
27.10.2023	0,5	0,5	3	16,5	1							2,5			2,08
28.10.2023	7			16,5	0,5										29,17
29.10.2023	17	1,5	1	1,5	1						1,5	0,5			70,83
30.10.2023	9,5	1,5	2	3	2,5							5		0,5	39,58
31.10.2023	22		0,5	0,5	1										91,67
Celkem	484,5	6	31,5	121,5	19,5	1,5	1	0,5	1,5	28	5,5	29,5	11	2,5	65,12

Tabulka 5 – tabulka hodnot – říjen 2023 (vlastní)

Z tabulky je možné vyčíst časové údaje o výrobě během jednotlivých dnů daného měsíce. Díky těmto časovým údajům lze rozlišit, jakou míru vlivu mají jednotlivé eskalace na celkový provozuschopný stav. Po tomto vyčíslení bylo možné určit výkon stroje za jednotlivé dny v tomto měsíci a tyto hodnoty použít k výpočtu průměrného výkonu za konkrétní měsíc. Celkový zkoumaný čas činil 744 hodin, z toho výroba probíhala 484,5 hodin. Čas poruchy byl vyčíslen na 259,5 hodin. Tyto údaje budou velmi důležité k výpočtu ukazatelů spolehlivosti jako je pravděpodobnost bezporuchového stavu a poruchy a také intenzity poruch.

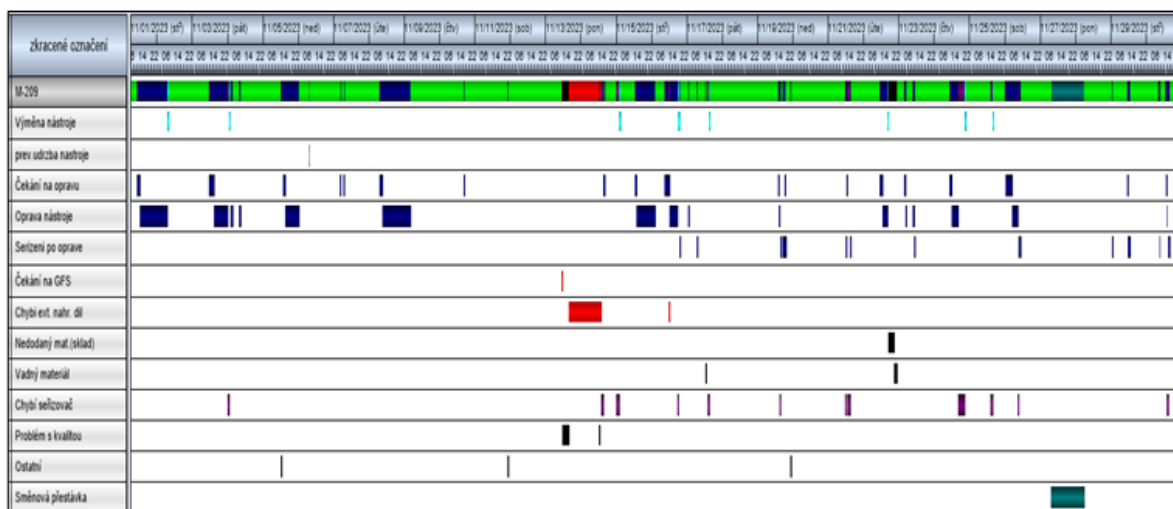


Obrázek 18 - průměrný výkon - říjen 2023 (vlastní)

Optimální procentuální výkon by se měl pohybovat v intervalu 80-100 %. Hodnota průměrného výkonu však v měsíci říjnu byla pouze 65,12 % a proto bylo nutné zahájit proces zvyšování spolehlivosti výroby na tomto konkrétním stroji.

Na základě této analýzy bylo možné přejít k plánování akutních opatření, které lze vykonat instantně pro krátkodobé zvýšení výkonu. Tyto opatření budou popsána v dalších částech této práce. Pro dlouhodobé opatření jsou následující data nevhodná, jelikož je potřeba vlastnit větší vzorek dat, neboť každý nepřesný zásah do stávajícího výrobního procesu by mohl mít cenově i výkonnostně neblahé následky.

Obdobným způsobem byla analyzována data z následujících měsíců, a to listopadu a prosince 2023. Nejprve byla z programu MES HYDRA X<sup>®</sup> získána časová osa, jejíž časové údaje byly zaneseny do tabulky stejně jako to bylo s časovými údaji měsíce října.



Obrázek 19 - Časová osa - listopad 2023 (vlastní)

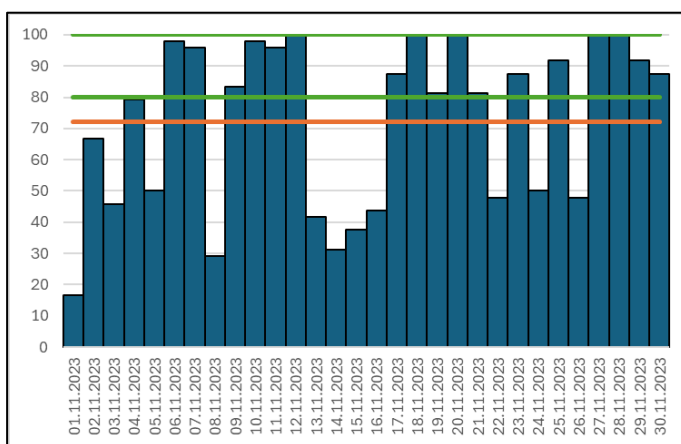
Na základě údajů z měsíce listopadu se potvrdilo, že pro provedení dlouhodobého opatření je nejvýhodnější mít co nejrozsáhlejší portfolio dat, jelikož některé eskalace vyskytující se v měsíci říjnu jsou odlišné od eskalací za měsíc listopad. V každém z těchto měsíců je například pozastavena výroba z důvodu chybějícího dílu, ovšem tyto díly jsou odlišného charakteru. Kdyby bylo provedeno opatření pouze na základě dat z měsíce října, je možné že by se tato akce nemusela firmě vyplatit.

Datum	Výroba	Výměna nástroje	Čekání na opravu	Oprava nástroje	Seřízení po opravě	Preventivní údržba	Nedodaný materiál	Čekání na GFS	Chybí ext. náhradní díl	Vadný materiál	Chybí seřizovač	Problém s kvalitou	Ostatní	Výkon
01.11.2023	4		1,5	18,5										16,67
02.11.2023	16	1,5		6,5										66,67
03.11.2023	11		2,5	10,5										45,83
04.11.2023	19		1	3,5							0,5			79,17
05.11.2023	12		1	10,5									0,5	50,00
06.11.2023	23,5					0,5								97,92
07.11.2023	23		1											95,83
08.11.2023	7		1,5	15,5										29,17
09.11.2023	20			4										83,33
10.11.2023	23,5		0,5											97,92
11.11.2023	23		0,5										0,5	95,83
12.11.2023	24													100,00
13.11.2023	10							0,5	9,5			4		41,67
14.11.2023	7,5		1						13,5		1,5	0,5		31,25
15.11.2023	9	1	1	11							2			37,50
16.11.2023	10,5	1	2	9	0,5				0,5		0,5			43,75
17.11.2023	21	0,5			1					0,5		1		87,50
18.11.2023	24													100,00
19.11.2023	19,5		1	1	1,5						0,5		0,5	81,25
20.11.2023	24													100,00
21.11.2023	19,5		0,5		1						3			81,25
22.11.2023	11,5	0,5	2	3			7							47,92
23.11.2023	21		1,5	1	0,5									87,50
24.11.2023	12	1	1	5							5			50,00
25.11.2023	22	0,5									1,5			91,67
26.11.2023	11,5		5	5	2						0,5			47,92
27.11.2023	7													100,00
28.11.2023	18													100,00
29.11.2023	22			0,5	1,5									91,67
30.11.2023	21		0,5	1							0,5	0,5	0,5	87,5
Celkem	497	6	25	105,5	8	0,5	7	0,5	23,5	0,5	15,5	6	2	72,22

Tabulka 6 - tabulka hodnot – listopad 2023 (vlastní)

Dalším důležitým ukazatelem po zaznačení hodnot do tabulky a spočítáním průměrného výkonu bylo, že došlo k lehkému zvýšení, čili odhadem lze konstatovat, že akutní opatření neměly negativní vliv na výrobní proces. Toto konstatování však musí být podloženo statistickými metodami, které budou použity pro ověření účinnosti těchto opatření v dalších kapitolách. Tyto konkrétní časové hodnoty lze vyčíst z tabulky č. 6. Celkový zkoumaný čas tohoto měsíce činil 697 hodin, čas výroby trval 497 hodin a poruchový stav byl vyčíslen na rovných 200 hodin.

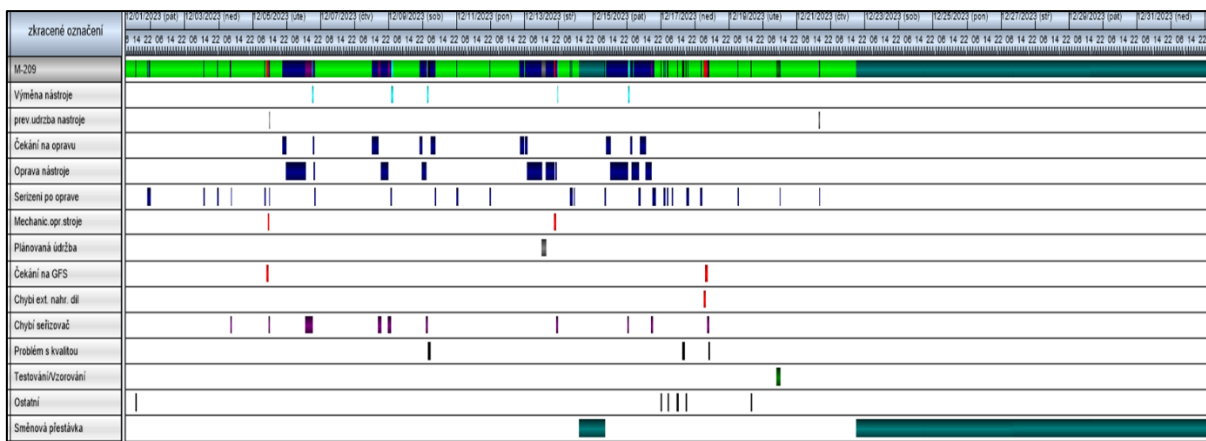
Obrázek č. 20 stejně jako obrázek. č. 19 vyobrazuje výkony jednotlivých dnů a celkový výkon měsíce listopad.



Obrázek 20 - průměrný výkon – listopad 2023 (vlastní)

Listopadová hodnota průměrného výkonu činila 72,22 %. V porovnání s předchozím měsícem dochází k nárustu o 7,1 %, nicméně stále se jedná o neoptimální hodnotu a vzhledem ke stále málo rozsáhlému portfoliu dat nelze udělat konkrétní závěr.

Dalším analyzovaným časovým obdobím byl měsíc prosinec. Z důvodu vánočních svátků výroba probíhala pouze do 21. dne tohoto měsíce, což může být bráno jako indispozice. Proto by bylo vhodnější na tyto data pohlížet spíše společně s daty minulého měsíce. Obr. 21 vyobrazuje časovou osu za měsíc prosinec 2023. Díky údajům z tohoto měsíce už však bude dostatečné množství informací k plánování opatření ke zvýšení spolehlivosti výrobního procesu.



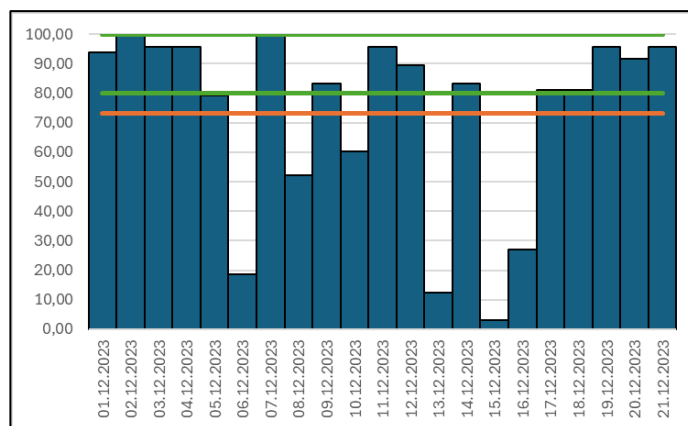
Obrázek 21 - Časová osa – prosinec 2023 (vlastní)

Následoval obdobný postup jako u minulých dvou měsíců, a to jednotlivé časové intervaly zanást do tabulky. Celkový zkoumaný prosincový čas trval pouze 483,5 hodin z důvodu zmíněného výše, a to pozastavení výroby během vánočních svátků. Doba výroby činila z tohoto období 358,5 hodin a poruchový stav trval dohromady 125 hodin.

