

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2008

Lukáš Macek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1802R022 - Informatika a logistika

**Zlepšení udržitelnosti průmyslového zařízení
na základě metod aplikovaných ve spolehlivosti.**

Bakalářská práce

Autor: **Lukáš Macek**
Vedoucí práce: Ing. Jan Kamenický
Konzultant: Ing. Pavel Fuchs, CSc.
Ing. Jaroslav Zajíček

V Liberci 16. 10. 2007

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Lukáš Macek

studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 1802R022 - Informatika a logistika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto bakalářskou práci:

Název tématu: **Zlepšení udržitelnosti průmyslového zařízení na základě metod aplikovaných ve spolehlivosti.**

Zásady pro vypracování:

1. Popis stávajícího stavu systému.
2. Funkční bloková analýza zařízení
3. Analýza FMECA zařízení.
4. Vytvoření formuláře údržby na základě zpracované FMECA a naplnění provozními daty.
5. Zhodnocení a interpretace dosažených výsledků.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

[1] Fuchs P., Vališ D., Chudoba J., Kamenický J., Zajíček J.: *Řízení spolehlivosti*, skripta Liberec 2006

[2] Fuchs P., Vališ D., Chudoba J., Kamenický J., Zajíček J.: *Bezporuchovost a životnost, Techniky analýzy bezporuchovosti*, učební text Liberec 2005

[3] Žižka M., *Vybrané statě z operačního výzkumu*, skripta, Liberec 2002

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Kamenický

Konzultant: Ing. Pavel Fuchs, CSc.

Ing. Jaroslav Zajíček

Zadání bakalářské práce:

5.10.2007

Termín odevzdání bakalářské práce:

16. 5. 2008

L.S.

.....
Vedoucí RSS

.....
Děkan

V Liberci dne

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Janu Kamenickému za odborné vedení a pomoc při vypracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě ESAB s.r.o., za možnost zpracování této práce, konkrétně Ing. Josefu Morávkovi za vstřícný přístup a za poskytnuté rady, bez kterých by tato práce nemohla být dokončena.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zlepšení udržitelnosti průmyslového stroje (FSW-D) pomocí integrace nově navrhnutého protokolu pro evidenci poruch. Koncepce tohoto nového protokolu bude zhotovena na základě protokolu stávajícího. Identifikaci nedostatků stávajícího protokolu pro záznam poruch realizujeme pomocí spolehlivostních metod, jako např. MIFA, FTA a FMECA. Navrhovaný protokol bude akceptovat informace o poruchách z provozu firmy ESAB s.r.o..

Práce se skládá ze čtyř hlavních částí: analýza materiálového a informačního toku, funkční a technická analýza stroje, identifikace původních nedostatků a interpretace známých dat o poruchách. Posledním bodem je syntéza získaných poznatků, která poslouží k vytvoření nového protokolu. Ten musí zajistit optimální dekompozici stroje tak, aby bylo možné efektivně využívat sledovaná data o poruchách. Tato data nám časem umožní určit kritická místa v oblasti údržby, která můžeme následně redukovat a tím přispět ke zvýšení pohotovosti zařízení.

Klíčová slova: udržitelnost, FTA, FMECA

Abstract

The goal of my bachelor work is an industrial equipment maintainability improvement based on implementation of a new suggested failure log. The conception of this new failure log will be based on the existing failure log. We realize the failure identification of the current failure log by reliability methods, as MIFA, FTA and FMECA. Suggested protocol will accept the information about failures in the ESAB Ltd.

My work consists of four main parts: material & information flow analysis, functional and technical analysis of the machine, identification of existing failure and interpretation of known failure information. The last point of my work is synthesis of gained knowledge which helps to suggest new failure log. New failure log must provide the machine optimal decomposition that allows effective using of failure information. Over time failure information allow us to determine critical points of maintenance area. After this process we can reduce this point and contribute to reliability improvement.

Keywords: Maintainability, FTA, FMECA

OBSAH

1. Úvod.....	10
1.1. Cíl Bakalářské práce, stanovení postupu řešení.....	10
1.2. Přínosy bakalářské práce.....	12
1.3. Lean principles.....	13
2. Spolehlivost - teorie.....	15
2.1. Definice a základní pojmy spolehlivosti.....	15
2.2. Ukazatele spolehlivosti	21
2.3. Blokové modely	24
2.4. Analýzy FMECA, FTA, RBD a Paretův diagram	26
3. MIFA výrobního procesu SSW - výběr stroje	31
4. Funkční a technická analýza systému	36
4.1. Technický a funkční popis systému - odvíjedo	38
4.2. Technický a funkční popis systému –drátotah.....	41
4.3. Technický a funkční popis systému – navíjedo.....	44
4.4. Technický a funkční popis systému – ovládací panel.....	47
4.5. Technický a funkční popis systému – elektrický rozvaděč	47
5. Analýza dat původního protokolu	48
5.1. Kvalitativní analýza.....	48
5.2. Kvantitativní analýza	51
6. Návrh nového protokolu	61
6.1. Kvalitativní analýza.....	62
Závěr.....	69
Použitá literatura:	71

Seznam použitých zkratek

5S	Separovat, Systematizovat, Stále čistit, Standardizovat a Sebedisciplina (Seiri, Seiton, Seisto, Seiketsu, Shitsuke).
$\lambda(t)$	Intenzita poruch
$\mu(t)$	Intenzita oprav
A	Pohotovost (Availability)
FMECA	Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)
FTA	Strom poruch (Fault Tree Analysis)
MART	Střední doba aktivní opravy (Mean Active Repair Time)
MIFA	Materiálně-informační analýza (Material & Information Flow Analysis)
MLD	Střední logistické zpoždění
MP2	Softwarová evidence poruch
MR	Míra rizika
MRT	Střední doba opravy (Mean Repair time)
MTBF	Střední doba mezi poruchami (Mean time between failure)
MTTM	Střední doba do (Mean time to maintain)
MTTR	Střední doba na opravu (Mean time to repair)
OT	Doba provozu (Operating Time)
PULL	Metoda řízení (plánování) výroby
R&M	Bezporuchovost a udržitelnost (Reliability and Maintainability)
RBD	Blokový diagram bezporuchovosti (Reliability Block Diagram)
SMED	Systematický proces pro minimalizaci prostojů (Single Minute Exchange of Die)
SSW	Nerezový drát (Stainless Steel Wire)
TCM	Celková doba údržby po poruše v specifikovaném časovém období (Total Corrective Maintenance time per specified time period)
U	Nepohotovost (Unavailability)
VSM	Zmapování hodnotového toku (Value Stream Mapping)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Postup bakalářské práce	11
Obrázek 2: Náklady životního cyklu	12
Obrázek 3: Vymezení pojmu spolehlivosti.....	16
Obrázek 4: Klasifikace stavu objektů	21
Obrázek 5: Blokový diagram sériového systému	24
Obrázek 6: Blokový diagram paralelního systému.....	25
Obrázek 7: Blokový diagram kombinovaného systému	26
Obrázek 8: Výchozí mapa procesů na SSW	31
Obrázek 9: MIFA - finální mapa procesů	33
Obrázek 10: Graf průchodnosti jednotlivých procesů (1)	34
Obrázek 11: Graf průchodnosti jednotlivých procesů (2)	34
Obrázek 12: Graf Pohotovosti jednotlivých procesů	35
Obrázek 13: Linka FSW-D (1)	36
Obrázek 14: Linka FSW-D (2)	36
Obrázek 15: Konstrukční uspořádání systému FSW-D.....	37
Obrázek 20: Konstrukční uspořádání odvíjeda.....	40
Obrázek 26: Konstrukční uspořádání drátotahu	43
Obrázek 27: Olejovací a čistící jednotka	44
Obrázek 30: Konstrukční uspořádání navíjeda.....	46
Obrázek 31: Ovládací panel.....	47
Obrázek 32: RBD diagram	50
Obrázek 33: FTA původního protokolu.....	51
Obrázek 34: Paretův diagram	57
Obrázek 35: Paretův diagram s uvažováním doby opravy	60
Obrázek 36: FTA odvíjeda	62
Obrázek 37: FTA drátotahu	63
Obrázek 38: FTA navíjeda.....	64

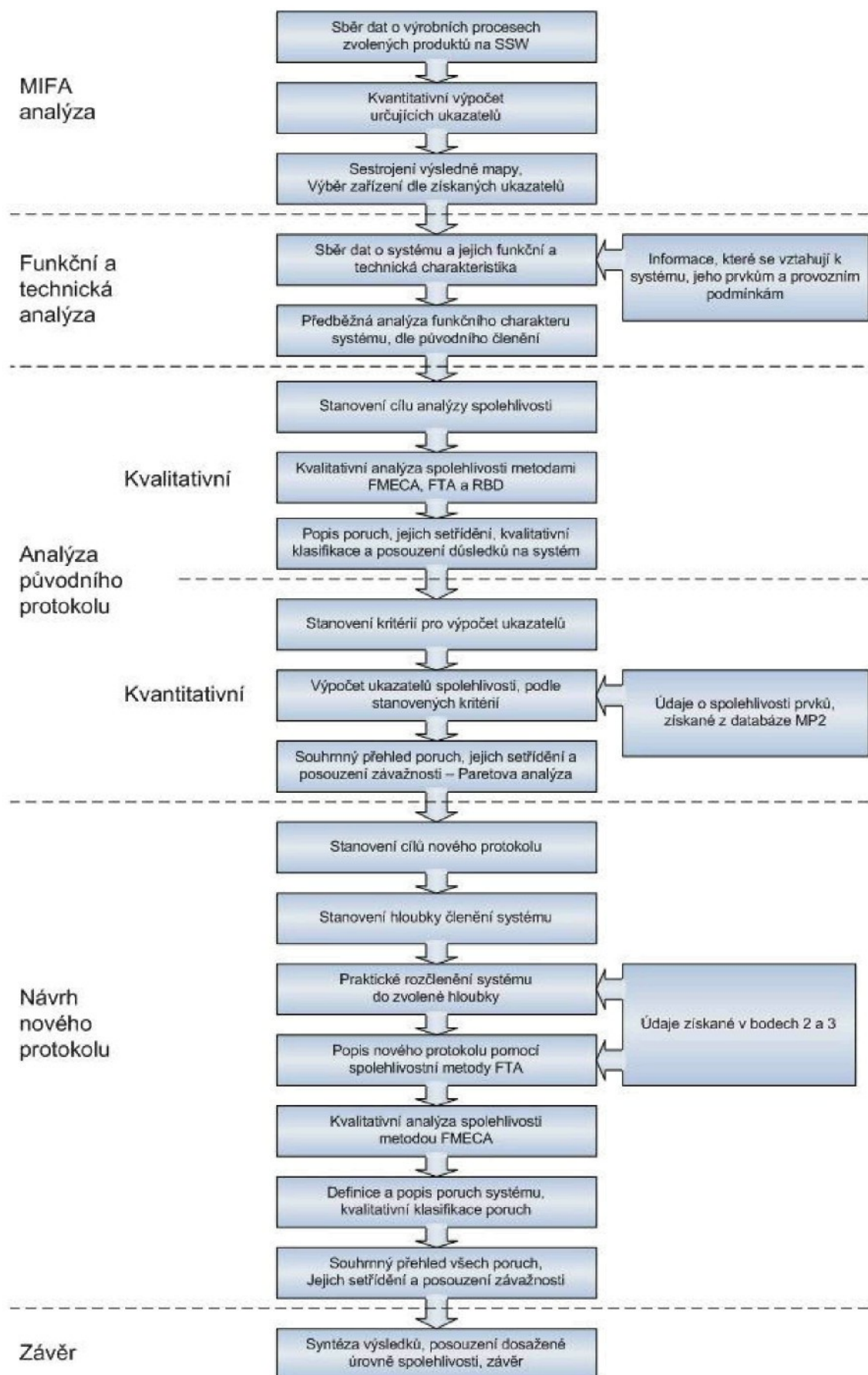
1. Úvod

Úvod obsahuje tři hlavní části:

- cíl a postup řešení bakalářské práce
- přínosy bakalářské práce pro podnik
- role údržby v celkovém procesu výrobu

1.1. Cíl Bakalářské práce, stanovení postupu řešení

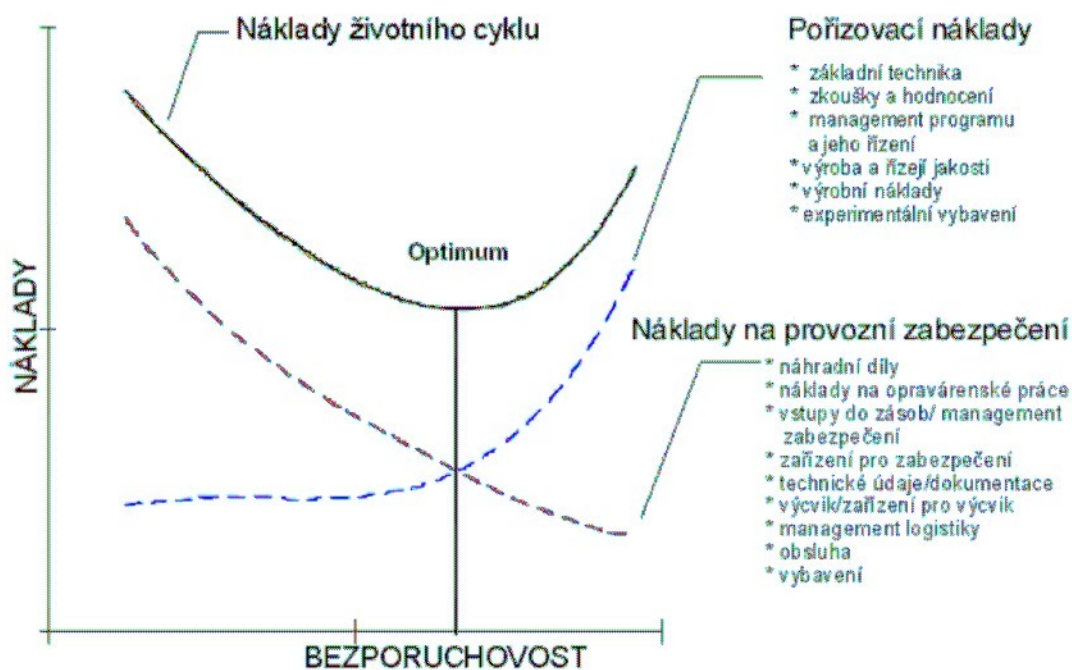
Úkolem práce bylo navrhnout nový protokol rozdělení poruch (dále jen protokol), který bude implementován do softwarové evidence MP2. Stávající protokoly mají velmi obecné členění strojů a není tedy umožněno přesně sledovat nákladnost a poruchovost konkrétních částí stroje. Tento problém převládá u více zařízení na SSW. Každé nové a detailnější rozčlenění firmou používaného zařízení je časově náročné. Bylo tedy nutné vybrat jedno zařízení, u něhož by bylo nové rozdělení co nejvíce smysluplné a účelné. K výběru tohoto zařízení byla použita analýza MIFA, jejímž cílem je podrobné zmapování procesů daného úseku výrobního řetězce. Po zhodnocení výsledků MIFA analýzy byl vybrán stroj FSW-D, neboli tažná linka (dále uváděn také pod pojmem systém). U tohoto systému bylo nutné provést jeho optimální dekompozici tak, aby evidence nebyla příliš podrobná, ale zároveň přinesla žádané zlepšení. Nejprve bylo nutné stanovit postup činností, ze kterých bude návrh nového protokolu vycházet. Mezi hlavní rozhodující aspekty dekompozice patří funkční principy systému, poruchovost součástí systému a závažnost rizika z poruchy konkrétní součásti systému. Na základě těchto aspektů byl stanoven další postup. Bylo nutné provést funkční a technickou analýzu stroje, pomocí spolehlivostních metod určit podstatné ukazatele poruchovosti, stanovit následky poruch a zhodnotit rizika při konkrétních poruchách. Postup provádění činností je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 1: Postup bakalářské práce

1.2. Přínosy bakalářské práce

Sledováním vhodných ukazatelů R&M můžeme odhalit kritická místa systému a tím ušetřit nemalé finanční částky. Pomocí nákladů životního cyklu, spočtených právě z ukazatelů R&M, lze snadno porovnávat celkové investice vložené do systému. Investice je možné porovnávat v oblasti jednoho systému, kde lze určit nejnákladnější poruchy systému, určit jejich příčiny, důsledky a popřípadě učinit nápravná opatření. Je také možné porovnávat investice při výběru z více alternativních systémů. Zde můžeme zohlednit efektivitu nebo produktivitu vybraných systémů a vyhodnotit, který systém je ekonomicky výhodnější. Jak je vidět na Obrázku 2, náklady životního cyklu jsou určeny součtem pořizovacích nákladů a nákladů na provozní zabezpečení vztažené k bezporuchovosti, přičemž se snažíme dosáhnout optimálního kompromisu tak, aby byly náklady životního cyklu minimální. Detailnějším sledováním ukazatelů bezporuchovosti spolu s náklady na provoz a údržbu stroje bude moci firma lépe zvažovat výběr a investice do technického vylepšení stroje.