Datum	Výroba	Výměna nástroje	Čekání na opravu	Oprava nástroje	Seřízení po opravě	Plánovaná údržba	Preventivní údržba	Mechanic. oprava stroje	Čekání na GFS	Chybí ext. náhradní díl	Testování/ vzorování	Chybí seřizovač	Problém s kvalitou	Ostatní	Výkon
01.12.2023	22,5				1									0,5	93,75
02.12.2023	24														100,00
03.12.2023	23				1										95,83
04.12.2023	23				0,5							0,5			95,83
05.12.2023	19		1		1			2	0,5			0,5			79,17
06.12.2023	4,5	0,5	1	11	2							5			18,75
07.12.2023	24														100,00
08.12.2023	12,5		3,5	4,5	1							2,5			52,08
09.12.2023	20	1,5	2									0,5			83,33
10.12.2023	14,5	0,5	2	4	0,5							1	1,5		60,42
11.12.2023	23				1										95,83
12.12.2023	21,5		2,5												89,58
13.12.2023	3		1	14,5	0,5	3		1				1			12,50
14.12.2023	10	0,5			1										83,33
15.12.2023	0,5		2	13,5											3,13
16.12.2023	6,5	1	4	9,5	1,5							1,5			27,08
17.12.2023	19,5				2,5								1	1	81,25
18.12.2023	19,5				0,5				1	1,5		1	0,5		81,25
19.12.2023	23				0,5									0,5	95,83
20.12.2023	22				0,5						1,5				91,67
21.12.2023	23				0,5		0,5								95,83
Celkem	358,5	4	19	57	15,5	3	0,5	3	1,5	1,5	1,5	13,5	3	2	73,16

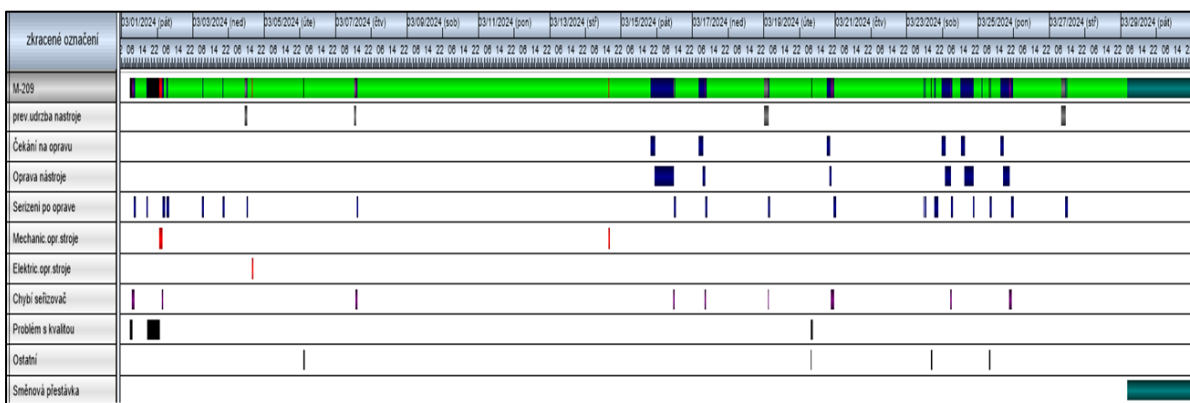
Tabulka 7 - tabulka hodnot – prosinec 2023 (vlastní)

Z této tabulky (č. 7) taktéž vyplývá, že průměrný výkon za měsíc prosinec činil 73,16 %. Hodnota výkonů za listopad a prosinec je velmi podobná, tudíž je možné učinit závěr, že akutní opatření neměly negativní dopad na výrobní proces. Stále se však tato hodnota průměrného výkonu nenachází v požadovaném intervalu a bylo tedy nezbytné přejít k plánování dlouhodobých opatření. Graf výkonu za měsíc prosinec je znázorněn níže (obr. č. 22).



Obrázek 22 - průměrný výkon – prosinec 2023 (vlastní)

Posledním analyzovaným měsícem byl březen 2024, což byl měsíc ve kterém probíhala výroba po zavedení všech opatření. Jeho časová osa je vyobrazena na obr. č. 23.



Obrázek 23 - časová osa - březen 2024 (vlastní)

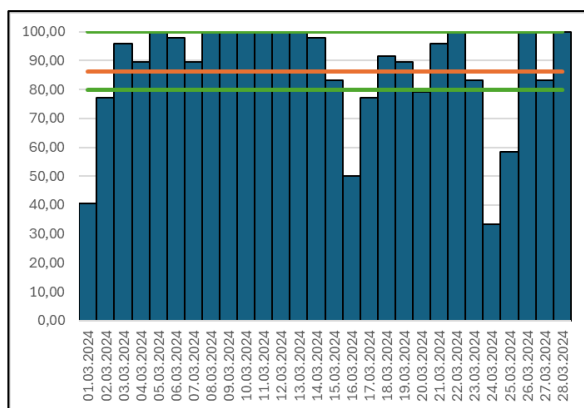
Obdobným způsobem jako u předešlých měsíců byly hodnoty časů z časové osy vyčísleny do tabulky č. 8. Celkový pozorovaný čas činil 664 hodin, z toho doba výroby činila 576 hodin a poruchový stav stroje činil 88 hodin.

Datum	Výroba	Čekání na opravu	Oprava nástroje	Seřízení po opravě	Mechanic. oprava stroje	Elektric. oprava stroje	Preventivní údržba	Chybi seřizovač	Problém s kvalitou	Ostatní	Výkon
01.03.2024	6,5			1				1,5	7		40,63
02.03.2024	18,5			1	3			0,5	1		77,08
03.03.2024	23			1							95,83
04.03.2024	21,5			0,5		0,5	1,5				89,58
05.03.2024	24										100,00
06.03.2024	23,5									0,5	97,92
07.03.2024	21,5			0,5			1	1			89,58
08.03.2024	24										100,00
09.03.2024	24										100,00
10.03.2024	24										100,00
11.03.2024	24										100,00
12.03.2024	24										100,00
13.03.2024	24										100,00
14.03.2024	23,5				0,5						97,92
15.03.2024	20		1,5	2,5							83,33
16.03.2024	12		11	0,5				0,5			50,00
17.03.2024	18,5	2,5	1,5	1						0,5	77,08
18.03.2024	22						2				91,67
19.03.2024	21,5			0,5			1,5	0,5			89,58
20.03.2024	19	1,5	1,5					1,5		0,5	79,17
21.03.2024	23			0,5				0,5			95,83
22.03.2024	24										100,00
23.03.2024	20	1		2,5						0,5	83,33
24.03.2024	8	3	11	1,5				0,5			33,33
25.03.2024	14	1,5	3,5	2,5				2		0,5	58,33
26.03.2024	24										100,00
27.03.2024	20			1			3				83,33
28.03.2024	24										100,00
Celkem	576	9,5	30	16,5	3,5	0,5	9	8,5	8	2,5	86,20

Tabulka 8 - tabulka hodnot - březen 2024 (vlastní)

Z tabulky je možné vypočítat, že průměrný výkon činil 86,20 %. Jedná se o hodnotu výkonu, která což odpovídá hodnotě v požadovaném intervalu. Odhadem lze tedy říct, že opatření měla pozitivní dopad na výrobní čas. Jedná se však pouze o odhad a je nutné tento odhad ověřit

statisticky a také metodami analýz spolehlivosti. Provedená opatření budou popsána v dalších částech této diplomové práce. Na obr. č. 24 je vyobrazen graf průměrného výkonu.

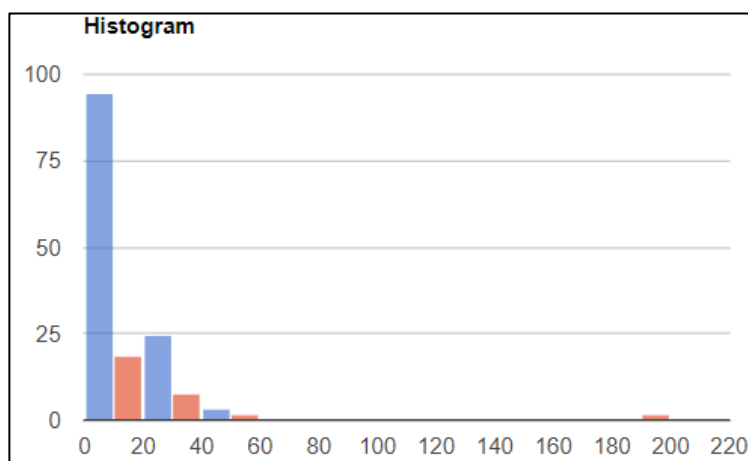


Obrázek 24 - průměrný výkon - březen 2024 (vlastní)

Velmi pozitivním ukazatelem je také skutečnost, že výkon stroje neklesl během žádného dne pod 40 %, z čehož lze usoudit, že opatření měla vliv na dlouhodobé vyřazení stroje z provozu.

## 5.2 STATISTICKÉ OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI OPATŘENÍ

Na základě analýzy dat byla stanovena hypotéza, že provedená opatření byla účinná. Tuto hypotézu bylo však nutné statisticky ověřit. Pro analýzu byly zvoleny jednotlivé doby provozu do poruchy za měsíce před opatřeními a po opatřeních. Nejprve bylo ověřeno, zda tyto soubory dat sledují stejná rozdělení. Vzhledem k tomu, že po vytvoření histogramu (obr. 25) data nesledovala normální rozdělení, bylo nutné zvolit vhodný test. Modrou barvou je zde označen vzorek dat před opatřeními a červenou barvou vzorek dat po opatřeních. Pro tyto účely porovnání byl zvolen dvou výběrový Kolmogorov-Smirnov test.



Obrázek 25 - Histogram dob provozu (vlastní)

### 5.2.1 Kolmogorov-Smirnov test

Při testování statistických hypotéz se vždy porovnávají dvě hypotézy. První hypotézou, nulovou (testovanou) je ta, která se testuje a značí se obvykle  $H_0$ . Druhou hypotézou se rozumí alternativní hypotéza, obvykle se značí  $H_1$ . [40]

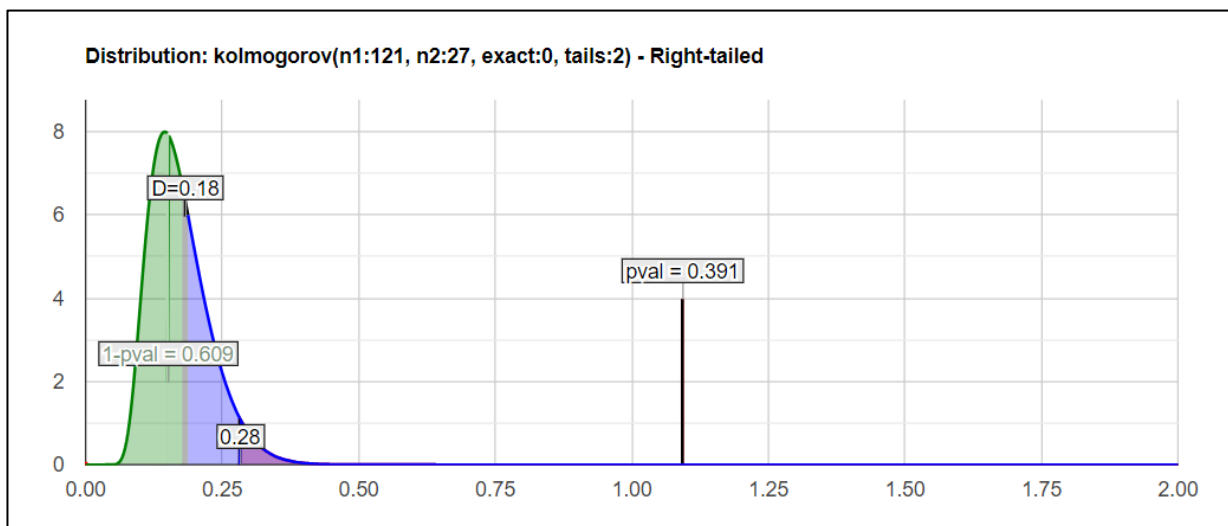
V tomto konkrétním případě jsou hypotézy:

- Testovaná hypotéza  $H_0$  – oba vzorky dat sledují stejné rozdělení
- Alternativní hypotéza  $H_1$  – oba vzorky dat sledují různá rozdělení
- Hladina významnosti  $\alpha = 0,05$

Dalším krokem bylo určení kritické hodnoty  $D_{max}$  pro danou hladinu významnosti. Počet vzorků datové sady  $n_1 = 121$  a  $n_2 = 27$ . Kritická hodnota pro  $\alpha = 0,05$  byla vypočítána pomocí vzorce [41]:

$$D_{max} = 1.36 \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 * n_2}} = 1.36 \sqrt{\frac{121 + 27}{121 * 27}} = 0,2894 \quad (18)$$

Poté byl proveden dvou výběrový test Kolmogorov-Smirnov (viz obr. 26).



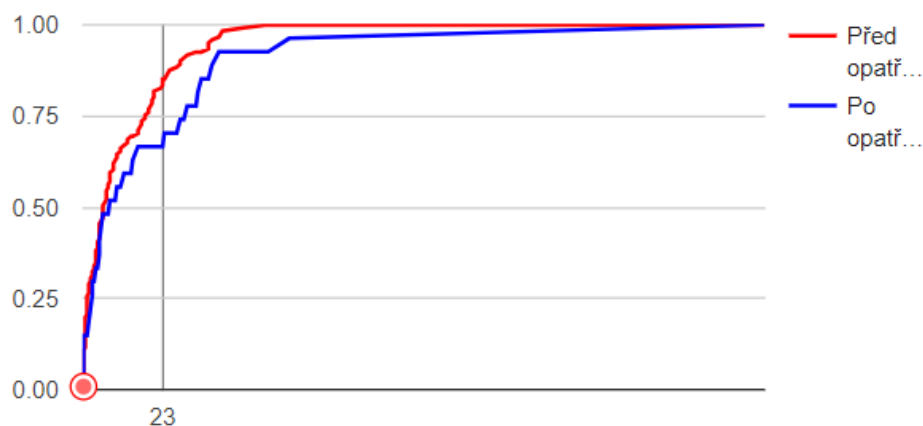
Obrázek 26 - Test Kolmogorov-Smirnov (vlastní)

Maximální vertikální rozdíl mezi těmito dvěma křivkami je  $D=0,1845$  a spadá do 95% oblasti přijatelnosti  $[0, 0,2894]$ . To znamená, že rozdíl mezi dvěma rozděleními není statisticky významný.



Hodnota  $p$  (0,39114) také potvrzuje, že nelze zamítnout nulovou hypotézu. Z toho plyne, že na základě testu Komlogorov-Smirnov data sledují stejné rozdělení.

Dále byl vytvořen graf kumulativní pravděpodobnosti (CDF), který zobrazuje provozní časy stroje před a po opatřeních (obr. č. 27). Na ose  $x$  jsou provozní časy a na ose  $y$  je kumulativní pravděpodobnost. Z grafu je patrné, že křivka pro data po opatřeních je pod křivkou dat před opatřeními. To naznačuje, že stroje měly tendenci selhávat dříve před zavedením opatření.



Obrázek 27 - graf kumulativních pravděpodobností CDF (vlastní)

### 5.2.2 Výpočet parametrů Weibullova rozdělení

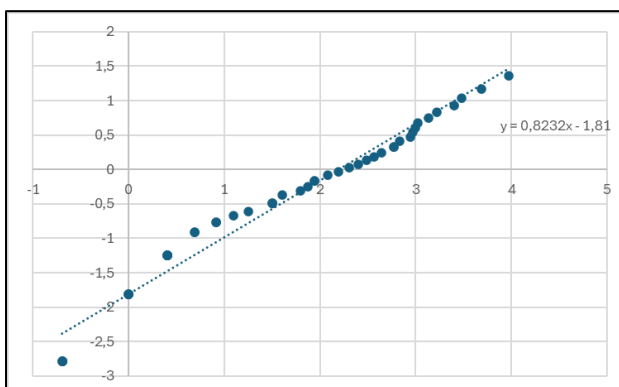
Nyní bylo možné určit rozdělení datové sady. Nejprve byl vytvořen histogram, který naznačil možnou shodu s Weibullovým rozdělením. Dále byl vytvořen Q-Q (kvantil-kvantilový) graf (obr. 28, 29, 30), ve kterém byly porovnány empirické kvantily dat s kvantily teoretického Weibullova rozdělení. Nejprve byla data seřazena vzestupně, bylo učeno jejich pořadí, spočítána kumulativní pravděpodobnost a následovaly výpočty přirozeného logaritmu dob provozu a výpočet logaritmické transformace kumulativní pravděpodobnosti. Následně byla provedena lineární regrese potřebná k odhadu parametrů Weibullova rozdělení, jimiž jsou  $k$  (tvar) a  $\lambda$  (měřítko). [42]

Porovnávanými objekty byly doby provozu za měsíc říjen, doby provozu za měsíc listopad a prosinec během kterých byla provedena akutní opatření a doby provozu za měsíc březen, před kterým byla provedena dlouhodobá opatření. Rovnice pro výpočet obou parametrů byly odvozeny z rovnice kumulativní distribuční funkce Weibullova rozdělení [42] :

$$F(x, k, \lambda) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (19)$$

### 5.2.3 Říjen

#### Q-Q graf



Obrázek 28 - Q-Q graf - říjen (vlastní)

#### Rovnice regresní přímky

$$y = 0,8232x - 1,81 \quad (20)$$

#### Tvarový parametr $k$

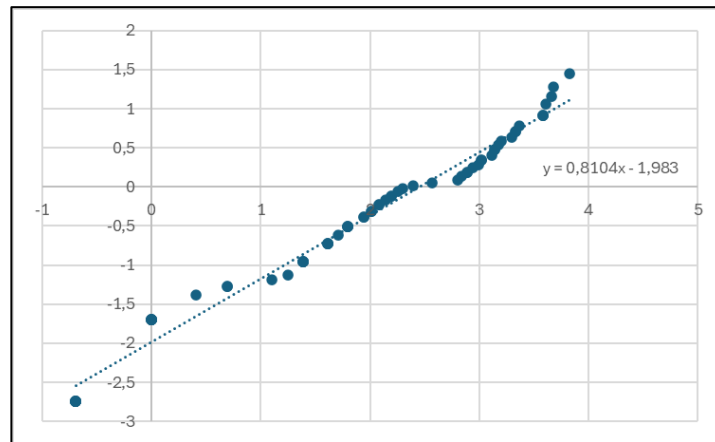
$$k = a = 0,8232 \quad (21)$$

#### Měřítkový parametr $\lambda$

$$\lambda = \exp\left(-\frac{b}{k}\right) = \exp\left(-\frac{-1,81}{0,8232}\right) = 9,012 \quad (22)$$

## 5.2.4 Listopad a prosinec

### Q-Q graf



Obrázek 29 - Q-Q graf - listopad a prosinec (vlastní)

### Rovnice regresní přímky

$$y = 0,8104x - 1,983 \quad (23)$$

### Tvarový parametr $k$

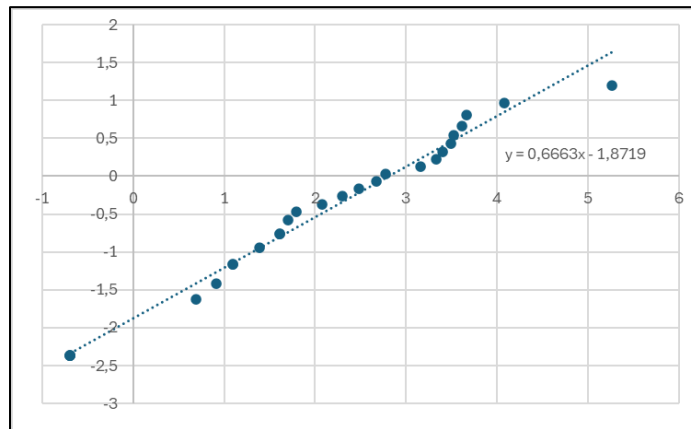
$$k = a = 0,8104 \quad (24)$$

### Měřtkový parametr $\lambda$

$$\lambda = \exp\left(-\frac{b}{k}\right) = \exp\left(-\frac{-1,983}{0,8104}\right) = 11,553 \quad (25)$$

## 5.2.5 Březen

### Q-Q graf



Obrázek 30 - Q-Q graf - březen (vlastní)

### Rovnice regresní přímky

$$y = 0,6663x - 1,8719 \quad (26)$$

### Tvarový parametr $k$

$$k = a = 0,6663 \quad (27)$$

### Měřítkový parametr $\lambda$

$$\lambda = \exp\left(-\frac{b}{k}\right) = \exp\left(-\frac{-1,8719}{0,6663}\right) = 16,609 \quad (28)$$

## 5.3 VÝPOČET UKAZATELŮ SPOLEHLIVOSTI

### 5.3.1 Říjen

#### *Pravděpodobnost bezporuchového provozu*

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = \frac{T_{pr}}{T} = \frac{484,5}{744} = 0,6512 \quad (29)$$

kde:

$T_{pr}$  – celkový čas provozu [hod]

$T$  – celkový čas [hod]

#### *Pravděpodobnost poruchy*

$$f(t) = 1 - R(t) = 0,3488 \quad (30)$$

kde:

$R(t)$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu

#### *Intenzita poruch*

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{0,3488}{0,6512} = 0,53562 \quad (31)$$

kde:

$R(t)$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu

$f(t)$  – pravděpodobnost poruchy

#### *Střední doba provozu do poruchy*

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{484,5}{49} = 9,88 \text{ hod} \quad (32)$$

kde:

$t_i$  – celková doba trvání provozu [hod]

$N$  – počet intervalů provozu

### **Střední doba poruch**

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{259,49}{49} = 5,29 \text{ hod} \quad (33)$$

kde:

$t_i$  – celkový doba trvání poruch [hod]

$N$  – počet poruch

### **5.3.2 Listopad**

#### **Pravděpodobnost bezporuchového provozu**

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = \frac{T_{pr}}{T} = \frac{497}{697} = 0,7131 \quad (34)$$

kde:

$T_{pr}$  – celkový čas provozu [hod]

$T$  – celkový čas [hod]

#### **Pravděpodobnost poruchy**

$$f(t) = 1 - R(t) = 0,2869 \quad (35)$$

kde:

$R(t)$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu

#### **Intenzita poruch**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{0,2869}{0,7131} = 0,4023 \quad (36)$$

kde:

$R(t)$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu

$f(t)$  – pravděpodobnost poruchy

### ***Střední doba provozu do poruchy***

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{497}{35} = 14,2 \text{ hod} \quad (37)$$

kde:

$t_i$  – celkový doba trvání provozu [hod]

$N$  – počet intervalů provozu

### ***Střední doba poruch***

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{200}{35} = 5,71 \text{ hod} \quad (38)$$

kde:

$t_i$  – celkový doba trvání poruch [hod]

$N$  – počet poruch

## **5.3.3 Prosinec**

### ***Pravděpodobnost bezporuchového provozu***

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = \frac{T_{pr}}{T} = \frac{358,5}{483,5} = 0,7415 \quad (39)$$

kde:

$T_{pr}$  – celkový čas provozu [hod]

$T$  – celkový čas [hod]

### ***Pravděpodobnost poruchy***

$$f(t) = 1 - R(t) = 0,2585 \quad (40)$$

kde:

$R(t)$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu

### **Intenzita poruch**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{0,2585}{0,7415} = 0,3486 \quad (41)$$

kde:

$R(t)$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu

$f(t)$  – pravděpodobnost poruchy

### **Střední doba provozu do poruchy**

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{358,5}{36} = 9,95 \text{ hod} \quad (42)$$

kde:

$t_i$  – celkový doba trvání provozu [hod]

$N$  – počet intervalů provozu

### **Střední doba poruch**

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{125}{35} = 3,57 \text{ hod} \quad (43)$$

kde:

$t_i$  – celkový doba trvání poruch [hod]