Obrázek 2: Náklady životního cyklu

Pomocí podrobnějšího systému evidence poruch bude také možno řídit počet náhradních dílů na skladě, popřípadě i v konsignačních skladech. Sledováním se tak zamezí nejen zbytečným výdajům za skladování velkého počtu náhradních dílů s nízkou

intenzitou poruch, ale také se zvýší pravděpodobnost, že potřebný náhradní díl bude dostupný. Další výhodou je například možnost určení optimálního demontážního věku prvku. Včasná výměna opotřeбенé součásti může ušetřit náklady vzniklé v důsledku její poruchy. Data je také možné využít pro simulaci a plánování výrobních a skladových kapacit v dlouhodobém časovém horizontu. Tyto simulace by byly bez uvážení poruchových časů dosti zkreslené.

Podrobnější evidence by také měla upozornit na součásti systému s nejrizikovějším výskytem poruch, na příčiny těchto poruch a na možnosti jejich preventivní údržby. Tím by bylo možné zmenšit prostoje stroje, zvýšit jeho pohotovost a dosáhnout tak vyšší efektivity celého výrobního řetězce.

1.3. Lean principles

Výsledky této práce mají napomoci při aplikování systému „Lean principles“ do výrobního procesu podniku ESAB s.r.o.. Lean principles vychází z úspěšného systému výroby TPS (Toyota Production System) a byl vyvinut především pro účely automobilového průmyslu. V dnešní době je však hojně využíván i nad rámec automobilek a například ve Velké Británii je využíván i pro různá jiná průmyslová odvětví než jen automobilová. U nás se těmto projektům začala věnovat pozornost teprve v nedávné době a zatím zde nejsou tolik rozšířeny.

Cílem Lean principles je především zeštíhlení a zefektivnění výrobního řetězce, jeho řízení a plánování pomocí sledovaných výkonových parametrů. Snaží se o vytvoření dokonalého procesu s plynulým tokem. Zabývá se identifikací všech druhů plýtvání a ztrát a následným odstraněním těch nejpodstatnějších z nich. Za největší ztráty jsou považovány ztráty způsobené nadvýrobou, ztráty v zásobách a ztráty z chybných výrobků. K označení těchto problémů, které je nutné okamžitě řešit, je používán termín „3Mu“, který pochází ze tří japonských slov.

- **Muda** - ztráta, nadbytečnost, plýtvání
- **Mura** - nerovnoměrnost, nepravidelnost
- **Muri** - přetížení, nepřiměřenost

K řešení využívá Lean metod, jakými jsou SMED, PULL systémy, Kanban, Just-In-Time, Kaizen událost, 5S, VSM, Poka Yoke, SIPOC, MIFA, ABC analýza atd..

Lean principles zasahuje i do úseku kvality. Jedná se především o řízení a kontrolu jakosti výrobku, udržování a trvalé zlepšování procesů systému managementu jakosti, zajištění spolehlivosti a údržby výrobních zařízení atd.. Právě spolehlivostí a udržitelností výrobních zařízení, konkrétně zlepšením udržitelnosti průmyslového stroje FSW-D, který byl vybrán na základě MIFA analýzy, se bude zabývat tato práce.

Lean se však orientuje i na jiné problémy, jako například recyklace zmetků, výrobních i nevýrobních odpadů, na ochranu životního prostředí (únik nebezpečných látek do ovzduší, recyklace zmetků, recyklace výrobních i nevýrobních odpadů atd.) nebo požadavky na bezpečnost práce (manipulace s nebezpečným odpadem, hodnocení a snižování rizika úrazu atd.).

Je tedy zřejmé, že oblast spolehlivosti a udržitelnosti je ve velké firmě pouhým zlomkem z činností, které je nutno vykonat k dynamicky fungujícímu a rozvíjejícímu se výrobnímu procesu. Předkládaná práce je součástí řešení výše popsanych problémů ve firmě ESAB s.r.o..

2. Spolehlivost - teorie

Tato kapitola je částečně převzata a citována z doporučené literatury [4] kapitoly: 1.4, 2.1, 2.2, 2.5 a 4.2 a z doporučené literatury [5] z kapitol 2 a 4. Na základě teorie z této literatury byla práce vypracována. Byly z ní čerpány vzorce pro výpočty ukazatelů R&M, informace pro vytvoření postupu práce a informace pro zpracování analýz.

2.1. Definice a základní pojmy spolehlivosti

2.1.1. Definice spolehlivosti

Pod pojmem spolehlivost se rozlišuje jednak spolehlivost v širším pojetí (tj. obecně chápaná spolehlivost) a jednak spolehlivost chápaná ve smyslu **ČSN IEC 50(191): 1993 Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spolehlivost a jakost služeb** jako pohotovost. Definice spolehlivosti podle ČSN IEC 50(191) je pak převzata do definic uvedených v ČSN EN ISO 9000: 2001.

Spolehlivost v širším pojetí (tj. obecně chápaná spolehlivost) jako komplexní vlastnost, vyjadřující obecnou schopnost objektu zachovávat funkční a další vlastnosti (tzv. požadované funkce) v čase a za stanovených podmínek. V jednotlivých konkrétních případech se pak tato obecně chápaná spolehlivost vyjadřuje dílčími vlastnostmi - životností, bezpečností, pohotovostí, diagnostikovatelností, skladovatelností atd.

Spolehlivost v užším pojetí, tj. spolehlivost podle norem ČSN EN ISO 9000: 2001, ČSN IEC 50(191): 1993 je chápaná jako pohotovost, která je určena třemi faktory: bezporuchovostí, udržitelností a zajištěností údržby. Vztah mezi oběma pojetími spolehlivosti je uveden na Obrázku 3.

Spolehlivost (ČSN IEC 50(191), definice 191-02-03). Souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržitelnost a zajištěnost údržby.

Poznámka: Spolehlivost se používá pouze pro obecný nekvantitativní popis.



Obrázek 3: Vymezení pojmu spolehlivost

Podle dřívější definice byla spolehlivost charakterizována takto:

Spolehlivost: Pravděpodobnost, s jakou bude objekt schopen plnit bez poruchy požadované funkce po stanovenou dobu a v daných provozních podmínkách.

Tato definice se používala zhruba až do konce 60. let. Z dnešního hlediska redukovala spolehlivost na bezporuchovost. V angličtině byla takto pojatá spolehlivost označována pojmem **Reliability**. Až v pozdějším období se projevila omezenost této definice a byla pozměněna na následující.

Spolehlivost: Obecná schopnost výrobku plnit požadované funkce po stanovenou dobu a v daných podmínkách, která se vyjadřuje dílčími vlastnostmi jako jsou bezporuchovost, životnost, opravitelnost, pohotovost apod.

Zde je již spolehlivost pojímána jako obecná vlastnost, která má svoje další dílčí vlastnosti, pro které také byly definovány konkrétní číselné ukazatele. V angličtině byl však i nadále pro takto definovanou spolehlivost používán název **Reliability**. Nastal problém s terminologií, protože tento pojem byl také používán k označení bezporuchovosti. Tento problém odstranila následující definice.

Spolehlivost: Souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržitelnost a zajištění údržby.

Poznámka: Spolehlivost se používá pouze pro obecný nekvantitativní popis.

2.1.2. Základní pojmy

Riziko

Terminologie spojená s řízením rizika se postupně ustálila. Počáteční problémy při používání termínu "riziko" vznikaly z toho důvodu, že pojem riziko, použitý v běžné řeči, není emocionálně neutrální. Výrok „riziko“ s sebou nese zápornou emoci strachu, obav a je v různých významových odstínech užíváno a překládáno:

- vyhlídka na špatné následky
- matematické očekávání peněžní hodnoty poškození způsobených nebezpečným zdrojem
- jakákoli možnost způsobit škodu, jestliže existuje nejistota, zda tyto škody budou nebo budou realizovány
- pravděpodobnost specifických účinků nastávajících během specifického období nebo za specifických podmínek

Pro potřeby analýzy rizika a řízení rizika je však nezbytné používat definovaný pojem, který lze exaktně vyjádřit. Riziko se intuitivně chápe jako očekávání něčeho nepříznivého. Již v tomto intuitivním pojmání jsou zahrnuty dva oddělené aspekty:

- Očekávání, že dojde k výskytu nějaké nepříznivé situace, události. Událost vzniká náhodně v čase a prostoru.
- Výše újmy spojené s nepříznivou událostí. Výše újmy může být známa předem nebo je náhodného charakteru.

Z výše uvedených souvislostí vyplývá definice rizika formulovaná v souladu s dosavadním všeobecným přístupem převažujícím v praxi:

riziko = pravděpodobnost nastoupení události x následek události

Předností této definice rizika je, že dovoluje riziko kvantifikovat, vyhodnocovat, srovnávat a dále s ním numericky pracovat, což je nezbytným předpokladem úspěšného řízení rizika.

Vyšetřované objekty

Objekty, jejichž spolehlivost se posuzuje, mohou být výrobky nebo služby. V případě výrobku (nejčastější objekt hodnocení spolehlivosti) je vyšetřovaným objektem systém (soustava) nebo její prvek (komponenta, součást). Vyšetřovaný objekt může plnit jednu nebo více funkcí. Hodnocení spolehlivosti se vztahuje vždy k plnění požadované funkce. Z hlediska udržitelnosti lze vyšetřované objekty dále dělit na opravované a neopravované. U opravovaného objektu je obnova funkceschopnosti zajištěna jeho opravou. V případě neopravovaného objektu je obnova funkce, kterou objekt vykonává, zajištěna výměnou porouchaného prvku za nový.

Vlastnosti objektu

U objektu je možné definovat řadu vlastností, které potřebujeme sledovat a hodnotit. Zpravidla nejčastěji sledovanou vlastností objektu je jeho spolehlivost (obecně) vyjádřená dílčími vlastnostmi jako je pohotovost, bezporuchovost, udržitelnost a zajištěnost údržby. K tomu mohou přistupovat další vlastnosti - jako je např. životnost, efektivnost a způsobilost.

Jevy a stavy

U vyšetřovaného objektu lze definovat řadu stavů a jevů. Nejčastěji je objekt charakterizován dvěma stavy: provozuschopným stavem a stavem poruchy. K těmto základním stavům dále přistupuje stav prostoje, kdy objekt v době používání není v provozu. Porucha je jev, při kterém přechází vyšetřovaný objekt z provozuschopného stavu do stavu poruchy. Naopak obnova je jev spočívající v obnovení schopnosti objektu plnit po poruše požadované funkce.

Veličiny

Veličiny sledované ve spolehlivosti úzce souvisí s náhodným výskytem sledovaných jevů. Sledují se tedy veličiny spojené s dobou (časem) - náhodnou proměnnou je zpravidla čas výskytu sledovaného jevu. Jako příklad sledované veličiny lze uvést dobu provozu, dobu provozu do poruchy, dobu provozu mezi poruchami, dobu údržby, dobu opravy apod.

Systém

Systém je množina konečného počtu prvků, které jsou spolu vzájemně provázány vnitřní strukturou. Uspořádání prvků v systému je podřízeno požadované funkci, která je pro systém definována. Systém má vzájemné vazby ke svému okolí - prostředí, kde se nachází. Tyto vazby mohou být hmotné – fyzikální, či nehmotné – abstraktní, resp. informační. Prvek této množiny může být současně prvkem jiné množiny, kde tvoří jiný soubor (systém) s vlastním funkčním určením. Místo, kde je prvek „sdílen“ s jinou množinou (např. jiný systém, funkční prostředí, člověk aj.) se nazývá rozhraní systému. Podmnožiny systému složené ze stejných prvků, jejichž počet je však nižší než konečný počet prvků celého systému, mohou plnit jiné, přesně definované funkce, které se liší od funkce celého systému. Dílčí ukazatele inherentní pohotovosti jednotlivých prvků systému jsou známy. Pro náš případ to znamená, že známe ukazatele bezporuchovosti a nápravné údržby jednotlivých prvků systému.

Objekt

Objekt někdy takéž entita. Jakákoliv část, součást, zařízení, část systému, funkční jednotka, přístroj nebo systém, s kterým je možné se individuálně zabývat. Objekt se může skládat z hardware, ze software nebo z obojího současně a v určitých případech do něho mohou být zahrnuti i lidé. V případě, že bude objekt zmiňován jako výsledek určitých činností nebo procesů, například návrhových, vývojových, výrobních apod., bude nazýván výrobkem (produktem). Při uvádění různých praktických příkladů bude pojem objekt či výrobek podle potřeby nahrazován dalšími konkrétnějšími pojmy jako např. letoun, palivová soustava, brzdový systém, čerpadlo, spínač, ložisko a pod. Pokud je na dané úrovni objekt považován za dále nedělitelný, je označován jako prvek.

Opravovaný objekt

Opravitelný objekt, který se po poruše skutečně opravuje. U tohoto objektu pozorujeme v provozu proud po sobě jdoucích poruch a obnov až do okamžiku dosažení jeho mezního stavu.

Neopravovaný objekt

Objekt, který se po poruše neopravuje. U takového objektu je doba do jeho první poruchy současně dobou do dosažení mezního stavu, tedy dobou užitečného života.

Stavy objektu:

Provoz (*angl. Operating state*) - Stav , kdy objekt plní požadovanou funkci.

Prostoj (*angl. Non – operating state*) - Stav, kdy objekt neplní požadovanou funkci. Když hovoříme o prostoji, nesledujeme příčinu toho proč objekt neplní funkci, ale pouze skutečnost, že ji neplní. Příčinou prostoje může být jak porucha, provádění preventivní údržby či nezajištěnost vnějších zdrojů, tak i skutečnost že v daném okamžiku činnost objektu nevyžadujeme a proto jsme jeho provoz přerušili.

Použitelný stav (*angl. Up - state*) - Stav objektu charakterizovaný skutečností, že objekt může plnit požadovanou funkci za předpokladu, že vnější prostředky, jsou-li požadovány, jsou zajištěny.

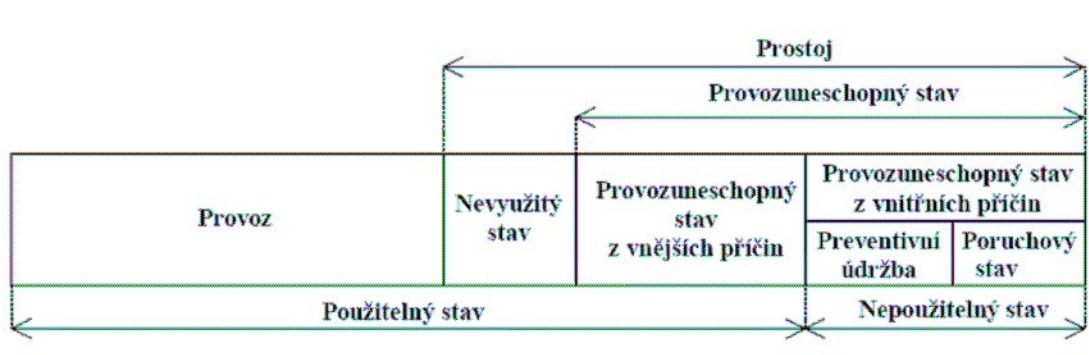
Neobsazený, nevyužitý stav (*angl. Free, Idle state*) - Prostoj objektu v použitelném stavu v době, kdy není jeho funkce požadována.