$N$  – počet poruch

## **5.3.4 Březen**

### **Pravděpodobnost bezporuchového provozu**

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = \frac{T_{pr}}{T} = \frac{576}{664} = 0,8675 \quad (44)$$

kde:

$T_{pr}$  – celkový čas provozu [hod]

$T$  – celkový čas [hod]



### **Pravděpodobnost poruchy**

$$f(t) = 1 - R(t) = 0,1325 \quad (45)$$

kde:

$R(t)$ – pravděpodobnost bezporuchového stavu

### **Intenzita poruch**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{0,1325}{0,8675} = 0,1527 \quad (46)$$

kde:

$R(t)$ – pravděpodobnost bezporuchového stavu

$f(t)$ – pravděpodobnost poruchy

### **Střední doba provozu do poruchy**

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{576}{27} = 21,33 \text{ hod} \quad (47)$$

kde:

$t_i$  – celkový doba trvání provozu [hod]

$N$ – počet intervalů provozu

### **Střední doba poruch**

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{88}{28} = 3,14 \text{ hod} \quad (48)$$

kde:

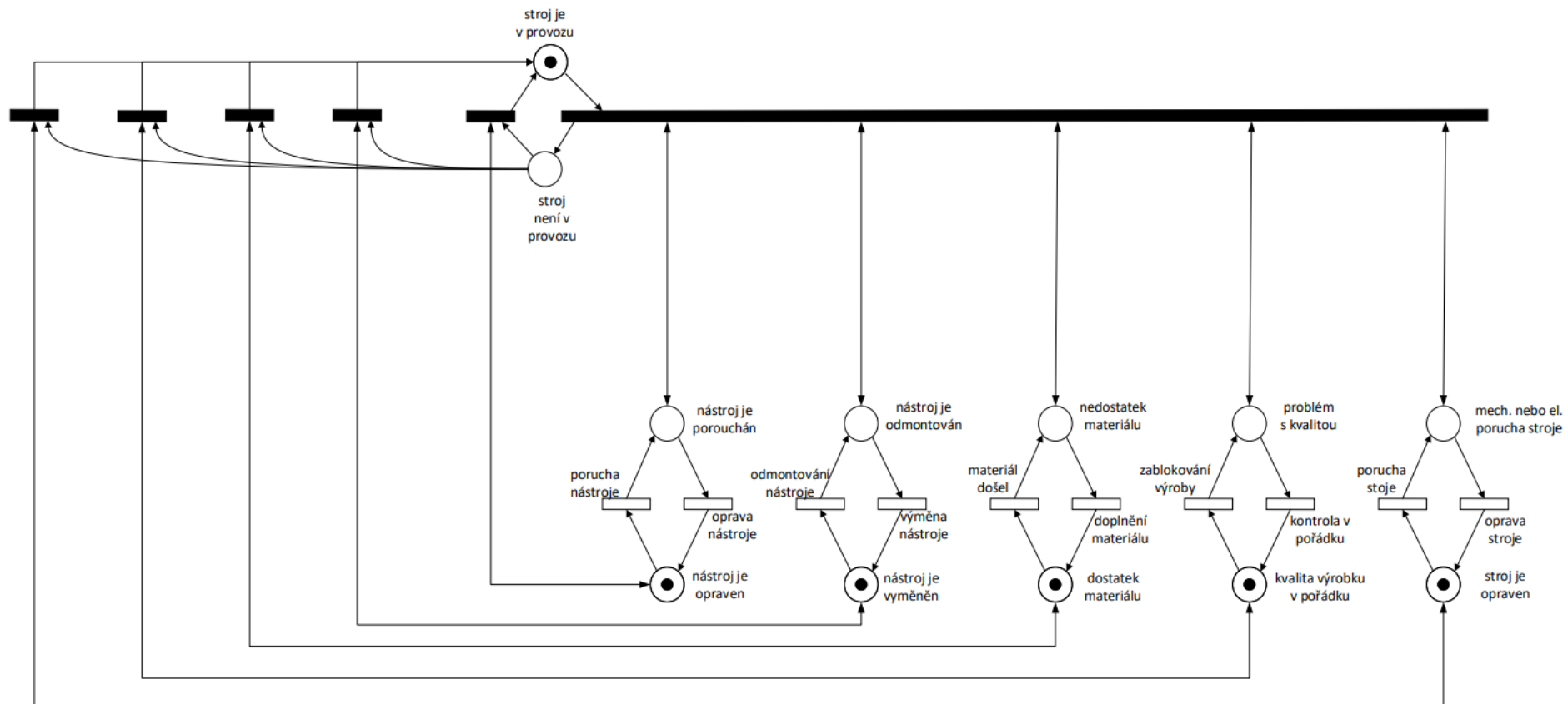
$t_i$  – celkový doba trvání poruch [hod]

$N$ – počet poruch

## **5.4 MODELOVÁNÍ PETRIHO SÍTĚMI**

Po analýze dat a spočítání jednotlivých ukazatelů spolehlivosti bylo dalším krokem modelování Petriho sítěmi. Tyto modely vychází z analýzy dat, která je popsána v kapitole 5.1. Metodologie modelování je dle normy ČSN EN 62551.

### 5.4.1 Globální struktura stroje

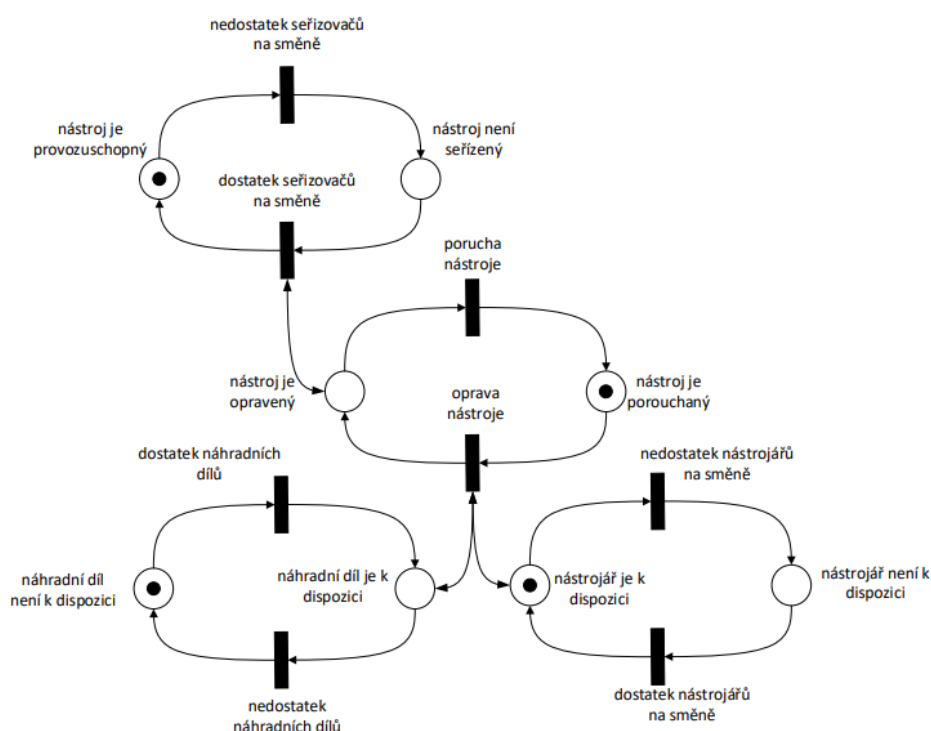


Obrázek 31 – Petriho síť – globální struktura stroje (vlastní)

Nejprve byl vymodelován globální systém stroje (obr. 31). Z modelu je patrné, že události vedoucí k poruše stroje se shodují s událostmi, které zapříčiní poruchový stav stroje. Tyto události byly zjištěny analýzou časové osy v kapitole 5.1. Z modelu je však také zřejmé, že model bude potřeba zpřesnit, jelikož není zřejmé jaká událost nebo skutečnost poruchový stav způsobí. V následujících podkapitolách bude provedeno detailní modelování jednotlivých částí systému.

## 5.4.2 Porucha nástroje

První modelovanou částí systému je porucha v nástroji. Ta může být způsobena například opotřebením (při pravidelném používání vede k opotřebení nástroje jehož důsledkem může být například eroze materiálu nebo deformace jeho povrchu). Dalším důvodem poruchy nástroje může být nesprávná údržba. Je důležité nástroj pravidelně kontrolovat, udržovat v provozuschopném stavu a v optimálních pracovních podmínkách. Situace, kdy k poruše dojde je znázorněna na obr. 32:



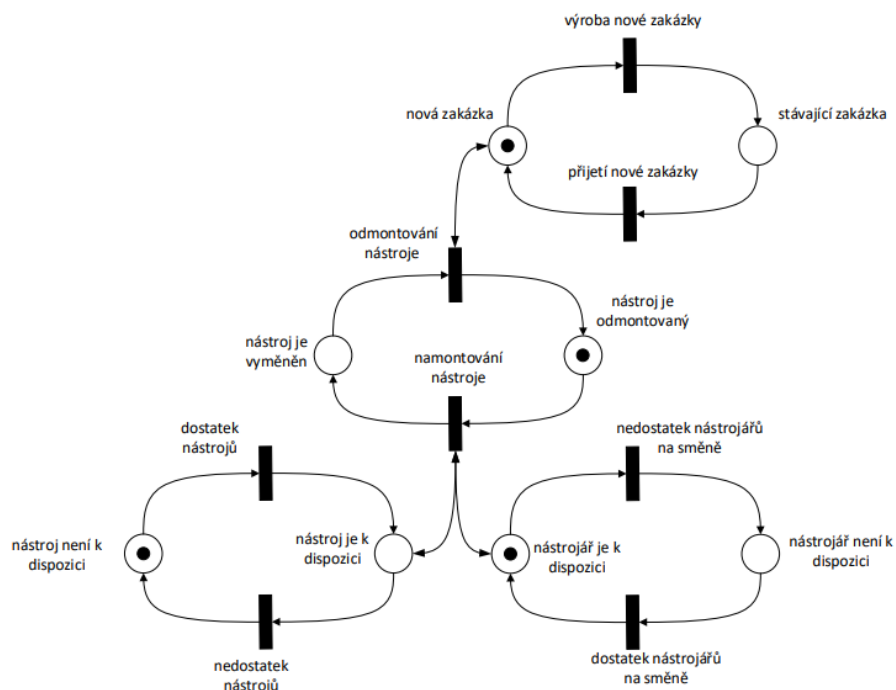
Obrázek 32 - Petriho síť – porucha nástroje (vlastní)

V případě poruchy formy je zapotřebí, aby byla opravena co nejrychleji a tím i uvedena do provozuschopného stavu. Primárně záleží na tom, zda je dostatek zkušených nástrojářů na směně, jelikož od toho se odvíjí nejen čas čekání na opravu, ale také čas samotné opravy. Dalším důležitým aspektem je také dostatek náhradních dílů k opravě. Mezi často poruchové díly patří například výstřelky, což jsou části formy které tvoří výstupní otvory pro plastový díl. Dalším dílem s velkou

poruchovostí jsou těsnění, která udržují tlakové prostředí uvnitř nástroje. Je důležité, aby toto těsnění bylo pravidelně kontrolováno a preventivně měněno, jelikož opotřebené těsnění může být zdrojem vad na výrobku a sníženou kvalitou dílů, které z hlediska spolehlivosti mohou vést k pozastavení výroby. V krajním případě může toto opotřebení vést až ke vzniku havárie nekontrolovatelným únikem plastu, při kterém v nejhorším případě může dojít ke zranění obsluhy stroje s důsledkem pozastavení výroby na dlouhý čas.

### 5.4.3 Výměna nástroje

K výměně nástroje nemusí dojít pouze z důvodu poruchy. Jednou z hlavních příčin výměny nástroje je také dokončení výroby jedné zakázky a započatí výroby zakázky jiné. V tomto případě záleží primárně na tom, zda daný díl už se někdy v minulosti ve firmě vyráběl. Pokud nikoliv, je nejprve nutné výrobu otestovat a zkontrolovat vzorky, zda odpovídají požadované kvalitě. Ten kdo se věnuje plánování výroby by měl toto testování naplánovat tak, aby co nejméně narušilo celkový výrobní proces. Jedním ze způsobů je testování na jiném stroji, kde se v daný čas nevyrábí žádná jiná zakázka. Situace, kdy dojde k výměně nástroje je vyobrazena na obr. č. 33.