Poruchový stav (*angl. Fault*) - Stav objektu charakterizovaný neschopností plnit požadovanou funkci, kromě neschopnosti během preventivní údržby nebo jiných plánovaných činností, nebo způsobený nedostatkem vnějších zdrojů. Poruchový stav je zpravidla výsledkem poruchy vlastního objektu, může však existovat bez předchozí poruchy. Jako opak k tomuto stavu se často používá termín **bezporuchový stav**, ve kterém se objekt nachází vždy když není v poruchovém stavu.

Provozuneschopný stav (*angl. Disabled state*) - Stav objektu charakterizovaný jeho neschopností z jakýchkoliv důvodů plnit požadovanou funkci.

Provozuneschopný stav z vnějších příčin (*angl. External disabled state*) – Podmnožina provozuneschopného stavu, kdy je objekt v použitelném stavu, ale nemá požadované vnější prostředky nebo je provozuneschopný z důvodů jiných plánovaných, operací než je údržba.

Provozuneschopný stav z vnitřních příčin (*angl. Internal disabled state*) – Stav objektu, charakterizovaný buď poruchovým stavem, nebo možnou neschopností plnit požadovanou funkci během preventivní údržby.



Obrázek 4: Klasifikace stavu objektů

2.2. Ukazatele spolehlivosti

Definice ukazatelů spolehlivosti jsou uvedeny v **ČSN IEC 50(191) Mezinárodní elektrotechnický slovník - kapitola 191: Spolehlivost a jakost služeb**.

Funkce okamžité pohotovosti (ČSN IEC 50(191), definice 191-11-01).

$A(t)$

Pravděpodobnost, že objekt je ve stavu schopném plnit v daných podmínkách a v daném časovém okamžiku požadovanou funkci, za předpokladu, že požadované vnější prostředky jsou zajištěny.

Funkce okamžité nepohotovosti (ČSN IEC 50(191), definice 191-11-02).

$U(t)$

Pravděpodobnost, že objekt není ve stavu schopném plnit v daných podmínkách a v daném časovém okamžiku požadovanou funkci, za předpokladu, že požadované vnější prostředky jsou zajištěny.

Součinitel střední pohotovosti (ČSN IEC 50(191), definice 191-11-03).

$A(t_1, t_2)$

Střední hodnota funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ v daném časovém intervalu (t_1, t_2) .

Součinitel střední nepohotovosti (ČSN IEC 50(191), definice 191-11-04).

$U(t_1, t_2)$

Střední hodnota funkce okamžité nepohotovosti $U(t)$ v daném časovém intervalu (t_1, t_2) .

Pravděpodobnost bezporuchového provozu (ČSN IEC 50(191), definice 191-12-01).

$R(t1, t2)$

Pravděpodobnost, že objekt může plnit požadovanou funkci v daných podmínkách v daném časovém intervalu $(t1, t2)$.

Poznámky:

1. Obecně se předpokládá, že objekt je ve stavu schopném plnit tuto požadovanou funkci na začátku časového intervalu.
2. Termín „**reliability**“ se v angličtině užívá k označení bezporuchovosti jako vlastnosti, kvantifikované touto pravděpodobností. (viz. 191-02-06).

Intenzita poruch (okamžitá) (ČSN IEC 50(191), definice 191-12-02).

$\lambda(t)$

Limita poměru podmíněné pravděpodobnosti, existuje-li, že časový okamžik T vzniku poruchy objektu leží v daném časovém intervalu $(t, t+dt)$ k délce časového intervalu dt , jestliže dt se blíží nule, za podmínky, že na začátku časového intervalu je objekt v použitelném stavu.

Poznámka: „ T “ může v té to definici označovat podle potřeby rovněž dobu poruchy nebo dobu do první poruchy.

Střední intenzita poruch (ČSN IEC 50(191), definice 191-12-03).

$\lambda(t1, t2)$

Střední hodnota okamžité intenzity poruch v daném časovém intervalu $(t1, t2)$.

Střední doba do poruchy (ČSN IEC 50(191), definice 191-12-07).

Očekávaná doba do poruchy, anglická zkratka MTTF.

Střední doba do první poruchy (ČSN IEC 50(191), definice 191-12-06).

Očekávaná doba do první poruchy, anglická zkratka MTTF.

Střední doba provozu mezi poruchami (ČSN IEC 50(191), definice 191-12-09).

Očekávaná doba provozu mezi poruchami, anglická zkratka MTBF.

Intenzita opravy (okamžitá) (ČSN IEC 50(191), definice 191-13-02).

$\mu(t)$

Limita poměru podmíněné pravděpodobnosti, existuje-li, že zásah údržby po poruše skončí v časovém intervalu $(t, t+dt)$, k délce tohoto časového intervalu dt , jestliže dt se blíží nule, za podmínky, že tato operace neskončila do začátku časového intervalu.

Střední intenzita opravy (ČSN IEC 50(191), definice 191-13-03).

$\mu(t1, t2)$

Střední hodnota okamžité intenzity opravy v daném časovém intervalu $(t1, t2)$.

Střední doba opravy (ČSN IEC 50(191), definice 191-13-05).

Očekávaná doba opravy, anglická zkratka MRT.

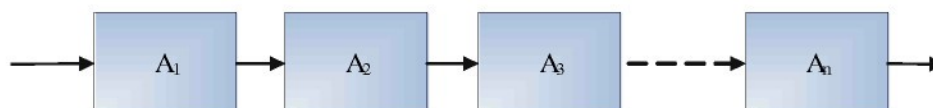
Střední doba do obnovy (ČSN IEC 50(191), definice 191-13-08).

Očekávaná doba do obnovy, anglická zkratka MTTR.

2.3. Blokové modely

2.3.1. Sériový model

Sériový systém je nejjednodušší a často se vyskytující strukturou v analýzách bezporuchovosti systémů. Pro jeho charakteristiku platí, že při poruše kteréhokoliv jednotlivého prvku objektu dojde k poruše celého systému (ukončení jeho schopnosti plnit požadované funkce). Příklad grafických modelů sériového systému je na Obrázku 5.



Obrázek 5: Blokový diagram sériového systému

Jestliže známe pravděpodobnost bezporuchového provozu $R_i(t)$ pro každý prvek A_i , je výsledná pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ dána součinem těchto prvků.

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.1)$$

Při konstantní intenzitě poruch všech prvků tedy dostaneme, že

$$R(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

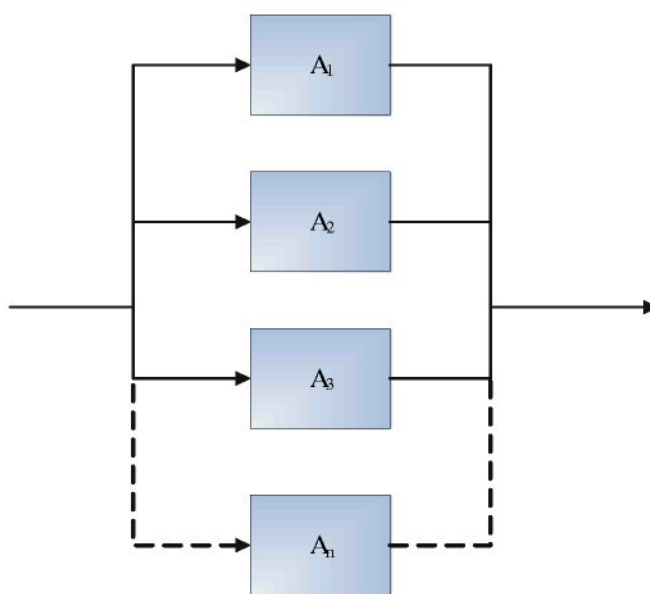
kde λ je výsledná intenzita poruch systému. Výslednou intenzitu λ získáme jako součet intenzit dílčích prvků.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2.3)$$

Sériový systém se tedy nachází v bezporuchovém stavu tehdy a jen tehdy, jsou-li v daném okamžiku současně v bezporuchovém stavu všechny jeho prvky. Analogicky se sériový systém nachází v poruchovém stavu tehdy, je-li v daném okamžiku v poruchovém stavu alespoň jeden jeho prvek

2.3.2. Paralelní model

Paralelní strukturou nazýváme takové funkční uspořádání systému, pro které bez ohledu na jeho konkrétní konstrukční a technologické provedení platí, že k poruše systému (ukončení jeho schopnosti plnit požadované funkce) dojde až při současné poruše všech jeho prvků. Příklad blokového schématu paralelního systému je na Obrázku 6.



Obrázek 6: Blokový diagram paralelního systému

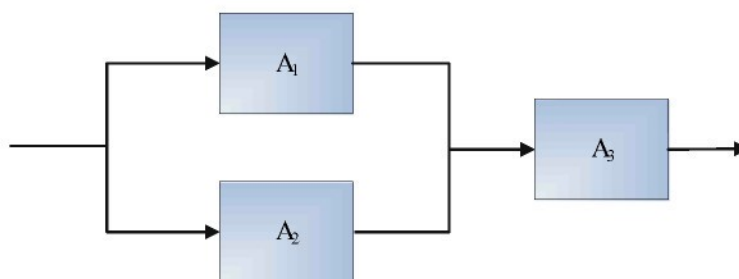
Paralelní systém se tedy nachází v bezporuchovém stavu tehdy, je-li v bezporuchovém stavu alespoň jeden jeho prvek. Analogicky se paralelní systém nachází v poruchovém stavu tehdy a jen tehdy, jsou-li v poruchovém stavu současně všechny jeho prvky. Předpokládejme pravděpodobnost poruchy i -tého prvku systému $P_i(t)$. Nejsou-li poruchy vzájemně závislé, paralelní systém složený z n -prvků můžeme charakterizovat následujícími rovnicemi:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (2.4)$$

Pravděpodobnost bezporuchového provozu se pak vypočte následovně

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (2.5)$$

2.3.1. Kombinovaný model



Obrázek 7: Blokový diagram kombinovaného systému

Tyto modely se řeší na základě dvou předchozích modelů a to buď pomocí metody dekompozice nebo pomocí inspekční metody.

2.4. Analýzy FMECA, FTA, RBD a Paretův diagram

2.4.1. Hlavní etapy analýzy spolehlivosti

V principu lze činnosti prováděné při prediktivní analýze spolehlivosti dělit na čtyři hlavní etapy:

- funkční a technická analýza
- kvalitativní analýza
- kvantitativní analýza
- syntéza výsledků analýzy

Funkční a technická analýza

V této etapě jsou shromažďována první data o systému a jeho účelu, cílových vlastnostech, funkčních a technických charakteristikách. Jde o data a informace nezbytné pro definování systému a jeho vlastností. Především je nutné shromáždit co nejpodrobnější informace o prvcích z nichž je systém vytvořen. Je provedena první (předběžná) funkční analýza, která by měla vyústit v podrobnější identifikaci a definování hlavních funkcí systému. Je to také předběžná (první) etapa kvalitativní analýzy, která pomáhá zkompletovat údaje potřebné v dalších etapách analýzy, především pomůže identifikovat všechny funkce a jejich omezení.

Kvalitativní analýza

Konečným cílem kvalitativní analýzy je vyhledat všechny poruchy, jejich příčiny a popsat důsledky, které poruchy mohou mít a specifikovat jejich vliv na funkci systému. Existuje velký počet formálních postupů provedení analýzy a je na analytikovi, aby k danému účelu zvolil nejlepší s ohledem na podklady, které má k dispozici a na cíle analýzy. Kvalitativní analýza poslouží především k vybudování odpovídajícího modelu spolehlivosti systému. Model musí vycházet ze strukturního členění systému a z předpokladů přijatých pro řešení.

Modelování spolehlivosti systému je těsně svázáno s modelováním fyzikálních jevů a procesů, které mohou vyústit v určité fázi provozu až do poruchového stavu. Analytik je nucen postavit a analýzou ověřit řadu hypotéz a předpokladů o správné nebo poruchové funkci vztahující se k analyzovanému systému. Kvalita provedené analýzy je přímo závislá na použitém modelu funkčnosti, který musí postihovat co nejpřesněji všechny významné poruchy a jejich vzájemné souvislosti. Nezbytné je stanovení rozsahu, zaměření a hloubky analýzy, tj. do jaké hloubky funkčního členění bude analýza provedena. V souladu s požadavkem na hloubku analýzy musí být provedeno i strukturní rozčlenění systému na prvky. Analýzu není účelné provádět do větší hloubky, než do jaké jsou k dispozici konkrétní informace o spolehlivosti prvků systému, zejména o možných poruchách, jejich příčinách a důsledcích.

Kvantitativní analýza

V rámci kvantitativní analýzy se provádí výpočet (odhad) kvantitativní (číselné) hodnoty vhodně vybraných ukazatelů spolehlivosti. Číselnou hodnotu ukazatele spolehlivosti lze získat vhodnou a dovolenou manipulací s modelem a uvážením elementárních jevů, které model strukturovaně spojuje v analyzovaný stav systému. Mimo dovolené manipulace s modelem, správný výběr vstupních elementárních jevů a vstupních údajů, je dále nezbytné uvážit:

- dobu provozu na níž se vztahuje analýza (doba trvání úkolu - mise, fáze provozu, apod.)
- způsoby ověřování správné funkce záložních prvků subsystémů, dobu provádění zkoušek
- zásady provádění preventivní a nápravné údržby (frekvenci a dobu trvání)
- přípustný rozsah a rychlost změny provozních podmínek

Protože samotný model a všechny předchozí veličiny mají ze své podstaty stochastickou povahu, řídí se stochastickými zákony a jsou proto zatíženy určitou nejistotou ve svých vlastnostech, je i výsledek analýzy zatížen určitou mírou nejistoty, kterou je možné snižovat, ale nelze zcela odstranit. Nejistoty jsou např. spojeny s posouzením důsledků poruch prvků na závažnost poruchy systému, s odhadem pravděpodobností vzniku poruchy prvků, s posouzením vlivu změny provozních podmínek na vznik poruchy apod. Tyto nejistoty můžeme posoudit a do jisté míry zmenšit analýzou citlivosti systému na uvedené náhodné vlivy.

Kvantitativní analýzy je možné obecně provádět „ručně“ pokud jsou systémy jednoduché a ne příliš rozsáhlé, jinak se provádí pomocí výpočetní techniky a speciálních, k tomu účelu vypracovaných programů.

Syntéza výsledků analýzy

Syntéza informací a závěry z kvalitativní a kvantitativní analýzy ukáže ty poruchy a jejich kombinace, na nichž je nejvíce závislá spolehlivost systému, odhalí nejkritičtější prvky systému nebo nejvýznamnější funkce systému. Tímto způsobem lze rozhodnout o takových technických či technologických opatřeních, která nejúčinnějším a nejrychlejším způsobem povedou ke zvýšení spolehlivosti, konkrétně bezporuchovosti, bezpečnosti, pohotovosti, udržitelnosti a jiných vlastností systému. Ze závěrů analýzy je možné usoudit, zda systém splnil nebo nesplnil požadavky na jeho spolehlivost a bezpečnost. Stejně tak analýza může posloužit i k jiným praktickým krokům:

- zvýšení úrovně spolehlivosti prvků;
- změna v zálohování prvků;
- zdůvodnění nezbytnosti dodatečného zálohování prvků;
- odstranění nadbytečného zálohování;
- dodatečné ochrany nebo monitorování funkcí prvků;
- nezbytnosti zabudování ochrany systému před poruchou společných prvků;
- předepsání kontrolu správné funkce prvků se skrytými poruchami;
- úprava preventivních údržbových operací;
- změna charakteru a period kontrolních zkoušek;
- minimalizace rizika vlivu lidského faktoru na spolehlivou funkci systému apod.