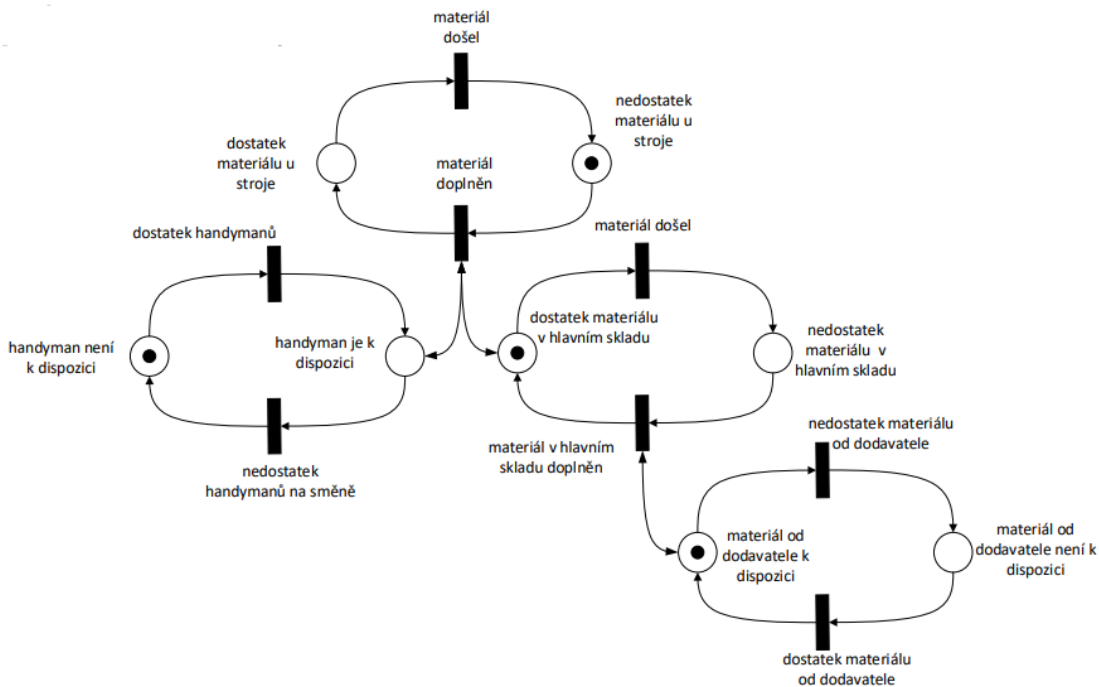


Obrázek 33 - Petriho síť – výměna nástroje (vlastní)

V případě, že se daná součást již v minulosti vyráběla, je nutné aby v době dokončení předchozí zakázky nástroj již připraven a zkontrolován, zda je provozuschopný. Rovněž je nutné, aby v tento daný čas bylo na směně dostatek zkušených nástrojářů k manipulaci a následnému namontování na stroj.

#### 5.4.4 Nedostatek materiálu

Dalším z možných důvodů způsobujících prodlevy ve výrobě je nedostatek materiálu. Tento jev však může nastat více způsoby, proto je důležité materiálovému plánování zvláštní pozornost. Model Petriho sítě je vykreslen na obr. č. 34. Z modelu je zřejmé, že musí být zajištěn dostatek materiálu jak během výroby tak i zásob materiálu v centrálním skladu. Proto je nutné mít k dispozici vždy bezpečnostní zásobu materiálu. V případě, že je splněna materiálová zásoba, je důležité zajistit aby byl materiál včas ze skladu doplněn. V medulu je možné si všimnout, že tuto funkci zastává zaměstnanec označen jako "handyman".



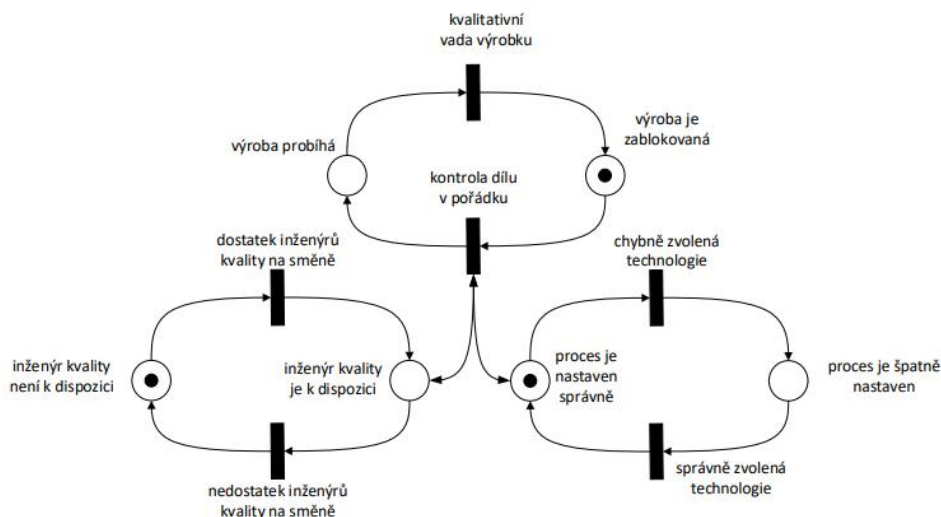
Obrázek 34 - Petriho síť – nedostatek materiálu (vlastní)

Dalším důležitým faktorem je výběr spolehlivých dodavatelů materiálu. To je možné zajistit dlouhodobými smlouvami či spoluprací s více dodavateli. Tyto opatření mohou snížit riziko výpadku materiálových dodávek.

Posledním faktorem z hlediska spolehlivosti je dobré předpovídání dodávky. To lze realizovat využitím historických a tržních dat pro přesné předpovědi poptávky a plánování zásob.

### 5.4.5 Problém s kvalitou

Dalším faktorem, který může mít velmi negativní dopad na spolehlivost výroby jsou kvalitativní problémy výrobků. Při řešení těchto problémů je nutné se nezaměřovat pouze na kvalitativní vady těchto výrobků, ale i na to, jaký mají vliv na celkovou spolehlivost výroby. Tento problém je vymodelován na obr. č. 35.



Obrázek 35 - Petriho síť – nedostatek materiálu (vlastní)

V případě, že nastane výroba většího počtu zmetků a následná reklamáce zákazníkem, dojde k zablokování této výroby a následnému prošetření oddělením kvality. To může výrobu pozdržet až na několik dnů, v závislosti na závažnosti dané vady. Nejen, že však nastanou prostoje výroby, ale také čas a zdroje věnované reklamaci mohou být lépe využity pro standardní výrobu.

Dalším faktorem při výrobě nekvalitních dílů mohou být velké ztráty materiálu. Ty vedou k vyšší míře odpadu, což zvyšuje spotřebu materiálu, která může vést až k nedostatku zásob. Inženýři kvality a plánovači výroby proto tyto problémy musí brát v potaz při řízení zásob materiálu.

Problém s kvalitou výrobku může mít však také negativní dopad na výkonnost strojů, jelikož mohou vést i k rychlejšímu opotřebení strojů a nástrojů. To může zapříčinit zvýšení údržby a oprav a tím i zvýšit dobu nečinnosti stroje.

Posledním zmíněným důsledkem opakujících se problémů vlivem špatné kvality výrobků může být pokles důvěry zákazníků a snížení poptávky po výrobcích, což může způsobit výpadky výroby a také zhoršit ekonomickou stabilitu výroby.

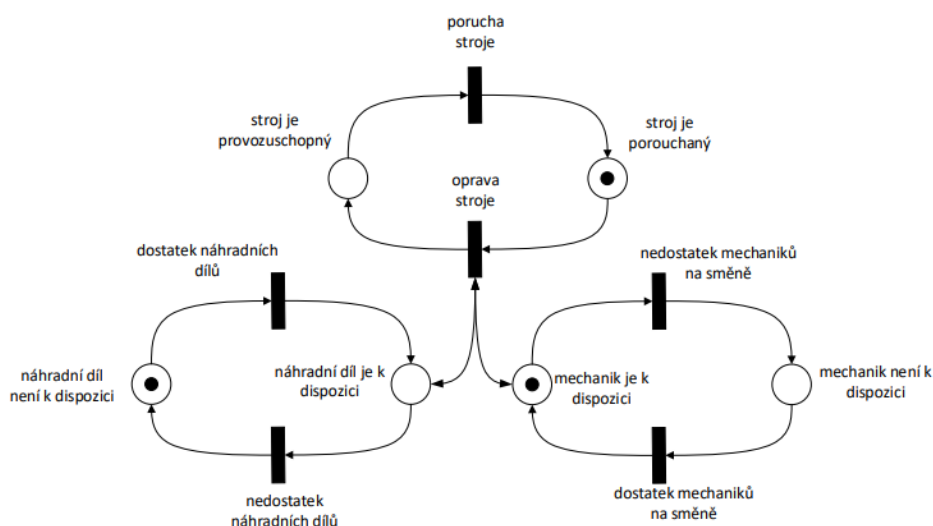
## 5.4.6 Opravy stroje

Posledním modelem Petriho sítě zmíněným v této práci je oprava stroje. Ty mohou být dvojího typu, a to pozitivní a negativní.

Mezi pozitivní opravy stroje lze zařadit například opravy prováděné za účelem prevence neplánovaných výpadků nebo optimalizace provozu (seřízení, kalibrace), což u strojů zlepšuje jejich efektivitu. Dalším pozitivním dopadem je prodloužení životnosti strojů. Pravidelné opravy a výměna opotřebovaných dílů snižují riziko časově náročných a nákladných výměn dílů a rovněž slouží jako prevence rozsáhlejších poruch, které by mohly výrazně narušit výrobní proces. V neposlední řadě je také nutné zmínit minimalizaci rizik nebezpečných poruch, které by mohli ohrozit bezpečnost pracovníků nebo pracovního prostředí.

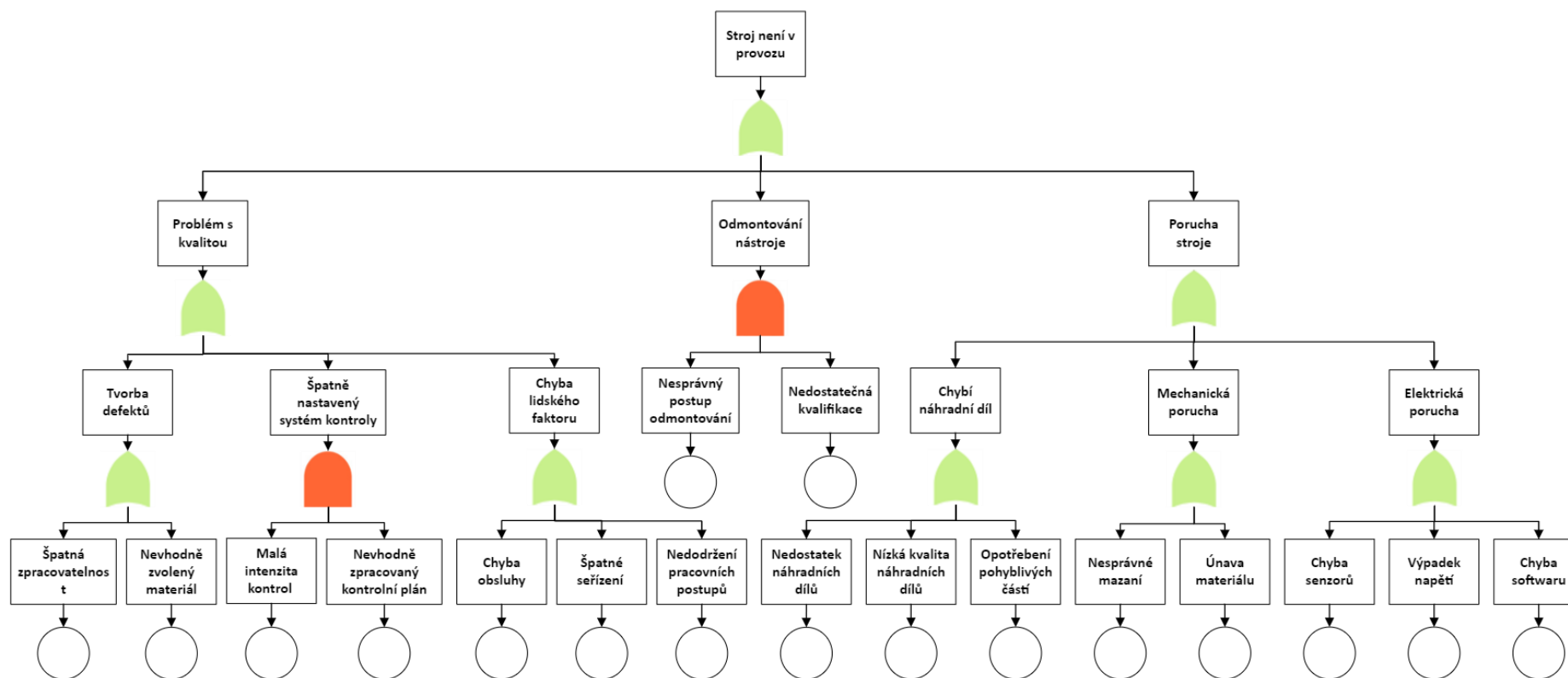
Mezi negativní opravy stroje patří převážně ty neplánované. Ty mohou způsobit dočasné odstavení strojů, což může způsobit neočekávané výpadky ve výrobě. Zároveň také mohou vyžadovat specializované díly nebo externí odborníky, což rapidně zvyšuje časovou náročnost opravy. Je důležité, aby mechanik zabývající se opravami byl vysoce kvalifikovaný, neboť pokud nebude oprava provedena správně, může dojít k jejímu opakování. Rovněž je důležité použití kvalitních náhradních dílů.