Analýza poskytuje celou řadu dalších užitečných informací, využitelných při organizaci, řízení a kontrole provozu. Dává též první podklady pro objektivní plánování systému logistické podpory budoucího provozu.

2.4.2. FMECA (*Fault mode, effects and criticality analysis*)

Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch je analýza potenciálně možných druhů a důsledků poruchových stavů s uvažováním pravděpodobnosti jejich výskytu a uspořádáním podle stupně závažnosti poruchových stavů (závažnost důsledků je posuzována podle specifikované stupnice). FMECA je rozšířením metody FMEA, která jí zpravidla předchází.

2.4.3. FTA (*Fault tree analysis*)

Analýza stromu poruchových stavů je deduktivní (shora dolů) analýza, prováděná ve tvaru stromu poruchových stavů. Slouží k určení druhů poruchových stavů částí systému nebo vnějších jevů nebo jejich kombinací, které by mohly vést ke stanovenému druhu poruchového stavu systému. Pro vymezenou tzv. vrcholovou událost (např. kritická porucha systému) se zjišťují všechny možné příčiny nebo druhy poruchových stavů na nejbližší nižší funkční úrovni systému. Takto lze postupovat až na požadovanou nejnižší úroveň systému, kdy příčinami jsou obvykle druhy poruchových stavů součástí. Výsledky analýzy se zobrazují jako strom poruchových stavů, který pak může být základem kvantitativní analýzy.

2.4.4. RBD (*Reliability Block Diagramme*)

Analýza blokového diagramu bezporuchovosti je deduktivní metoda analýzy bezporuchovosti pomocí blokového schématu, které je grafickým zobrazením struktury systému. Znázorňuje pro zvolenou úroveň rozkladu systému pro jeden nebo více způsobů jeho fungování závislost, jak poruchové stavy jeho prvků, reprezentované bloky nebo jejich kombinacemi, vedou k jeho poruchovému stavu. To umožňuje zobrazit cestu úspěchu (např. bezporuchového stavu systému) způsobem zapojení bloků (podsystemů, eventuálně až součástí) blokového diagramu. Metoda se používá pro předpověď hodnot ukazatelů bezporuchovosti, příp. pohotovosti.

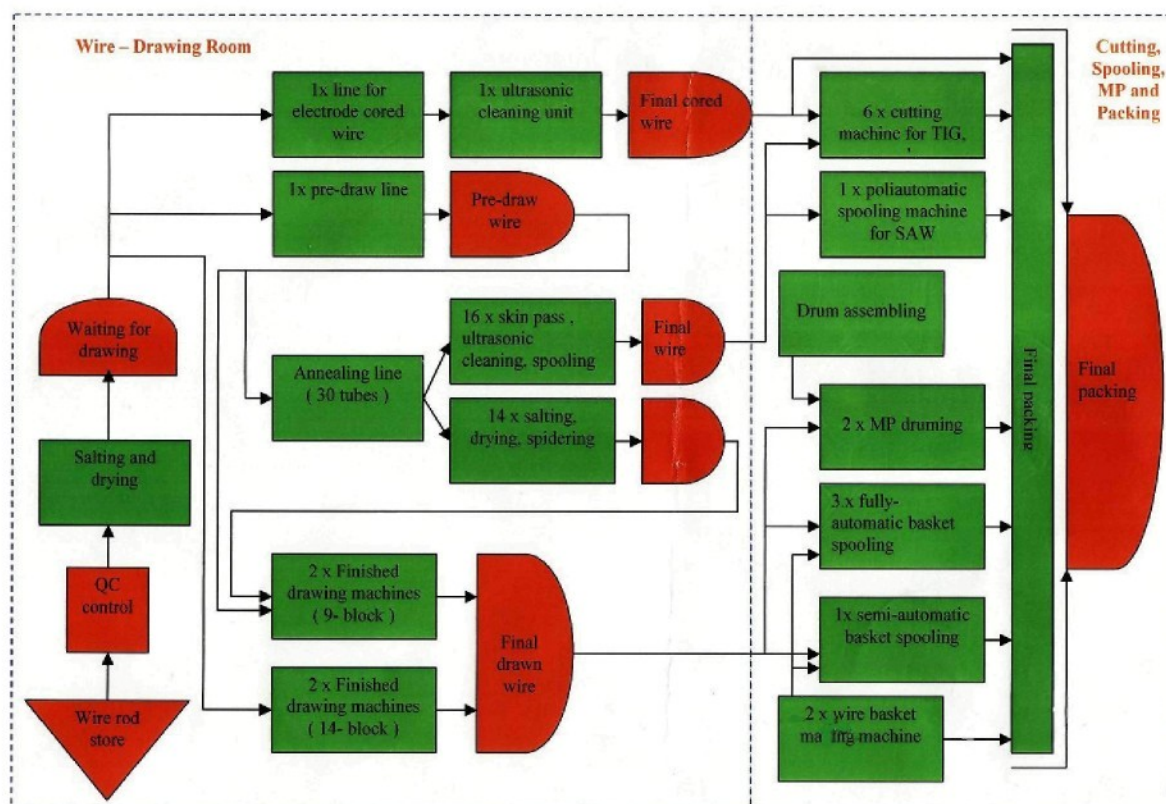
2.4.5. Paretova analýza

Paretova analýza je metoda pro velmi efektivní určení podstatných faktorů problému. Nejprve příčiny seřadíme dle počtu jimi způsobených následků. Dle Paretova rozdělení dále analyzujeme, které příčiny způsobují největší objem následků. Těmito příčinami se budeme dále zabývat. Tato analýza spadá pod kvantitativní analýzy a slouží zejména k oddělení podstatných faktorů problému od nepodstatných. Paretova optima dosáhneme tehdy, nemůžeme-li dosáhnout zlepšení na jedné straně, aniž bychom nic nezhoršili na straně druhé.

3. MIFA výrobního procesu SSW - výběr stroje

Jak již bylo řečeno v úvodní části této práce, nový protokol je nutno sestavit téměř u všech strojů. Kvůli časové náročnosti vytvoření protokolu je však třeba začít strojem, u kterého bude nový protokol nejúčelnější. Jak co nejlépe zhodnotit, který to je? K tomuto účelu mohou posloužit různé metody a analýzy. V rámci projektu Lean Principles byla pro náš případ vybrána analýza MIFA.

Tato analýza má za úkol podrobně zmapovat celý proces výroby, vždy pro jeden finální produkt. Tyto mapy se pak spojují a tím získáváme přehlednou mapu celé výroby, která nám dává potřebný nadhled na věc. Na základě dat o produktivitě výrobků byly vybrány čtyři nejčastěji vyráběné finální produkty (MPAC sud a cívka – drát $\Phi 0,9\text{mm}$ a $\Phi 1,0\text{mm}$). Ty postačili k zmapování všech strojů na SSW, u nichž je potřebná renovace protokolu.



Obrázek 8: Výchozí mapa procesů na SSW

Naše mapa vycházela z Obrázku 8, z něhož byly vybrány pouze dvě finální cesty - pro každý typ balení jedna. Cesta není ovlivněna průměrem drátu, sled výrobních procesů je stejný, mění se pouze parametry ukazatelů (průchodnost, takt). U každého procesu, který leží na této cestě, je třeba určit jeho pohotovost a průchodnost. Z těchto parametrů již můžeme usoudit, který stroj by byl tím nejvhodnějším. V MIFA analýze se však výpočet těchto ukazatelů liší od výpočtu uvedeného v normě, proto budou následující hodnoty určující jen pro oblast MIFA analýzy. Pohotovost se zde počítá následujícím způsobem.

$$A = \frac{F}{D} \quad (3.1)$$

přičemž platí že

$$F = D - E$$

$$D = B - C$$

z toho plyne, že

$$A = \frac{B - C - E}{B - C} \quad (3.2)$$

A...Pohotovost (Availability)

B...Celkový čas směny (Total shift time)

C...Plánované odstavení (Planned downtime - obědy, schůzky, školení atd.)

D...Možný čas produkce (Net available time)

E...Neplánované odstavení (Other downtime - poruchy, seřízení, výměny, problémy s kvalitou)

F...Reálný čas produkce (Operation time - čas přidávající hodnotu)

V tomto případě pohotovost nepoukazuje na čas, který zmíněný stroj opravdu pracuje ku celkovému času, po který by pracovat měl. Udává procentuální poměr reálného času produkce ku celkovému dostupnému času produkce, jinak řečeno poměr času přidávajícího hodnotu ku celkovému dostupnému času produkce.

$$VCT = C_T - C_O \quad (3.3)$$

$$F = C_T - C_O - S = VCT \quad (3.4)$$

$$D = C_T$$

VCT...Čas přidávající hodnotu (Value-creating time)

S...Čas odstavení stroje z důvodu poruchy nebo seřízení

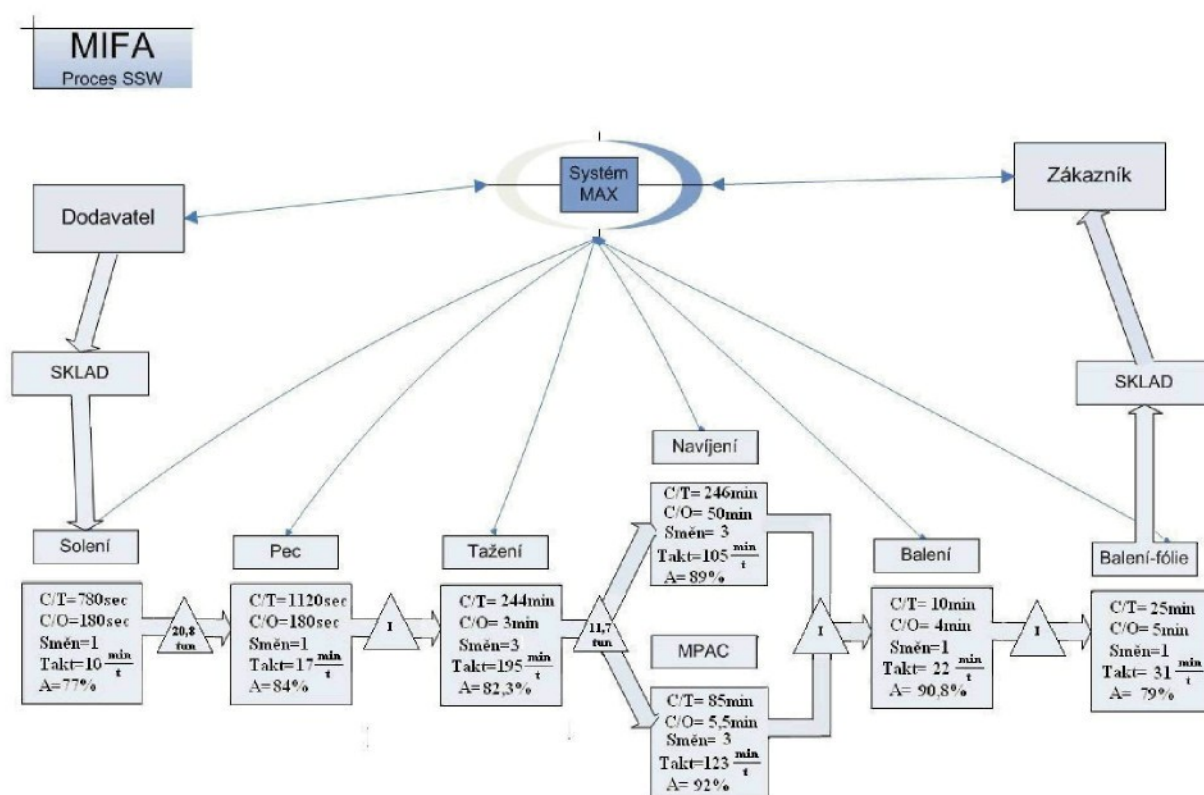
C_T ...Čas jednoho cyklu (Cycle Time)

C_O ...Čas jedné výměny (Changeover time - činnost nepřidávající hodnotu)

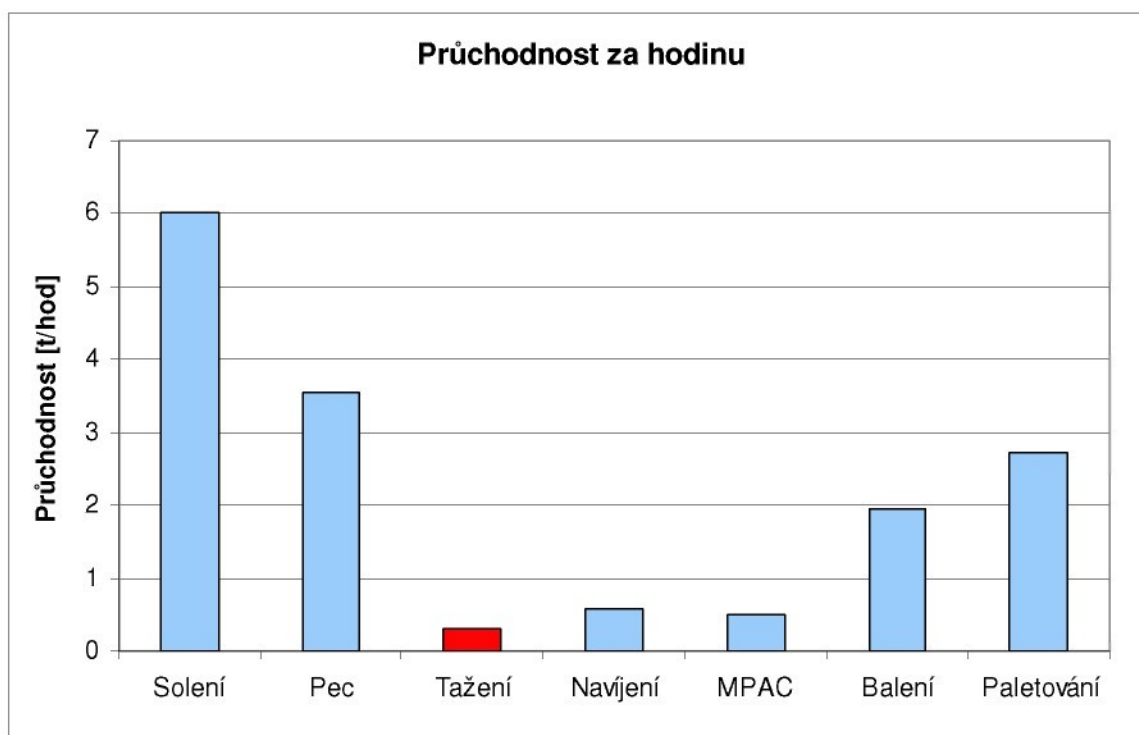
U každého procesu tedy musela být provedena měření časů C_T a C_O vzhledem k jednomu cyklu stroje. Ostatní informace nám byly dostupné z databáze. Všechny získané údaje byly přepočteny na období jedné směny a pomocí výše uvedeného vzorce byla stanovena pohotovost každého z procesů. Z údajů o výrobě byla získána a k tomuto období vztažena i velikost průchodnosti procesu. Pro lepší přehlednost je v grafu uvedena i průchodnost vztažená k 1 hodině, přičemž uvažujeme, že jedna směna trvá 8 hodin. Počet směn jednotlivých procesů je uveden Obrázku 9 i v Tabulce 1. Výsledná mapa pro zvolené produkty vypadá následovně.

Tabulka 1: MIFA analýza

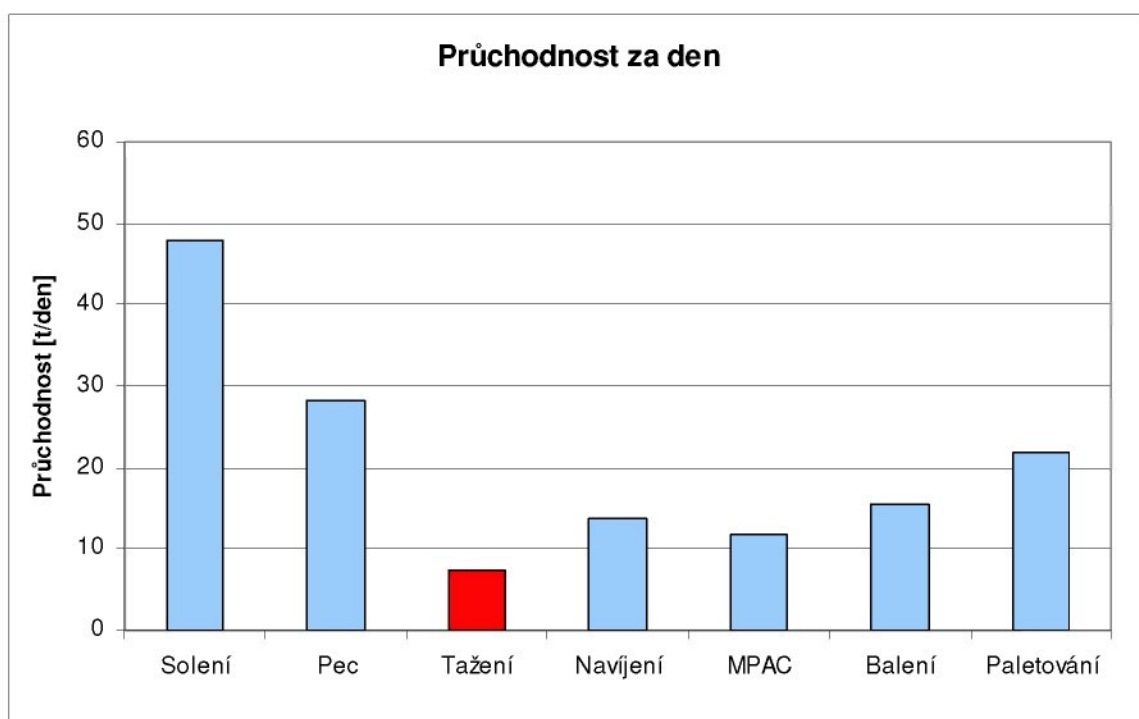
Proces	Solení	Pec	Tažení	Navíjení	MPAC	Balení	Balení-fólie
Pohotovost [%]	77,0	84,0	82,3	89,0	92,0	79,0	92,8
Průchodnost [t/den]	48,00	28,24	7,44	13,68	11,76	15,52	21,84
Průchodnost [t/hod]	6,00	3,53	0,31	0,57	0,49	1,94	2,73
Takt [hodina/t]	0,17	0,28	3,25	1,75	2,05	0,52	0,37
Směna [hod/den]	8	8	24	24	24	8	8



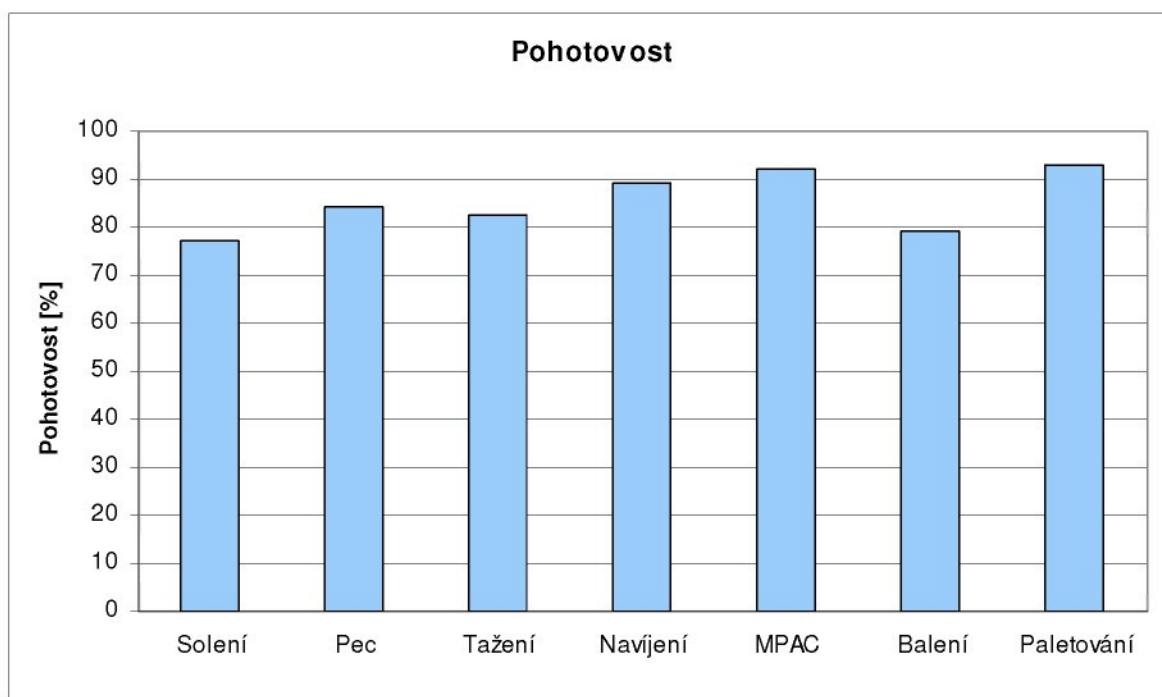
Obrázek 9: MIFA - finální mapa procesů



Obrázek 10: Graf průchodnosti jednotlivých procesů (1)



Obrázek 11: Graf průchodnosti jednotlivých procesů (2)



Obrázek 12: Graf Pohotovosti jednotlivých procesů

Jak je patrné z grafů, úzkým místem provozu, tzv. bottleneckem, je v tomto úseku výroby proces tažení, tedy tažná linka FSW-D. Rozdíly v pohotovosti procesů nejsou příliš markantní. Tyto argumenty nás vedly k tomu, aby se první nový protokol navrhl právě pro tažnou linku, která se se svou pohotovostí 82,3% zároveň stává i místem s prostorem pro zlepšení.

4. Funkční a technická analýza systému

Tato kapitola částečně vychází z podnikové dokumentace.

Úkolem tažné linky je opracovat nerezový drát z původního průměru na nový, předem stanovený průměr. Drát musí být nejprve odmotán z předpřipravených kruhových svitků a navinut do drátotahu. Drátotah obsahuje 14 shodných bloků, ve kterých je drát opracováván na daný průměr. Drát dále musí projít čistící jednotkou a olejovacím zařízením. Před navinutím je nutné synchronizovat rychlosti mezi výstupem drátotahu (14-tý blok) a vstupem posledního prvku systému (navíjedlo). K tomuto účelu nám slouží synchronizační dancer. Finální činností tohoto procesu je navinutí. Cílový produkt je navinut na cívku (zvanou jumbo) pomocí motorového navíjedla. Tento postup dále uvažujeme jako požadovanou funkci systému.



Obrázek 13: Linka FSW-D (1)



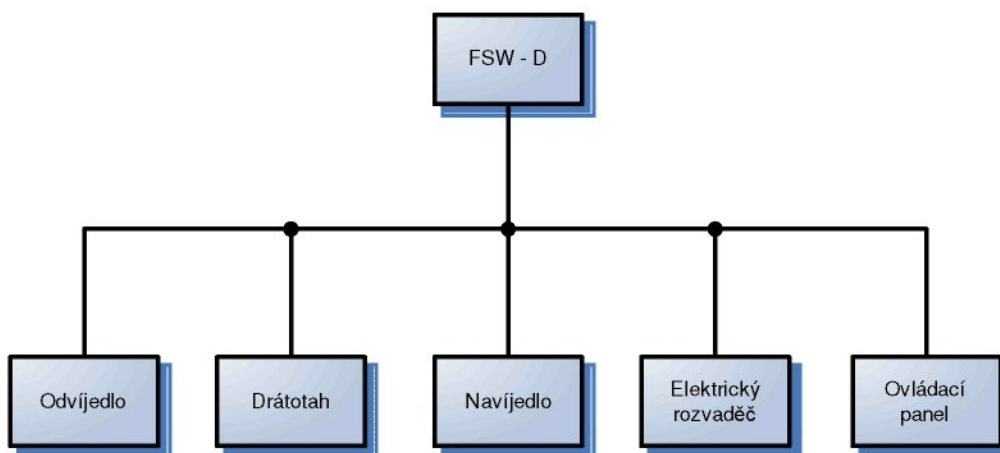
Obrázek 14: Linka FSW-D (2)

Již v této části budu stroj funkčně rozdělen tak, jak by to mohlo být vhodné i při pozdější dekompozici.

Zařízení jsem funkčně rozčlenil do pěti hlavních bloků:

- odvíjedlo
- drátotah
- navíjedlo
- elektrický rozvaděč
- ovládací panel

Bloky odvíjedlo, drátotah a navíjedlo obsahují další podbloky. Elektrický rozvaděč a ovládací panel se již dále nečlení.



Obrázek 15: Konstrukční uspořádání systému FSW-D

4.1. Technický a funkční popis systému - odvíjedlo

Odvíjedlo SVV 2000 je statický stroj, který lze rozdělit do dvou hlavních sekcí. Každé sekci je přidělena jistá funkce.

1.sekce - slouží k odvíjení válcovaného drátu

2.sekce - slouží k odvíjení drátu v průběhu výroby pomocí akumulčního zařízení

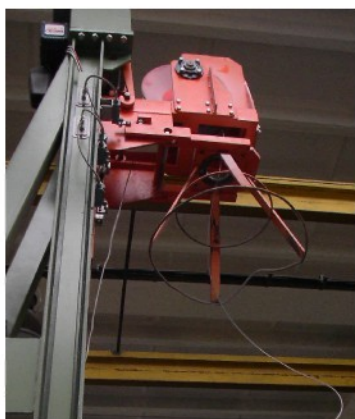


Obrázek 16: Odvíjedlo

4.1.1. Zařízení na zvedání cívky

Stroj obsahuje dva držáky na cívky vyrobené z elektricky svařované oceli. Jejich tvar je přizpůsoben k uložení kruhových cívek. Je to pohyblivá část odvíjela, jejíž sklopný pohyb umožňuje snadné horizontální uložení cívky na držák a následné naklopení do vertikální polohy určené pro odvíjení drátu. Sklopný pohyb konstrukce je prováděn hydraulickými válci.

4.1.2. Jezdec (vozík) a pohyblivá kladka



Obrázek 17: Jezdec

Jezdec je umístěn na vrcholu odvíjela a pohybuje se vertikálně z horní úvratě do dolní a naopak. Je opatřen ocelovou kladkou a senzorem, které jsou užitečné v případě přetržení drátu. Dále také drezúrou, jež vyrovnává drát odvíjející se z cívky, než se dostane na pohyblivou a dále také na pevnou kladku. Během chodu stroje se kladka nachází v horní části konstrukce, ale je možné jí stáhnout dolů, aby se drát snadněji zaváděl. Tento pohyb je realizován pomocí kladkostroje.

4.1.3. Bezpečnostní háčky

Úkolem bezpečnostních háčků je držet jezdec, který je v pracovní poloze (nahore). Tímto způsobem bezpečnostní háčky brání vypadnutí článků řetězu v případě zachycení přetrženého drátu.

4.1.4. Pevná kladka

Pevná kladka řídí drát vycházející z pohyblivé kladky na jezdec a potom ho směřuje na drátotah. Tato kladka řídí také drát vycházející z akumulárního zařízení v první sekci.



Obrázek 18: Pevná kladka

4.1.5. Hydraulický systém

Hydraulický systém napájí hydraulické válce, které pohánějí pohyb držáků kruhových cívek.

4.1.6. Pneumatický systém

Elektroventil pohání pneumatický válec a ten zajišťuje otvírání a zavírání bezpečnostních háčků, když je jezdec v pracovní poloze.

4.1.7. Pohyb vozíku

Jezdcem lze pohybovat pouze ve vertikální ose a to jenom tehdy, když stroj stojí. Pohyb je řízen z ovládacího panelu a jeho rychlost je regulována horním a dolním mikrovypínačem.

Klesání: jezdec jede dolů minimální rychlostí, až dosáhne mikrovypínače, který zajistí uvolnění bezpečnostních háčků. Po uvolnění jezdec zrychlí, až dosáhne spodního mikrovypínače, a poté jede pomalu až k dorazu .

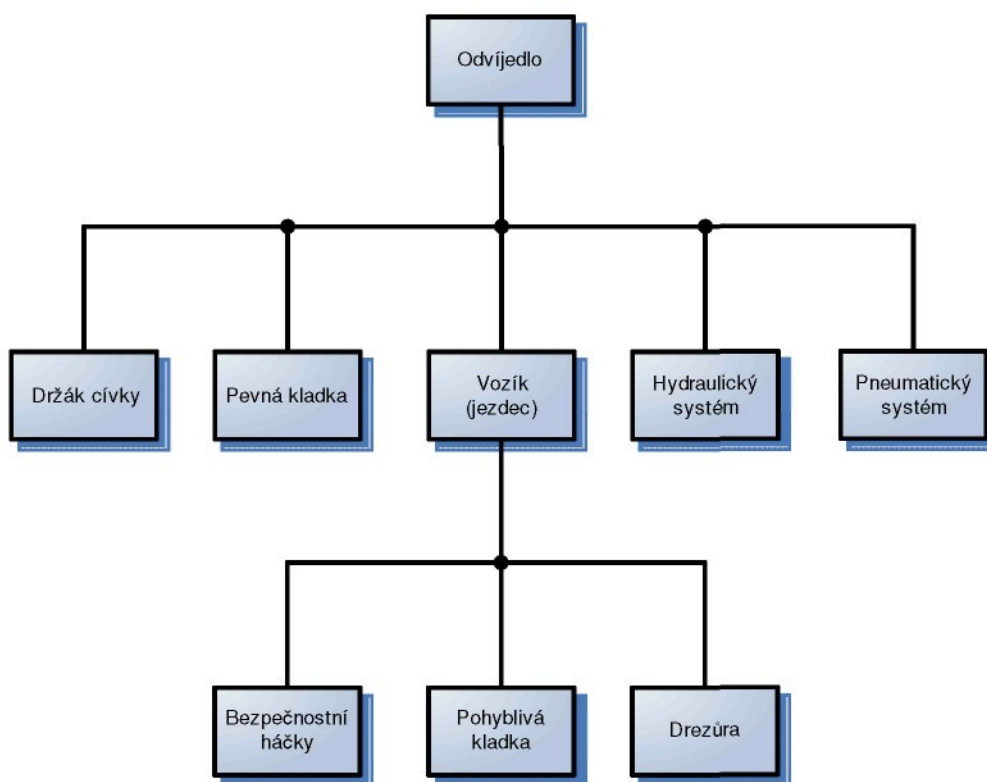
Zvedání: vozík jede nahoru vysokou rychlostí, až dosáhne spodního mikrovypínače, kde zpomalí. Po dosažení horního mikrovypínače, který zajistí zablokování bezpečnostních háčků, jde vozík pomalu nahoru , až dojde k dorazu.



Obrázek 19: Hydraulika držáků
cívky

4.1.8. Pohyb držáků cívky

Elektrické čerpadlo pohání hydraulický válec, který ovládá sklopný pohyb držáků . Pohyb jednotlivých držáků je řízen ovládacím panelem. Držáky se mohou pohybovat vždycky, když není stroj v pohotovostním módu.



Obrázek 20: Konstrukční uspořádání odvíjedla

4.2. Technický a funkční popis systému –drátotah

Tato část stroje zajišťuje hlavní činnost celého systému. Obsahuje 14 shodných bloků, ve kterých se drát opracovává na nižší průměr. Každý z bloků obsahuje dva válce pro vedení drátu, vyrovnávač tahu, antivibrační zařízení, přeskakovač bloků, chlazení, mýdlový box, digitální invertor, frekvenční měnič a průvlak pro opracování drátu. Všechny tyto části jsou z bezpečnostních důvodů pod ochrannými kryty.



Obrázek 21: Drátotah (jeden blok)



Obrázek 22: Vstup drátotahu

Konstrukce drátotahu je vyrobeno ze svážené oceli. Na této konstrukci jsou upevněny elektromotory, které přes hřídele a převodovky pohánějí točivé válce. Rychlost otáček motorů je řízena digitálními invertory, které pomocí frekvenčních měničů snímají polohu vyrovnávačů tahu.