V případě, že dojde k této neplánované opravě, je zapotřebí, aby výrobní společnost disponovala dostatkem náhradních dílů a oprava byla provedena co nejefektivněji. Tento jev je vymodelován na obr. č. 36:



Obrázek 36 - Petriho síť – oprava stroje (vlastní)

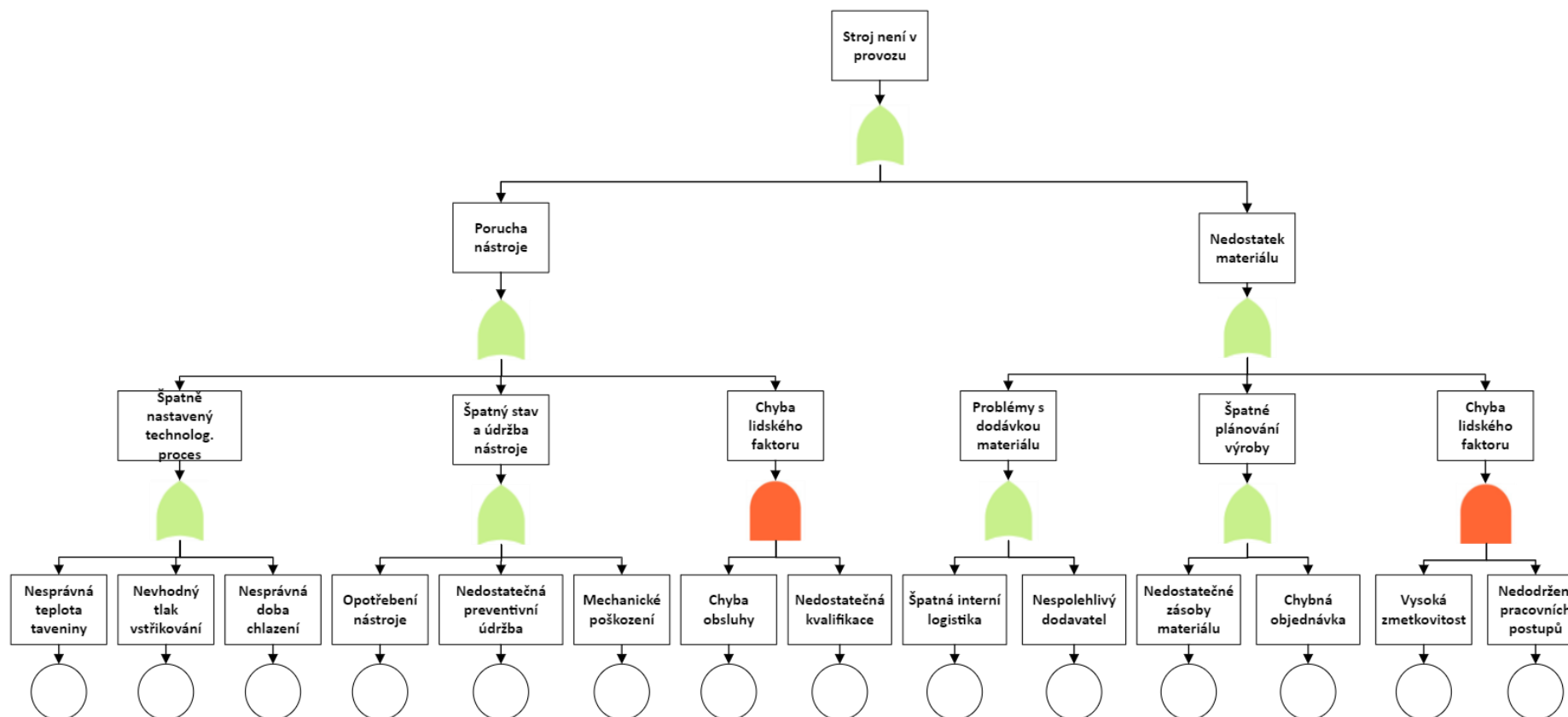
## 5.5 FTA 1



Obrázek 37 - FTA 1 (vlastní)



## 5.6 FTA 2



Obrázek 38 - FTA 2 (vlastní)

## 5.7 FMEA

### 5.7.1 Klasifikační systém

Dopad	Charakteristika	Číselná hodnota
Velmi nízký	Prostoj v řádu několika minut, snadné vyřešení nepříznivé události, velmi nízká finanční ztráta	1-2
Nízký	Prostoj v řádu několika hodin, složitější vyřešení nepříznivé události, nízká míra finanční ztráty	3-4
Střední	Prostoj v řádu několika hodin, delší doba nápravy nepříznivé události, finanční ztrátu nelze zanedbat	5-6
Vysoký	Prostoj v řádu několika dnů, zdlouhavé řešení nepříznivé události, citelná finanční ztráta	7-8
Velmi vysoký	Vážné narušení výrobního procesu s vlivem na výkonnost společnosti, velmi vysoká finanční ztráta	9-10

Tabulka 9 - Klasifikační systém – dopad (vlastní)

Dopad (tab. č. 9) je kritickým parametrem v analýze FMEA, který hodnotí závažnost následků, pokud k dané chybě dojde. Tento parametr měří, jaký vliv má selhání na funkci systému, bezpečnost nebo kvalitu produktu. Stupnice od 1 do 10 umožňuje stanovit míru závažnosti, kde nižší hodnoty představují méně závažné následky a vyšší hodnoty označují velmi vážné nebo kritické následky.

Pravděpodobnost výskytu	Charakteristika	Číselná hodnota
Velmi nízká	Prostoj je nepravděpodobný, prakticky se nevyskytuje	1-2
Nízká	Prostoj se občas vyskytne, ale je vzácný	3-4
Střední	Prostoj se vyskytne příležitostně	5-6
Vysoká	Prostoj se vyskytne často, systém je náchylný k chybám	7-8
Velmi vysoká	Časté opakování prostoje, systém je velmi náchylný k chybám	9-10

Tabulka 10 - Klasifikační systém – pravděpodobnost výskytu (vlastní)

Pravděpodobnost výskytu (tab. č. 10) je dalším z parametrů v analýze FMEA. Tento parametr hodnotí frekvenci, s jakou může k dané chybě dojít během provozu nebo výroby. Stupnice od 1 do 10 umožňuje kvantifikovat riziko výskytu chyby, kde nižší hodnoty představují méně častý výskyt a vyšší hodnoty označují častější výskyt.

<b>Pravděpodobnost odhalení</b>	<b>Charakteristika</b>	<b>Číselná hodnota</b>
Velmi nízká	Systém téměř nikdy chybu neodhalí, chyby jsou většinou odhaleny až zákazníkem nebo koncovým uživatelem	9-10
Nízká	Systém nebo proces závadu pravděpodobně neodhalí, neefektivní kontrolní mechanismy	7-8
Střední	Systém nebo proces závadu občas odhalí	5-6
Vysoká	Systém nebo proces pravděpodobně závadu odhalí	3-4
Velmi vysoká	Systém nebo proces je navržen tak, aby vždy závadu odhalil	1-2

*Tabulka 11 - Klasifikační systém – pravděpodobnost odhalení (vlastní)*

Pravděpodobnost odhalení (tab. č. 11) je parametr v analýze FMEA, který hodnotí schopnost současných kontrolních mechanismů odhalit chybu předtím, než způsobí problémy. Tento parametr určuje, jak efektivní jsou metody a postupy pro identifikaci chyb v systému. Stupnice od 1 do 10 umožňuje kvantifikovat schopnost odhalení, kde nižší hodnoty představují vyšší pravděpodobnost odhalení a vyšší hodnoty naznačují nižší pravděpodobnost odhalení.

<b>Prioritní hodnota rizika</b>	<b>Charakteristika</b>	<b>Číselná hodnota</b>
Velmi nízká	Menší závady, které nemají významný vliv na funkci nebo bezpečnost produktu a jsou snadno kontrolovatelné	1-50
Nízká	Problémy, které mohou ovlivnit výkon produktu nebo proces, ale obvykle nejsou kritické pro bezpečnost a mohou být řešeny stávajícími kontrolními mechanismy	51-150
Střední	Problémy, které mohou ovlivnit výkon produktu nebo proces, ale obvykle nejsou kritické pro bezpečnost a mohou být řešeny stávajícími kontrolními mechanismy	151-300
Vysoká	Míra rizika je střední a může představovat významné problémy, pokud nebudou přijata nápravná opatření	301-500
Velmi vysoká	Kritické závady, které mohou vést k selhání produktu, ohrožení bezpečnosti nebo významným finančním ztrátám, vyžadující okamžité a zásadní nápravné opatření	500-1000

*Tabulka 12 - Klasifikační systém – RPN (vlastní)*

Prioritní hodnota rizika (RPN) (tab. č. 12) je klíčovým parametrem v analýze FMEA, který kombinuje tři faktory: závažnost, pravděpodobnost výskytu a pravděpodobnost odhalení. RPN se vypočítává jako součin těchto tří faktorů a výsledkem je hodnota, která pomáhá určit prioritu rizik spojených s jednotlivými chybami. Stupnice RPN se pohybuje od 1 do 1000, kde nižší hodnoty představují nižší riziko a vyšší hodnoty indikují vyšší riziko.