4.2.1. Válce

Válce jsou vyrobeny z kované oceli. Každý válec má poniklovaný vnitřní povrch a je výborně staticky i dynamicky vyvážen. Válce jsou nakloněny ve vodorovné ose a rychlost jejich otáček je řízena vyrovnávači tahu. Průměry válců jsou různé, na bloku 1-7 je $\varnothing 560\text{mm}$ a na bloku 8-14 je $\varnothing 400\text{mm}$.



Obrázek 23: Válce drátotahu

4.2.2. Antivibrační zařízení

Zařízení je instalováno před válcem a je tvořeno ramenem, které tlačí drát směrem dolů a tím redukuje nežádoucí vibrace při navíjení na válec.

4.2.3. Přeskakovač bloků

Zařízení slouží k pouhému vynechání jednoho z bloků drátotahu. Drát není veden přes válce vynechaného bloku, ale je pomocí tohoto zařízení natažen přímo na další blok.



Obrázek 24: Vyrovnávač tahu, válec, přeskakovač bloků

4.2.4. Vyrovnávače tahu

Vyrovnávače zajišťují spojitou kontrolu protisměrného tahu drátu. Tento tah vzniká v závislosti na rychlosti navíjení drátu na válec. Rychlost válce je zase zpětně řízena poziční výchylkou vyrovnávacího ramene od centrální pozice ramene tak, aby nedošlo k narušení drátu.

4.2.5. Digitální invertor a frekvenční měnič

Pomocí digitálního invertoru je přes elektromotor řízena rychlost otáčení válců. Invertor získává data z frekvenčního měniče. Ten převádí signál z čidla měřícího výchylku vyrovnávacího ramene na data určená digitálnímu invertoru. Digitální invertor se snaží přizpůsobit a udržovat nominální rychlost válců. Invertor i měnič jsou uloženy v oddělené ocelové skřínce

4.2.6. Průvlak

Slouží k opracování drátu. Obsahuje diamanty zkosené pod přesným úhlem.

4.2.7. Chlazení a mýdlové boxy

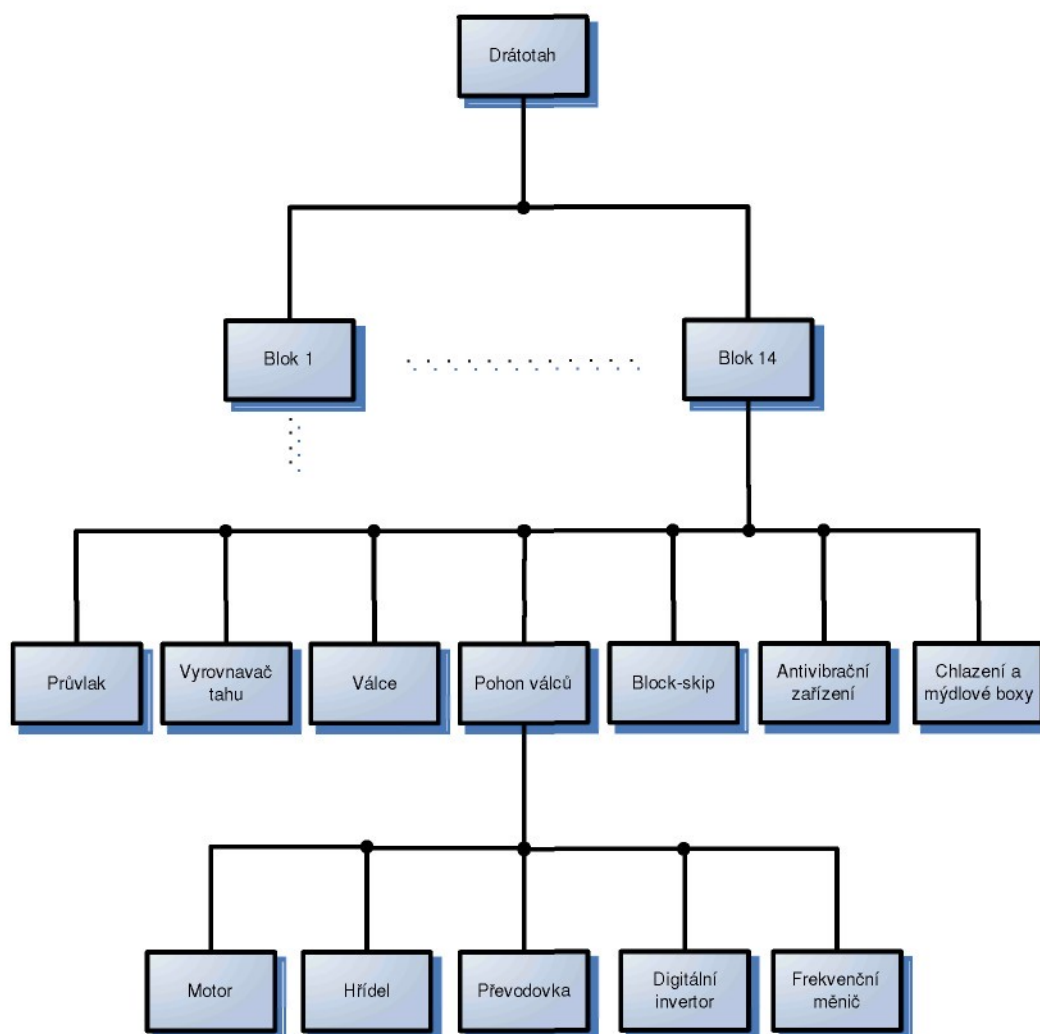
Chlazení zajišťuje správnou teplotu drátu, který se při procesu velmi rychle zahřívá. V mýdlových boxech je na drát nanášena směs, která zabraňuje poškození drátu při opracování. Chlazení drátu je zajištěno vysoce výkoným vodním přívodem uvnitř bloku.

4.2.8. Motor, hřídel a převodovka

Motor je napájen střídavým napětím, řízený frekvenčním měničem a je samočinně větrán. Je vertikálně připevněn na závěsných deskách na konstrukci drátotahu. To umožňuje snadnou a rychlou výměnu při údržbě. Motory, pohánějící válce na blocích 1-7, mají výkon 45kW. Na blocích 8-14 jsou slabší motory o výkonu 30kW.



Obrázek 25: Motor



Obrázek 26: Konstrukční uspořádání drátotahu

4.3. Technický a funkční popis systému – navíjedlo

Dříve než je drát navinut na jumbo, je nutné aby prošel čistící a olejovací jednotkou. Dále je také nutné přizpůsobit rychlost navíjení drátu. K přizpůsobení rychlostí slouží synchronizační dancer. Na konec je drát veden pohyblivým ramenem - extraktorem na navíjedlo, které drát navine na jumbo. Jumbo je následně umístěno do meziskladu. V této části systému je také umístěno měřicí čidlo, které měří délku navíjeného drátu.

4.3.1. Čistící a olejovací jednotka

Čistící a olejovací jednotka slouží k udržení stanovené jakosti a čistoty drátu. Čištění probíhá v různých fázích. Drát je kartáčován, vzduchově čištěn, prochází vodní lázní a je fénován.



Obrázek 27: Olejovací a čistící jednotka

4.3.2. Synchronizační dancer

Cílem synchronizačního danceru je přizpůsobovat rychlost mezi 14-tým blokem drátotahu a navíječkou. K tomu synchronizační dancer využívá induktivní senzor, který snímá úhlový pohyb ramene danceru vzhledem k jeho centrální pozici. Senzorový signál musí být velmi přesný, aby bylo dosaženo stálé synchronizace mezi těmito dvěma body.



Obrázek 28: Synchronizační dancer

4.3.3. Travers

Pomocí vodícího ramene zajišťuje rovnoměrné rozložení drátu na celé jumbo. Pohyb ramene je horizontální a úhel rozložení je nastavitelný.



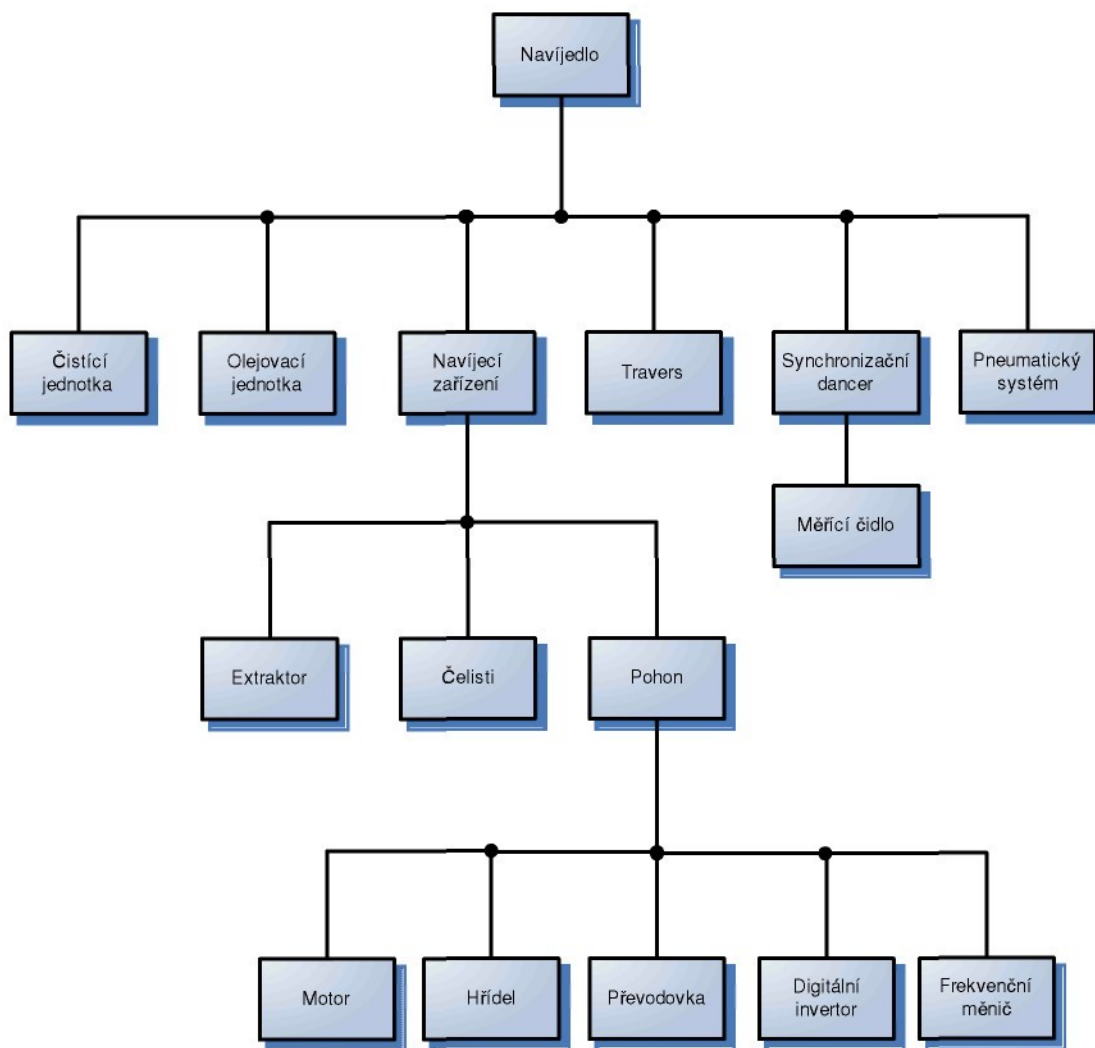
Obrázek 29: Navíjecí zařízení

4.3.4. Navíjecí zařízení

V navíjecím zařízení je uchycena jumbo cívka, na kterou je navíjen opracovaný drát. Otáčení jumba je zajištěno elektromotorem. Při výměně jumba je nutné zastavit, uvolnit a vysunout plné jumbo z navíjedla. K nasazení a uvolnění se vzhledem k vysoké váze využívá pneumatických čelistí. K vysunutí plného jumba z navíjecího zařízení slouží extraktor. Čelisti i extraktor jsou poháněny pneumatickým systémem. Celé navíjecí zařízení je zakrytováno bezpečnostním krytem.

4.3.5. Měřicí čidlo

Je umístěno v synchronizačním danceru a odesílá na display informaci o délce navinutého drátu. Ta nemá pouze informační charakter, při dosažení první nastavené hodnoty se rychlost navíjení sníží a při dosažení druhé přednastavené hodnoty (velikost maximální možné délky navinutelné na jumbo, při daném průměru) systém automaticky zastaví. Délka drátu je přepočítávána na základě signálů ze synchronizačního danceru.



Obrázek 30: Konstrukční uspořádání navíjedoru

4.4. Technický a funkční popis systému – ovládací panel

Slouží jako řídicí prvek tažné linky. Na displeji lze sledovat ukazatele a ovládat funkce potřebné pro běh stroje.



Obrázek 31: Ovládací panel

4.5. Technický a funkční popis systému – elektrický rozvaděč

Napájí celý systém elektrickou energií. Po dohodě s vedoucím projektu bylo rozhodnuto o prozatímní absenci dalšího členění tohoto objektu. Pro jeho popis tedy nebude využito žádného dalšího dělení.

5. Analýza dat původního protokolu

V této kapitole bude systém s původním rozdělením popsán metodami FMECA, FTA, RBD diagramem a Paretovou analýzou. Aplikací těchto metod na systém s původním rozdělením si objasníme některé důvody toho, proč bylo původní členění pro účely využívání ukazatelů R&M nevyhovující. U každé z metod se pokusím poukázat na jistý odhalený nedostatek původního členění. Tento nedostatek pak využijeme při návrhu nového protokolu, kde se budeme snažit o jeho odstranění.

Doposud byly poruchy na celém systému evidovány do 8 bloků - odvíjedo, drátotah, čistící jednotka, kontrolní zumbach, navíjedo, elektrický rozvaděč, dancer a ostatní. Prvních 7 bloků udávalo alespoň přibližnou lokalitu poruchy. Poslední blok „ostatní“ (dále také označován pod pojmem FSW-D) však poukazoval pouze na výskyt poruchy na stroji, nikoli na její lokalizaci. Proto byla v protokolu evidence k dispozici další specifikující kolonka „Popis poruchy“, jenž měla blíže specifikovat poruchu na daném prvku. Obsah této kolonky však nebyl normován. To vedlo k tomu, že každý specifikoval vzniklou poruchu trochu jinak, pokud jí vůbec specifikoval. Povinné bylo pouze zaevidování poruchy do příslušného bloku. To zabraňovalo softwarové selekci specifikujících dat a bez možnosti selekce je vyhodnocení takového množství informací téměř nemožné. Tím pádem jsou data uvedená v této kolonce pro většinu analýz nepoužitelná.

5.1. Kvalitativní analýza

5.1.1. FMECA - kvalitativní část

Hodnoty a vzorce použité pro výpočet intenzit poruch, uvedených v kvalitativní části analýzy FMECA, budou uvedeny v průběhu práce, bude také blíže pojednáno o původu a důvěryhodnosti dat použitých pro tyto výpočty.

Tabulka 2: Klasifikace výskytu poruch

Kritérium klasifikace výskytu poruchy	Četnost poruch	Třída
Malá: Nepravděpodobný výskyt poruchy	<15	1
Střední: Průměrný výskyt poruchy	15 - 30	2
Vysoká: Častý výskyt poruchy	30 - 75	3
Velmi vysoká: Velmi častý výskyt poruchy	>75	4

Kritérium klasifikace třídy náročnosti opravy je uvedeno v Tabulce 12 (viz.kapitola 5.2.3.).