## 5.7.2 FMEA matice + provedená opatření

Proces	Kategorie	Hrozba	Následky	Příčiny	D	P	O	RPN	Opatření	Zodpovědnost	D	P	O	RPN
Výroba	Materiál	Nedostatek materiálu na skladě	Prostoj z důvodu nedostatku materiálu potřebného k výrobě dané součásti, snížení produktivity	Špatné plánování výroby, vysoká zmetkovitost, nespolehlivost dodavatele	4	3	7	84	Důkladná analýza chyb, zvýšení zásob materiálu, zvýšení kvalifikace plánovačů výroby	Plánovač výroby	3	2	5	30
	Porucha stroje	Nedostatek náhradních dílů	Prostoj z důvodu nedostatku náhradních dílů potřebných k funkčnosti stroje, snížení produktivity	Nízká kvalita náhradních dílů - vyšší spotřeba, špatně nastavený technolog. proces	2	2	7	28	Navýšení zásob náhradních dílů	Nákupčí	1	1	6	6
	Lidský faktor	Dlouhá doba čekání na opravu	Prostoj z důvodu čekání na mechanika nebo seřizovače, snížení produktivity	Nedostatečné informace, špatná úroveň kontroly managementem	7	8	6	336	Vyšší kontrola managementu střediska, notifikace o chybě zaměstnancům prostřednictvím mobilního telefonu	Manažer střediska	4	4	5	80
	Kvalita	Výroba zmetků	Blokace výroby daného výrobku a následné vyšetřování kořenových příčin, vyšší spotřeba materiálu, náklady na zmetkovitost	Špatně zpracovaný plán kontroly, nedostatečná intenzita kontrol kusů z výroby	4	3	3	36	Zvýšení počtu kontrol na výrobcích, častější porady inženýrů kvality	Inženýr kvality	3	2	1	6
	Lidský faktor	Špatné namontování a seřízení nástroje	Poškození nástroje, snížená kvalita výrobku, náklady na opravu, prostoje	Nízká úroveň kvalifikace zaměstnanců	10	9	7	630	Častější školení, dohled zkušených zaměstnanců nad správností provedení montáže a seřízení	Vedoucí nástrojárny	5	5	5	125
	Porucha stroje	Nízká kvalita náhradních dílů	Nestabilita procesu, prostoje, trvalá deformace částí stroje	Snaha o ušetření financí určených k nákupu náhradních dílů	5	4	3	60	Nákup kvalitnějších náhradních dílů	Nákupčí	2	2	2	8
	Porucha nástroje	Špatně nastavený technolog. proces	Opatření strojních částí, zvýšená frekvence oprav, prostoje, vady výrobku, prostoje	Nedostatečná komunikace napříč odděleními, nízká úroveň kvalifikace	9	8	5	360	Zlepšení spolupráce napříč odděleními, vyšší míra školení	Technolog, procesní inženýr	5	4	3	60
	Porucha nástroje	Špatný stav a údržba	Opatření strojních součástí, vyšší opotřebení náhradních dílů, časté poruchy, vady výrobku, prostoje	Malá intenzita preventivních údržeb	8	7	6	336	Zvýšení frekvence preventivních údržeb	Mechanik	4	3	4	48
	Lidský faktor	Nedostatek seřizovačů na směně	Zvýšené riziko úrazu, omezená schopnost reakce na změny, nesprávné nastavení strojů	Neobzavenost všech pracovních pozic, nízká mzda	7	8	7	392	Zlepšení mzdových podmínek seřizovačů, obsazení více pozic	Manažer střediska	3	4	4	48
	Materiál	Použití nekvalitního materiálu	Poškození nástroje, vady výrobku, prostoje, nekvalitní výrobek, ztráta zájmu zákazníka	Snaha o co nejmenší náklady na výrobu	5	3	4	60	Nákup a použití kvalitnějšího materiálu	Nákupčí	2	1	2	4
Lidský faktor	Nedostatečná kvalifikace obsluhy stroje	Náklady na školení a přeškolení, prostoje, riziko úrazu, výrobní chyby	Malá míra školení, absence pracovních pokynů, vysoká fluktuace	5	5	5	125	Častější školení, tvorba přehledných pracovních pokynů, zlepšení mzdových podmínek	Školitel	3	3	4	36	

Tabulka 13 - FMEA + provedená opatření (vlastní)

## 6 DISKUZE / ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ

V této části práce budou analyzovány a porovnány výsledky řešení spolehlivosti a účinnosti provedených opatření. Jako první bylo možné porovnat výsledky průměrných výkonů stroje, které je možné vidět v tabulce č. 14.

Měsíc	říjen	listopad	prosinec	březen
Průměrný výkon stroje [%]	65,12	72,22	73,16	86,2

Tabulka 14 - průměrné výkony (vlastní)

Jak již bylo zmíněno dříve, optimální procentuální výkon by se měl pohybovat v intervalu 80-100 %. V měsících listopadu a prosinci je zřetelný nárůst, a to z důvodu provedení akutních opatření pro krátkodobé zvýšení výkonu. Hodnota za tyto měsíce se pohybovala okolo 73 %. Mezi tyto akutní opatření patřily převážně proškolení zaměstnanců a zintenzivnění kontrol. Tyto opatření však nezaručují dlouhodobou udržitelnost, proto bylo nutné přejít k plánování opatření dlouhodobých. Procentuální průměrný výkon za měsíc březen činil 86,2 %, což odpovídá požadovanému intervalu. Tyto data však pro komplexní hodnocení spolehlivosti nedostačují, čili bylo nutné provést další analýzy.

Další analýzou bylo porovnání parametrů Weibullova rozdělení – tvaru a měřítka. Hodnoty parametrů lze vidět v tabulce č. 15.:

Měsíc	k	$\lambda$
Březen	0,8232	9,012
Listopad a prosinec	0,8104	11,553
Březen	0,6663	16,609

Tabulka 15 - parametry Weibullova rozdělení

Z tabulky je patrné, že tvarový parametr k se snižuje, což naznačuje, že rozptyl časů provozu se zvětšuje. Měřítkový parametr zase výrazněji roste, což indikuje, že průměrný provozní čas mezi selháními se výrazně zvýšil po zavedení opatření.

Tento trend ukazuje, že opatření měla pozitivní vliv na spolehlivost stroje, což vedlo k prodloužení stavů provozu do poruchy. Měřitkový parametr je v tomto ohledu velmi důležitý, jelikož jeho zřetelný nárůst znamená celkové zvýšení spolehlivosti stroje.

Další významnou analýzou dosažených výsledků je porovnání výpočtů ukazatelů spolehlivosti. Hodnoty těchto ukazatelů je možné vidět v tab. č. 16:

<b>Ukazatel spolehlivosti</b>	<b>říjen</b>	<b>listopad</b>	<b>prosinec</b>	<b>březen</b>
Pravděpodobnost bezporuchového provozu	0,6512	0,7131	0,7415	0,8675
Pravděpodobnost poruchy	0,3488	0,2869	0,2585	0,1325
Intenzita poruch	0,53562	0,4023	0,3486	0,1527
Střední doba provozu do poruchy	9,88 hod	14,2 hod	9,95 hod	21,33 hod
Střední doba poruch	5,29 hod	5,71 hod	3,57 hod	3,14 hod

*Tabulka 16 - hodnoty ukazatelů spolehlivosti (vlastní)*

Z vypočítaných hodnot je patrné, že všechny ukazatele vykazují zlepšení svých hodnot. Hodnota ukazatele pravděpodobnosti bezporuchového provozu vzrostla z říjnové hodnoty 0,6512 v březnu na 0,8675. Dalším ukazatelem byla intenzita poruch, jejíž pokles z říjnové hodnoty 0,53562 na 0,1527 indikuje, že poruchy se vyskytují méně často, což je dalším znakem zvýšení spolehlivosti. Mezi velmi významné ukazatele patří i střední doba provozu do poruchy, jejíž hodnota vrostla téměř dvojnásobně v porovnání měsíců října a března. Z toho plyne, že opatření měla významný vliv na delší fungování stroje. Posledním analyzovaným ukazatelem spolehlivosti byla střední doba poruch. Ta byla snížena z 5,29 hod. v říjnu na hodnotu 3,14 hod., což značí snížení doby potřebné k opravě stroje. Na tomto snížení má podíl opatření zvýšení kvalifikace zaměstnanců, zvýšení počtu mechaniků a také větší intenzita školení personálu.

Díky provedené analýze FTA, která detailně analyzovala možné konkrétní příčiny selhání stroje a modelům Petriho sítím, které přinesly zachycení dynamického chování výrobního procesu bylo možné efektivněji určit míry rizik v matici FMEA. Dalším aspektem objektivnosti míry rizika v této matici je fakt, že hodnocení parametrů probíhalo kolektivně kolegy z jednotlivých oddělení střediska (oddělení kvality, procesního inženýringu, managementu atd.). Na základě těchto hodnot bylo možné prioritizovat činnosti vedoucí ke zvyšování spolehlivosti.

Opatření bylo provedeno celkem 11, jak je uvedeno v matici FMEA. U každé hrozby se podařilo snížit míru rizika do přijatelných hodnot.

První a druhé opatření zamezuje absenci materiálu a náhradních dílů. Jak je z časových os a tabulek patrné, prostoje kvůli těmto důvodům zastavily výrobu na delší dobu, ač se tyto problémy vyskytovaly pouze ojediněle. Z březnových hodnot plyne, že eskalace díky těmto důvodům již nevznikla, čili plánovací management byl zlepšen.

Dalším opatřením proti dlouhému čekání na opravu bylo poskytnutí softwaru do mobilních telefonů zaměstnanců, který je na každou opravu upozornil notifikací. Díky tomu zaměstnanci o prostoji věděli hned, jakmile nastal. Ověření účinnosti tohoto opatření lze vyčíst z výpočtu ukazatelů spolehlivosti, kdy byla snížena hodnota střední doby opravy, čili lze konstatovat že opatření mělo pozitivní účinek.

Opatření proti výrobě zmetků měli na starost inženýři kvality. Ti aktualizovali intenzitu kontrol a plány kontroly. Výroba díky tomu v březnu nebyla kvůli výrobě zmetků pozastavena.

Největší hrozbou pro výrobní proces bylo špatné seřízení nástrojů. Opatření byla provedena za dohledu manažera střediska, a to zvýšení kvalifikace seřizovačů a dohled zkušených kolegů nad jejich činností. Tento druh prostojů měl největší vliv na intenzitu poruch, jelikož se jednalo o velmi často opakované prostoje. Účinnost tohoto opatření lze ověřit pomocí výpočtu ukazatele intenzity poruch, u kterého došlo v březnu ke znatelnému snížení jeho hodnoty.

Dalšími hrozbami pro bezproblémový výrobní proces bylo použití nekvalitního materiálu a náhradních dílů ve snaze o co nejlevnější výrobní proces. Jako opatření byl proveden nákup kvalitnějších komponent, které lépe a déle budou plnit svoji funkci.

Mezery v nastavení technologického procesu měly taktéž větší vliv na celkovou spolehlivost výrobního procesu. Došlo tedy ke zlepšení komunikace napříč jednotlivými odděleními formou častějších schůzek.

Dalším negativním jevem, který ovlivňoval spolehlivost výroby byla malá frekvence preventivních údržeb. Z tabulek jednotlivých časových hodnot lze vyčíst, že v měsíci říjnu trvala preventivní údržba pouze 1,5 hod., v listopadu 0,5 hod a v prosinci taktéž 0,5 hod. Po tomto zjištění byla intenzita těchto údržeb navýšena a březnová hodnota činila 9 hodin. Zvýšení této preventivní údržby mělo pozitivní dopad na spolehlivost výrobního procesu.

Dalším negativním aspektem byly prostoje ve výrobě způsobené nedostatkem zaměstnanců – konkrétně seřizovačů, a to z důvodu nezájmu o tuto pracovní pozici. Opatřením bylo zvýšení mzdového ohodnocení a tím i zvýšení atraktivity této pracovní pozice a zájmu na této pozici přetrvat.

## 7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce analyzovala spolehlivost výroby ve vybrané společnosti a zhodnotila efektivitu implementovaných opatření ke zvýšení této spolehlivosti. Práce byla rozdělena do několika klíčových částí, zahrnujících identifikaci a analýzu současného stavu spolehlivosti, návrh opatření ke zvýšení spolehlivosti, jejich implementaci a následné statistické vyhodnocení efektivity těchto opatření.

Ve fázi identifikace byla provedena detailní analýza spolehlivosti výrobního stroje, při které byly zjištěny hlavní problémy ovlivňující jeho spolehlivost. Aplikace kombinace Petriho sítí a metod analýz rizik zvýšila schopnost analyzovat rizika z různých úhlů pohledů. Následně byla navržena opatření zahrnující například častější preventivní údržbu, optimalizaci provozních parametrů a zavedení nových technologií pro monitorování a predikci poruch.

Pro posouzení účinnosti těchto opatření byly použity statistické metody včetně Weibullový analýzy a Kolmogorov-Smirnovova testu. Tyto metody umožnily porovnání spolehlivosti stroje před a po implementaci opatření. Výsledky ukázaly, že přestože zlepšení výrobních časů nebylo statisticky významné, porovnání hodnot ukazatelů spolehlivosti, parametrů rozdělení a průměrného výkonu vykazovalo zlepšení svých hodnot.

Zjištěné výsledky potvrzují, že systematický přístup k řízení spolehlivosti může přispět k optimalizaci výrobních procesů. Zvýšení spolehlivosti vedlo ke snížení četnosti poruch a tím i k redukci nákladů na údržbu a opravy.

Na základě těchto zjištění lze doporučit pokračování v implementaci a dalším rozvoji opatření ke zvýšení spolehlivosti ve výrobním podniku. Další kroky by měly zahrnovat pravidelnou aktualizaci a revizi údržbových plánů, investice do moderních diagnostických nástrojů a technologií a pokračující školení personálu. Takto komplexní přístup k řízení spolehlivosti zajistí dlouhodobý a udržitelný růst efektivity a kvality výrobních procesů.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KUBA, Jaromír. *Hodnocení provozní spolehlivosti strojů*. Praha: SNTL, 1984.
- [2] KARAULOVA, Tatyana; KOSTINA, Marina a SHEVTSHENKO, Eduard. Reliability Assessment of Manufacturing Processes. Online. *IJEM. International Journal of Industrial Engineering and Management (Online)*. 2012, roč. 3, č. 3, s. 143. ISSN 2217-2661. [cit. 2024-03-17].
- [3] ZHANG, Ding a ZHANG, Yingjie. Dynamic decision-making for reliability and maintenance analysis of manufacturing systems based on failure effects. Online. *Enterprise information systems*. 2017, roč. 11, č. 8, s. 1228-1242. ISSN 1751-7575. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17517575.2016.1212406>. [cit. 2024-05-17].
- [4] ČSN 01 0103, *Výpočet ukazatelů spolehlivosti dvoustavových soustav*. Praha: Český normalizační institut, 1975.
- [5] ČSN EN 60300-1 ed. 2, *Management spolehlivosti - část 1: Systémy managementu spolehlivosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizace, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [6] LIŠKA, Miroslav a SLÁDEK, Zdeněk. *Spolehlivost a technická diagnostika*. Brno: VUT Brno, 1989. ISBN 80-214-1047-7.
- [7] KLIMEŠ, Pavel. *Části a mechanismy strojů. I, Spolehlivost, dimenzování, pružiny, spoje a hřídele*. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-214-2421-4.
- [8] *Bathtub curve*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bathtub\\_curve?oldid=687550025](https://en.wikipedia.org/wiki/Bathtub_curve?oldid=687550025). [cit. 2024-01-28].
- [9] KLUTKE, G.A.; KIESSLER, P.C. a WORTMAN, M.A. A critical look at the bathtub curve. Online. *IEEE transactions on reliability*. 2003, roč. 52, č. 1, s. 125-129. ISSN 0018-9529. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TR.2002.804492>. [cit. 2024-01-28].

- [10] G3P CONSULTING. *What is Reliability Maintenance Management?* Online. Dostupné z: <https://www.g3pconsulting.com/en/reliability-maintenance-management>. [cit. 2024-03-19].
- [11] HE, Yihai; GU, Changchao; HE, Zhenzhen a CUI, Jiaming. Reliability-oriented quality control approach for production process based on RQR chain. Online. *Total quality management & business excellence*. 2018, roč. 29, č. 5-6, s. 652-672. ISSN 1478-3363. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/14783363.2016.1224086>. [cit. 2024-03-24].
- [12] VINING, Geoff; KULAHCI, Murat a PEDERSEN, Søren. Recent Advances and Future Directions for Quality Engineering. Online. *Quality and reliability engineering international*. 2016, roč. 32, č. 3, s. 863-875. ISSN 0748-8017. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qre.1797>. [cit. 2024-03-24].
- [13] O'CONNOR, Patrick D. T a KLEYNER, Andre. *Practical reliability engineering*. 5th ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012. ISBN 978-0-470-97981-5.
- [14] BIROLINI, Alessandro. *Reliability Engineering: Theory and Practice*. Eighth edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2017. ISBN 3662542080. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39535-2>.
- [15] MADU, Christian N. Reliability and quality interface. Online. *The International journal of quality & reliability management*. 1999, roč. 16, č. 7, s. 691-698. ISSN 0265-671X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/02656719910286198>. [cit. 2024-03-24].
- [16] YOE, Charles. *Primer on Risk Analysis: Decision Making Under Uncertainty*. Second edition. Milton: CRC Press, 2019. ISBN 0367075180. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9780429021145>.
- [17] LEE, C.K.M.; LV, Yaqiong a HONG, Zhen. Risk modelling and assessment for distributed manufacturing system. Online. *International journal of production research*. 2013, roč. 51, č. 9, s. 2652-2666. ISSN 0020-7543. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.738943>. [cit. 2024-03-20].
- [18] ONDRŮŠEK, Č. *Řízení právní infrastruktury firmy*. Brno, 2013.

- [19] MAZÁNKOVÁ, Věra a NĚMEC, Michal. Operační riziko a jeho dopady do finanční stability. Online. 2008. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/financni-stabilita/tematicke-clanky-o-financni-stabilite/Operacni-riziko-a-jeho-dopady-do-financni-stability>. [cit. 2024-05-17].
- [20] TICHÝ, Milík. *Ovládání rizika: analýza a management*. Praha: C.H. Beck, 2006. ISBN 80-7179-415-5.
- [21] GRAVLEY, Darren. *Risk, hazard, and disaster*. New Zealand: University of Canterbury, 2001.
- [22] ČSN EN IEC 31010 ed. 2, *Management rizik - Techniky posuzování rizik*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [23] SMEJKAL, Vladimír a RAIS, Karel. *Řízení rizik ve firmách a jiných organizacích*. 3., rozš. a aktualiz. vyd. Praha: Grada, 2010. ISBN 978-80-247-3051-6.
- [24] ČSN EN IEC 60812 ed.2, *Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA a FMECA)*. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [25] MARHAVILAS, P.K.; KOULOURIOTIS, D. a GEMENI, V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. Online. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2011, roč. 24, č. 5, s. 477-523. ISSN 0950-4230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>. [cit. 2024-03-20].
- [26] ČSN ISO 31073, *Management rizik - slovník*. Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [27] ČSN EN 62551, *Techniky analýzy spolehlivosti - Techniky Petriho sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [28] AVEN, Terje. *Risk analysis*. Chichester: Wiley, 2015. ISBN 978-1-119-05779-6.
- [29] ČSN EN 61025, *Analýza stromu poruchových stavů (FTA)*. Český normalizační institut, 2007.

- [30] ČSN EN 61703 ed. 2, *Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a zajištění údržby*. Praha: Úřad pro technickou normalizace, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [31] ČSN IEC 60050-192, *Mezinárodní elektronický slovník - Část 192: Spolehlivost*. Praha: Úřad pro technickou normalizace, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [32] TORELL, Wendy a VICTOR, Avelar. *Mean time between failure: Explanation and standards*. 2004.
- [33] *Defining Failure: What is MTTR, MTTF, and MTBF?* Online. In: Stephen Foskett, Pack Rat. 2011. Dostupné z: <https://blog.fosketts.net/2011/07/06/defining-failure-mttr-mttf-mtbf/>. [cit. 2024-02-17].
- [34] AALST, Wil van der a BEST, Eike. *Applications and theory of Petri nets 2003: 24th International Conference, ICATPN 2003, Eindhoven, The Netherlands, June 23-27, 2003 : proceedings*. 2679. 2003 edition. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. ISBN 3540403345. ISSN 0302-9743. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/3-540-44919-1>.
- [35] EZZEDINE, Houcine. Use of Petri Nets For Modeling An Agent-Based interactive System: Basic Principles and Case Study. In: *Petri Net: theory and application*. IntechOpen, 2008, s. 131-148. ISBN 9783902613127. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/5316>.
- [36] POSPÍŠIL, Karel. *Uzel Petriho sítě*.
- [37] *Petri Net: theory and application*. IntechOpen, 2008. ISBN 9783902613127.
- [38] KABIR, Sohag a PAPADOPOULOS, Yiannis. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. Online. *Safety science*. 2019, roč. 115, s. 154-175. ISSN 0925-7535. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>. [cit. 2024-05-17].

- [39] COLOM, Jose-Manuel a DESEL, Jörg. *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency: 34th International Conference, PETRI NETS 2013, Milan, Italy, June 24-28, 2013, Proceedings*. 7927. 2013. Netherlands: Springer Nature, 2013. ISBN 3642386970.
- [40] KOUTKOVÁ, Helena. *Pravděpodobnost a matematická statistika. Modul GA03-M4 Základy testování hypotéz*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2004.
- [41] DIBLÍK, Josef; BAŠTINEC, Jaromír a HALUZÍKOVÁ, Anežka. *Numerická matematika a matematická statistika*. Praha: SNTL, 1987.
- [42] EL-AWADY, Mahmoud Mohamed; EL-MONSEF, Mohamed Mohamed Ezzat Abd a ELBAZ, Islam Mohammed. Exponentiated half-logistic Weibull distribution with reliability inference. Online. *Quality and reliability engineering international*. 2024, roč. 40, č. 4, s. 1875-1903. ISSN 0748-8017. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qre.3499>. [cit. 2024-05-22].

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – prvky Petriho sítí [27].....	39
Tabulka 2 - Běžně používané přechody [27].....	39
Tabulka 3 - Odpovídající si pojmy v systémech, Petriho sítích a spolehlivosti [27].....	40
Tabulka 4 - Použité značky [29].....	48
Tabulka 5 – tabulka hodnot – říjen 2023 (vlastní).....	54
Tabulka 6 - tabulka hodnot – listopad 2023 (vlastní).....	56
Tabulka 7 - tabulka hodnot – prosinec 2023 (vlastní).....	58
Tabulka 8 - tabulka hodnot – březen 2024 (vlastní).....	59
Tabulka 9 - Klasifikační systém – dopad (vlastní).....	79
Tabulka 10 - Klasifikační systém – pravděpodobnost výskytu (vlastní).....	79
Tabulka 11 - Klasifikační systém – pravděpodobnost odhalení (vlastní).....	80
Tabulka 12 - Klasifikační systém – RPN (vlastní).....	80
Tabulka 13 - FMEA + provedená opatření (vlastní).....	81
Tabulka 14 - průměrné výkony (vlastní).....	82
Tabulka 15 - parametry Weibullova rozdělení.....	82

Tabulka 16 - hodnoty ukazatelů spolehlivosti (vlastní) .....	83
--	----

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Vanová křivka [8] .....	20
Obrázek 2 - Rizika firmy [18] .....	23
Obrázek 3 - graf rizik [24] .....	27
Obrázek 4 – Střední doba mezi poruchami [33] .....	35
Obrázek 5 - rozdíl mezi MOTBF a MTBF [30] .....	36
Obrázek 6 - Uzel Petriho sítě [36].....	38
Obrázek 7 - proces analýzy a modelování [27].....	40
Obrázek 8 - Cyklus stav-přechod pohotovosti součásti [27] .....	42
Obrázek 9 - Přechod do poruchového stavu [27] .....	42
Obrázek 10 - Příklad testovacích hran [27].....	43
Obrázek 11- Neproveditelný přechod [27] .....	43
Obrázek 12 - Značení před odpalem a po odpalu [27] .....	43
Obrázek 13 - Sériová konfigurace [29] .....	46
Obrázek 14 - Paralelní konfigurace [29] .....	47
Obrázek 15 - Vývojový diagram činností FMEA [24] .....	50
Obrázek 16 - Matice kritičnosti [24] .....	51
Obrázek 17 - Časová osa – říjen 2023 (vlastní) .....	53
Obrázek 18 - průměrný výkon – říjen 2023 (vlastní).....	54
Obrázek 19 - Časová osa – Listopad 2023 (vlastní) .....	55
Obrázek 20 - průměrný výkon – listopad 2023 (vlastní).....	56
Obrázek 21 - Časová osa – prosinec 2023 (vlastní).....	57
Obrázek 22 - průměrný výkon – prosinec 2023 (vlastní).....	58
Obrázek 23 - časová osa – březen 2024 (vlastní) .....	59
Obrázek 24 - průměrný výkon – březen 2024 (vlastní).....	60
Obrázek 25 - Histogram dob provozu (vlastní).....	60
Obrázek 26 - Test Kolmogorov-Smirnov .....	61
Obrázek 27 - graf kumulativních pravděpodobnosti CDF (vlastní).....	62
Obrázek 28 - Q-Q graf – říjen (vlastní) .....	63
Obrázek 29 - Q-Q graf – listopad a prosinec (vlastní) .....	64

Obrázek 30 - Q-Q graf – březem (vlastní).....	65
Obrázek 31 – Petriho síť – globální struktura stroje (vlastní) .....	71
Obrázek 32 - Petriho síť – porucha nástroje (vlastní).....	72
Obrázek 33 - Petriho síť – výměna nástroje (vlastní).....	73
Obrázek 34 - Petriho síť – nedostatek materiálu (vlastní) .....	74
Obrázek 35 - Petriho síť – nedostatek materiálu (vlastní) .....	75
Obrázek 36 - Petriho síť – oprava stroje (vlastní).....	76
Obrázek 37 - FTA 1 (vlastní).....	77
Obrázek 38 - FTA 2 (vlastní).....	78