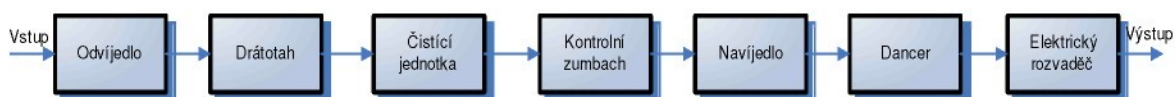
Tabulka 3: FMECA původního členění

Inv.č.	Položka č.	Položka popis	Mód poruchy č.	Mód poruchy	Lokální následky poruchy	Důsledek na systém	λ [h ⁻¹]	Třída výskytu poruchy	Třída náročnosti opravy	MR
I.	1.1	Odvíjedlo	11	Porucha na odvíjedle	Nelze odvíjet drát	Nejpravděpodobněji mimo provoz	0,000237	1	2	2
	1.2	Drátotah	12	Porucha na Drátotahu	Drát není opracováván	Nejpravděpodobněji mimo provoz	0,001043	3	1	3
	1.3	Čistící jednotka	13	Porucha čistící jednotky	Drát není opracováván	Různé	0,001398	3	2	6
	1.4	Kontrolní zumbach	14	Porucha kontrolního zumbachu	Drát není opracováván	Mimo provoz	0,000071	1	3	3
	1.5	Navíjedlo	15	Porucha na navíjedle	Drát nelze navíjet	Nejpravděpodobněji mimo provoz	0,000474	2	2	4
	1.6	Elektrický rozvaděč	16	Porucha na el. rozvaděči	Linka není napájena	Mimo provoz	0,000521	2	3	6
	1.7	Dancer	17	Porucha na danceru	Drát nelze navíjet	Mimo provoz	0,000213	1	4	4
	1.8	Ostatní	18	Porucha na stroji	Drát nelze navíjet	Mimo provoz	0,002157	4	4	16

Jak je už z analýzy FMECA na první pohled patrné, při takto nekonkrétním rozdělení nelze určit žádná nápravná opatření a ani nijak zvlášť přesně přiřadit jednotlivým módům poruchy třídu významu. Lokální následky poruch a důsledky poruch na systém jsou příliš obecné, a proto z nich nelze vyvodit způsobenou škodu. Na každém bloku může nastat porucha z příliš mnoha příčin, proto nelze ani konkrétně definovat příčinu poruchy. Příčina je vždy dána poruchou na jednom obsáhlém bloku.

5.1.2. RBD - kvalitativní část

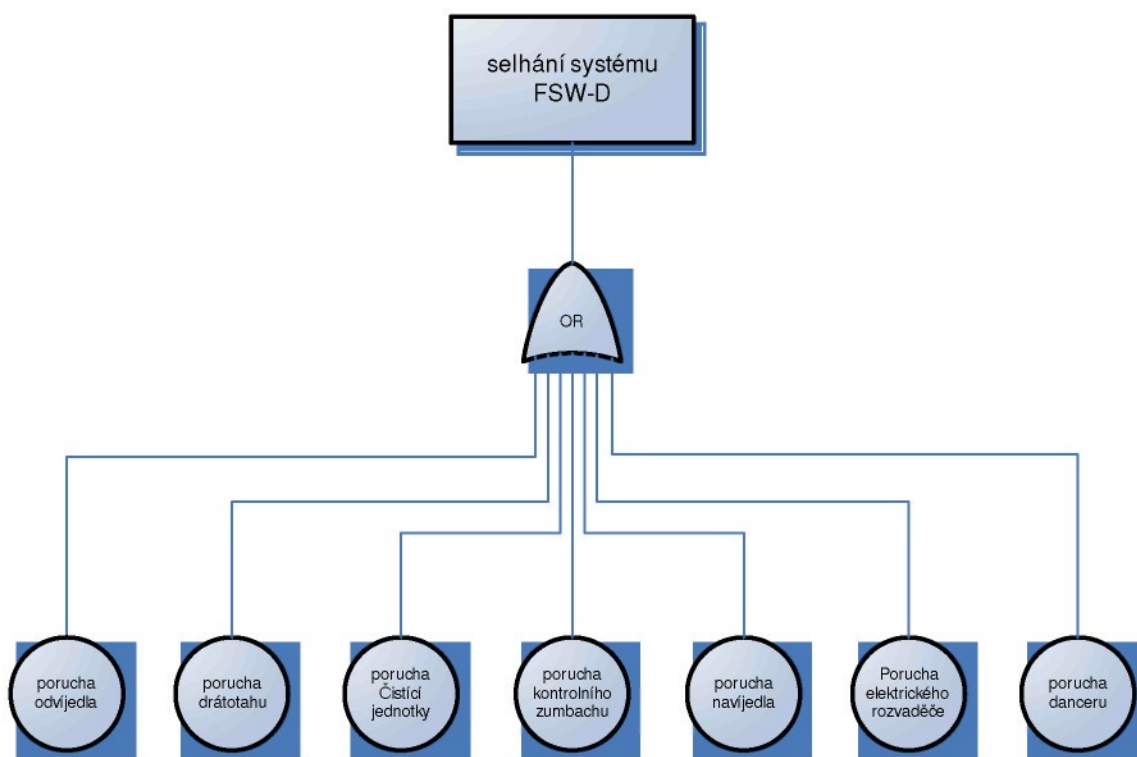
Prvky RBD diagramu jsou navzájem sériově propojeny. Tato struktura je dána tím, že systém má pouze jedinou „úspěšnou cestu“, která vede přes všechny evidované bloky. Systém je bez zálohy. Pokud dojde k poruše na jednom bloku, systém bude mimo provoz. Z toho plyne, že všechny prvky musí být v provozu, aby systém splňoval požadovanou funkci.



Obrázek 32: RBD diagram

5.1.3. FTA - kvalitativní část

Jako vrcholová událost pro strom poruch, neboli FTA, byla zvolena disfunkce systému. Tím je myšleno, že systém nemůže plnit požadovanou úlohu – viz kapitola 4. Jak již bylo řečeno, aby systém plnil svou funkci je potřeba, aby byly v provozu všechny bloky původního členění. Z předešlé věty plyne, že vrcholová událost nastane, pokud bude neprovozní alespoň jeden prvek stromu.



Obrázek 33: FTA původního protokolu

5.2. Kvantitativní analýza

Data o každé poruše jsou zaznamenávána do firemního softwaru MP2 ve formátu: datum a čas vzniku poruchy, datum a čas dokončení opravy, doba logistického zpoždění, doba trvání opravy, celkový čas opravy, stroj, prvek stroje, opravující, číslo centra, popis centra. Pro naše účely budou nejpodstatnější tyto údaje: doba logistické zpoždění, doba trvání opravy a celkový čas opravy, stroj a blok. Celkový čas opravy je dán součtem logistického zpoždění a doby trvání opravy. Další potřebnou informací je četnost poruch na jednotlivých blocích za zvolené časové období.

K dispozici máme údaje o dvou zcela totožných strojích. Do výroby byly zavedeny najednou, což je výhodou. Stroje se vyskytují ve stejné fázi životního cyklu a tak lze předpokládat porovnatelný výskyt poruch. Pracují na 3-směnný provoz (24 hodin denně), v jedné hale - ve zcela shodných podmínkách.

Problémem je však manuální zápis dat o poruše do softwarové evidence, ten zapříčiňuje jisté zkreslení těchto dat - při manuálním zadávání se operátor snadno může dopustit chyby v podobě překlepu. To způsobuje jistou nepřesnost výsledných ukazatelů. U některých poruch není evidován čas logistického zpoždění vůbec. V jiných případech

vychází naopak logistické zpoždění v záporné hodnotě. To je způsobenou špatně zadaným datem, například žádosti o opravu, které je pozdější než datum započetí opravy. To už by ve výpočtu způsobovalo značnou chybu a ukazatelé R&M, jako třeba střední logistické zpoždění, by byly příliš zkreslené na to, abychom je mohli použít. Tuto chybu jsem se pokusil redukovat nahrazením špatných záznamů průměrnou hodnotou dat, které byly uvedeny korektně. Údaje budou i přesto částečně zkreslené. Je to však jistý způsob jak tuto chybu alespoň trochu eliminovat.

Pro období technického života v intervalu $\langle t_1, t_2 \rangle$ s exponenciálním rozdělením doby do poruchy platí:

$\lambda(t) = \lambda = konst.$, pro výpočet intenzity poruch tedy můžeme použít vzorec:

$$\lambda = \frac{\text{celkový počet poruch}}{\text{celkový sledovaný čas}} \quad (5.1)$$

Informace o poruchách jsou uvedeny od 1.4.2005 do 8.9.2007. Systém pracuje na 3-směnný provoz (24 hodin denně), včetně víkendů. Celkový námi sledovaný čas je 879 dní. To znamená 21 096 hodin. Data uvedená v následujících tabulkách se vztahují k námi sledovanému časovému úseku.

Tabulka 4: Data o systému FSW-D623

Blok	² Logistické zpoždění [min]	² Doba opravy [min]	¹ Doba poruch [min]	Počet poruch
FSW-D623 (ostatní)	26603	19800	47033	58
Odvíjedlo	10020	1020	11265	7
Drátotah 14	1035	1950	4800	26
Čistící jednotka	21435	5640	30540	36
Zumbach	4605	1080	5685	1
Navíjedlo	1800	2070	6600	10
El.rozvaděč	1575	10650	13260	14
Dancer	3890	7770	11960	7
Suma	70963	49980	131143	159

Tabulka 5: Data o systému FSW-D624

Blok	² Logistické zpoždění [min]	² Doba opravy [min]	¹ Doba poruch [min]	Počet poruch
FSW-D624 (ostatní)	4351	48315	52726	33
Odvíjedlo	90	240	780	3
Drátotah 14	780	1995	3885	18
Čistící jednotka	3930	5070	10485	23
Zumbach	0	300	300	2
Navíjedlo	5640	810	6870	10
El.rozvaděč	0	15	7995	8
Dancer	0	0	135	2
Suma	14791	56745	83176	99

Tabulka 6: Součet dat systémů FSW-D623 a FSW-D624

Blok	¹ Logistické zpoždění [min]	¹ Doba opravy [min]	² Doba poruch [min]	Počet poruch
FSW-D (ostatní)	30954	68115	99759	91
Odvíjedlo	10110	1260	12045	10
Drátotah 14	1815	3945	8685	44
Čistící jednotka	25365	10710	41025	59
Zumbach	4605	1380	5985	3
Navíjedlo	7440	2880	13470	20
El.rozvaděč	1575	10665	21255	22
Dancer	3890	7770	12095	9
Suma	85754	106725	214319	258

¹ Čas nebyl evidován u všech případů. Je zde uveden čas vypočtený na základě evidovaných hodnot.

² Neodpovídá součtu logistického zpoždění a doby opravy z důvodu nepřesných dat těchto dvou položek.

5.2.1. RBD - kvantitativní část

Poruchy jednotlivých prvků původního členění jsou na sobě vzájemně nezávislé. To nám dovoluje pro výpočet bezporuchovosti použít metodu dekompozice. Ta spočívá v nahrazení jednotlivých částí systému (viz Obrázek 32) fiktivními prvky tak, aby bylo možné spočítat výslednou pravděpodobnost bezporuchového stavu systému.

Bezporuchovost systému pro sériové zapojení vypočteme pomocí vzorce:

$$R_s(t) = R_{odv}(t) \cdot R_{drát}(t) \cdot R_{čj}(t) \cdot R_{kz}(t) \cdot R_{nav}(t) \cdot R_{dan}(t) \cdot R_{el}(t) \quad (5.2)$$

Přičemž bezporuchovost jednotlivých členů $R_i(t)$ spočteme pomocí vzorce

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (5.3)$$

Počet poruch, uvedených v Tabulce 5 je nutné vydělit dvěma, aby výsledné ukazatele odpovídaly hodnotám pro jeden stroj (v Tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty pro 2 stroje, viz výše). Doba t odpovídá jedné hodině.

$$\text{Př. } \lambda_{odv} = \frac{10/2}{21096} = 0,000237012 \text{ hod}^{-1}$$

$$R_{odv} = e^{-\lambda_{odv} t} = e^{-0,000237012 \cdot 1} = 0,999763016 \equiv 99,9763\%$$

a tak dále, kompletní výsledky jsou obsaženy v Tabulce 5 viz.níže.

Pravděpodobnost bezporuchového provozu celého systému je poté následující

$$R_s(t) = 0,999763016 \cdot 0,998957692 \cdot 0,998602608 \cdot 0,999928899 \cdot 0,999526089 \cdot 0,99947871 \cdot 0,999786712 = 0,996049727 \equiv 99,605\%$$

Celková intenzita poruch sériového systému λ_s je podle vzorce (2.3) dána součtem jednotlivých intenzit.

$$\lambda_s = 0,000237012 + 0,001042852 + 0,001398369 + 7,11035 \cdot 10^{-5} + 0,000474024 + 0,000521426 + 0,000213311 = 0,003958096 \text{ h}^{-1}$$

5.2.2. FTA - kvantitativní část

Cílem analýzy je určení ukazatelů charakterizujících vrcholovou událost. V našem případě je zvoleným ukazatelem pravděpodobnost výskytu vrcholové události $P_{selh.syst}$ (pravděpodobnost selhání systému) v daném časovém intervalu. Pro výpočet tohoto ukazatele byla použita metoda přímého výpočtu. Dalším cílem je nalezení události s největším vlivem na vznik události vrcholové. Časový interval t pro pravděpodobnost vzniku události je 1 rok.

$$P_{selh.syst.}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{s=1} [1 - P(A_i)] \quad (5.4)$$

Pro náš případ tedy pak platí že:

$$P_{selh.syst.}(t) = 1 - [(1 - P_{odv}) \cdot (1 - P_{drát}) \cdot (1 - P_{čj}) \cdot (1 - P_{kz}) \cdot (1 - P_{nav}) \cdot (1 - P_{dan}) \cdot (1 - P_{el})] \quad (5.5)$$

Příjemž pravděpodobnost výskytu poruchy v daném časovém intervalu se rovná doplnku do pravděpodobnosti bezporuchového stavu v daném časovém intervalu.

$$P_{poruchy}(t) = 1 - R_{poruchy}(t) \quad (5.6)$$

Z toho plyne :

$$P_{selh.syst.} = 1 - (R_{odv} \cdot R_{drát} \cdot R_{čj} \cdot R_{kz} \cdot R_{nav} \cdot R_{dan} \cdot R_{el}) \quad (5.7)$$

Pravděpodobnost bezpruchového stavu je funkcí s exponencialním rozdělením a spočte se podle vzorce (5.3)

Tabulka 7: Data k FTA

Blok	λ [hod-1]	R (t=1h)	P (t=1h)
FSW-D (ostatní)	0,002156	0,997845	$2,157 \cdot 10^{-3}$
Odvíjedlo	0,000237	0,999763	$2,370 \cdot 10^{-4}$
Drátotah 14	0,001042	0,998957	$1,043 \cdot 10^{-3}$
Čistící jednotka	0,001398	0,998602	$1,398 \cdot 10^{-3}$
Zumbach	0,000071	0,999928	$7,110 \cdot 10^{-5}$
Navíjedlo	0,000474	0,999526	$4,740 \cdot 10^{-4}$
El.rozvaděč	0,000521	0,99947	$5,214 \cdot 10^{-4}$
Dancer	0,000213	0,999786	$2,133 \cdot 10^{-4}$

$$P_{selh.syst.} = 1 - 0,996049727 = 0,003950273 \approx 0,395\%$$

Z Tabulky 7 je patrné, že největší vliv na vznik vrcholové události mají nespecifikované poruchy.

Pozn. součet intenzit, poruch uvedený v RBD a FTA se liší od výsledných intenzit poruch systému uvedených v analýze FMECA. To je zapříčiněno absencí blokově nespecifikovaných poruch (ostatních) v analýzách RBD a FTA. Taktéž výpočet pravděpodobnosti bezporuchového stavu systému a pravděpodobnosti selhání systému je uvažován jen pro konkrétní prvky, ne pro nespecifikované poruchy.

5.2.3. Paretova analýza

Pomocí této metody se pokusíme určit prvky, jejichž vliv na celkový systém je nejzávažnější. Využijí dvou různých modelů, každý by měl poukázat na trochu jiný faktor závažnosti poruch.

Tabulka 8: Četnost poruch na jednotlivých blocích

Číslo bloku	Porucha na bloku	Četnost poruch
0	FSW-D (ostatní)	91
1	Odvíjedlo	10
2	Drátotah	44
3	Čistící jednotka	59
4	Kontrolní zumbach	3
5	Navíjedlo	20
6	El. rozvaděč	22
7	Dancer	9

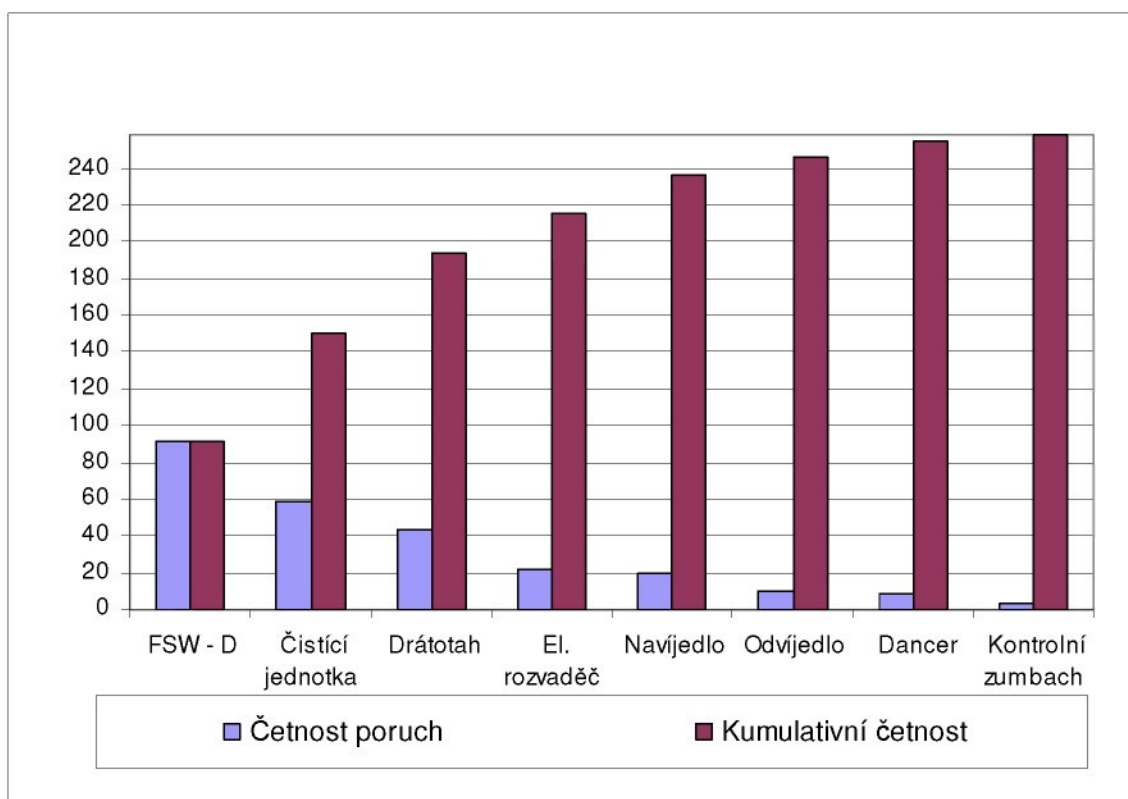
U prvního modelu není hodnoceno riziko poruchy, ale pouze četnost jejího výskytu. Je obtížné najít hodnotící faktor poruchy, když závady všech zmíněných bloků mohou vést k zastavení celého systému s přibližně stejnou pravděpodobností. To zapříčiňuje zejména sériová funkční struktura systému bez záložních prvků. Pokud se vyskytne závada na jednom funkčním bloku, vede tato porucha k selhání celého systému.

V Tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty, které jsou již seříděny sestupně podle četnosti výskytu poruch.

Tabulka 9: Data pro Paretovu analýzu

Porucha na bloku	Četnost poruch	Kumulativní četnost	Relativní četnost poruch [%]	Relativní kumulativní četnost [%]
FSW-D (ostatní)	91	91	35,27	35,27
Čistící jednotka	59	150	22,87	58,14
Drátotah	44	194	17,05	75,19
El. rozvaděč	22	216	8,53	83,72
Navíjedlo	20	236	7,75	91,47
Odvíjedlo	10	246	3,88	95,35
Dancer	9	255	3,49	98,84
Kontrolní zumbach	3	258	1,16	100,00

Jak již tabulka naznačuje, mezi nejčastější poruchy se řadí poruchy na nespécifikovaných blocích, na čistící jednotce a na drátotahu. Naopak problémy na kontrolním zumbachu se na první pohled téměř zabývat nemusíme. Nyní zkonstruueme Paretův diagram, na němž bude graficky znázorněna přehlednější forma výsledků analýzy.



Obrázek 34: Paretův diagram

Z Paretova diagramu je vidět, že největší pozornost by se měla věnovat právě poruchám na nespecifikovaných blocích, protože se vyskytují nejčastěji. Právě ony způsobují v námi sledovaném období až 35% poruch.

Z toho můžeme usoudit, že dosavadní rozdělení systému je v některých místech nedostačující, a proto se poruchy zaznamenávají do kolonky “ostatní“.. Jinde se naopak zdá být až nadbytečné.

To je vážný důvod proč stávající rozdělení upravit, v některých místech dále prohloubit a specifikovat. Kolonka “ostatní“ bude odstraněna a závady budou evidovány do konkrétních kolonek.

Při detailnější evidenci poruch systému navíc budeme schopni přesněji určit části stroje náročné na údržbu, jak z hlediska nákladů, tak i vztaheně k náročnosti na provedení opravy. S těmito údaji je již možné efektivně snižovat náklady na údržbu a zlepšovat udržitelnost stroje.

Nyní se pokusíme podívat na hodnocení poruch z trochu jiného hlediska než pouze množstvího. Jediným účelným ukazatelem, který byl doposud evidován se mi zdál být průměrný čas aktivní opravy. Ten do jisté míry vystihuje náročnost údržby dané závady a s jeho pomocí je tedy možné vyčíslit riziko poruchy.

Tabulka 10: Vyhodnocení míry rizika

Číslo bloku	Porucha na objektu	Četnost poruch	Doba oprav [h]	MRT [h]	Třída výskytu poruch	Třída náročnosti opravy	MR
0	FSW-D (ostatní)	91	1135,25	12,48	4	4	16
1	Odvíjedlo	10	21,00	2,10	1	2	2
2	Drátotah 14	44	65,75	1,49	3	1	3
3	Čistící jednotka	59	178,50	3,03	3	2	6
4	Zumbach	3	23,00	7,67	1	3	3
5	Navíjedlo	20	48,00	2,40	2	2	4
6	El.rozvaděč	22	177,75	8,08	2	3	6
7	Dancer	9	129,50	14,39	1	4	4

Tabulka 11: Kritérium klasifikace výskytu poruchy

Kritérium klasifikace výskytu poruchy	Četnost poruch	Třída
Malá: Nepravděpodobný výskyt poruchy	<15	1
Střední: Průměrný výskyt poruchy	15 - 30	2
Vysoká: Častý výskyt poruchy	30 - 75	3
Velmi vysoká: Velmi častý výskyt poruchy	>75	4

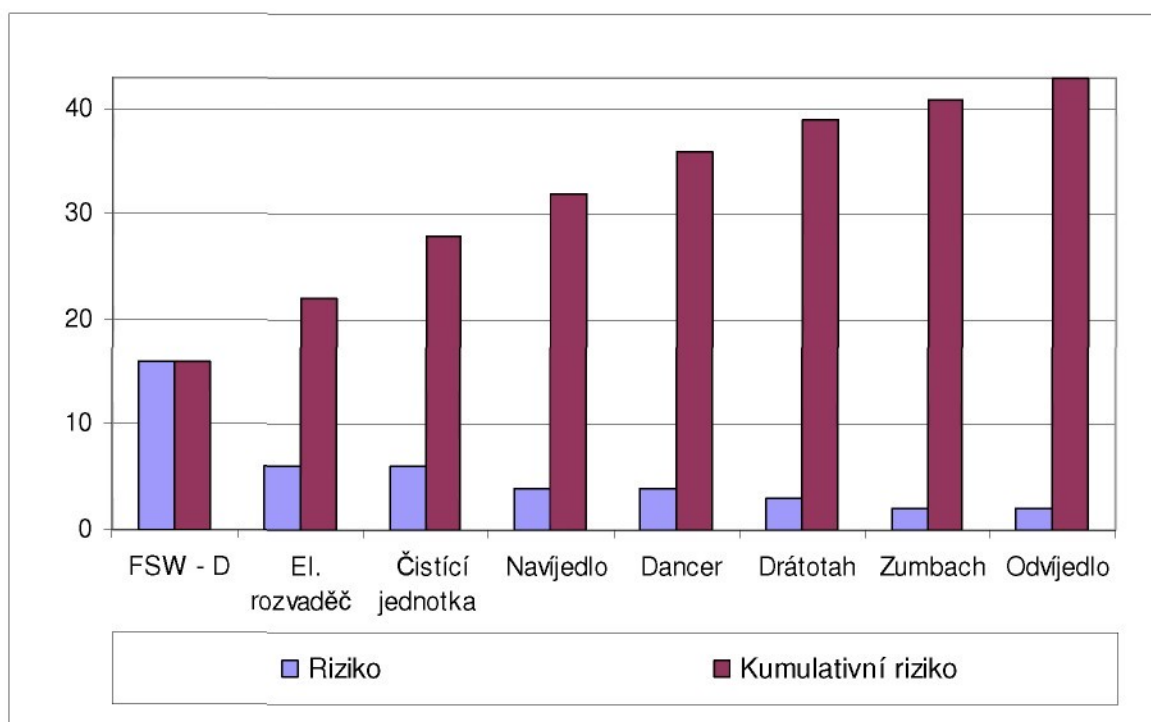
Tabulka 12: Kritérium klasifikace náročnosti poruch

Kritérium klasifikace náročnosti poruch	Doba opravy [hod]	Třída
Nenáročná oprava	<2	1
Průměrně náročná oprava	2 - 4	2
Složitá oprava	4 - 9	3
Velmi složitá oprava	>9	4

Tabulka 13: Data pro Paretovu analýzu s uvážením doby opravy

Číslo objektu	Porucha na objektu	Riziko	Kumulativní riziko	Relativní riziko [%]	Relativní kumulativní riziko [%]
0	FSW-D (ostatní)	16	16	37,21	37,21
6	El. rozvaděč	6	22	13,95	51,16
3	Čistící jednotka	6	28	13,95	65,12
5	Navíjedlo	4	32	9,30	74,42
7	Dancer	4	36	9,30	83,72
2	Drátotah	3	39	6,98	90,70
4	Zumbach	2	41	4,65	95,35
1	Odvíjedlo	2	43	4,65	100,00

Údaje z tabulky jsou přehledně znázorněny v následujícím grafu.



Obrázek 35: Paretův diagram s uvážením doby opravy

Jako nejrizikovější prvek se opět ukázaly být nespecifikované poruchy, které podle námi zvolených faktorů způsobují 37 % rizika.

6. Návrh nového protokolu

Hlavním cílem nového protokolu je napravit nedostatky protokolu původního. Měl by umožnit efektivní sledování dat o poruchách. Dále by měl mít zařaditelné a normované všechny druhy poruchy tak, aby byla umožněna jejich případná selekce. Protokol by měl systém optimálně dekomponovat do více funkčních bloků na základě zvolených faktorů.

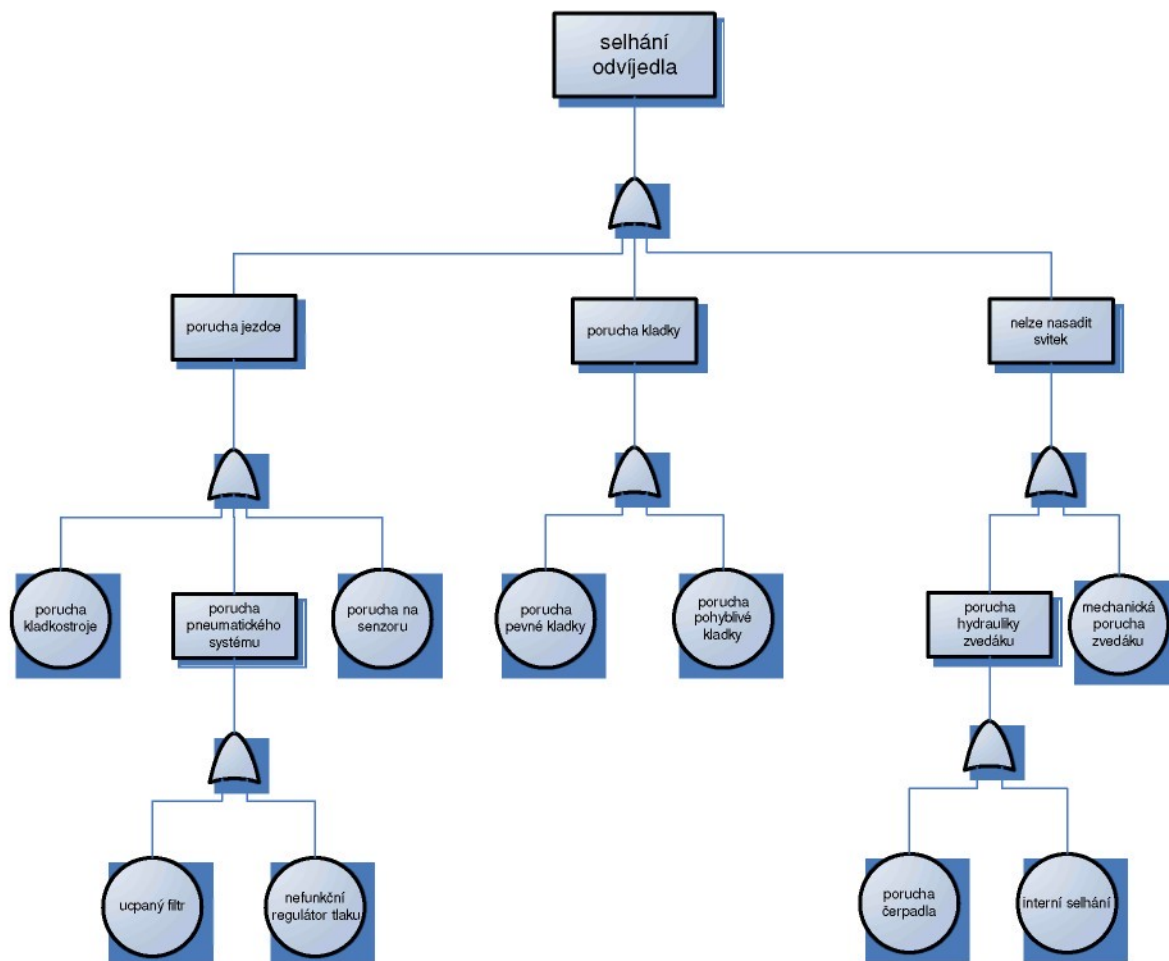
Systém jsem funkčně rozčlenil do pěti hlavních bloků: odvíjedlo, drátotah, navíjedlo, elektrický rozvaděč a ovládací panel. Odvíjedlo, drátotah a navíjedlo se dělí na podbloky. Elektrický rozvaděč a ovládací panel se již dále nečlení. Funkční a technický popis těchto hlavních bloků a podbloků je uveden výše v kapitole 4.

Hloubka, neboli úroveň dělení těchto tří dále dělených objektů je stanovena na základě těchto faktorů: technická složitost objektu, riziko poruch objektu a předchozí zaznamenané druhy poruch.

Úroveň dělení systému je však i tak o něco vyšší, než je firmou v současné době požadováno. Je to z důvodů poukázání na méně pravděpodobné, avšak reálně možné poruchové stavy, které by mohly nastat a vést k neprovozuschopnému stavu stroje. Spodní úrovně nemusí být v současné době zaznamenávány do evidence a ani nemusí být použity pro výpočet ukazatelů spolehlivosti. Mohou však napomoci při očekávaném budoucím rozšíření evidence.

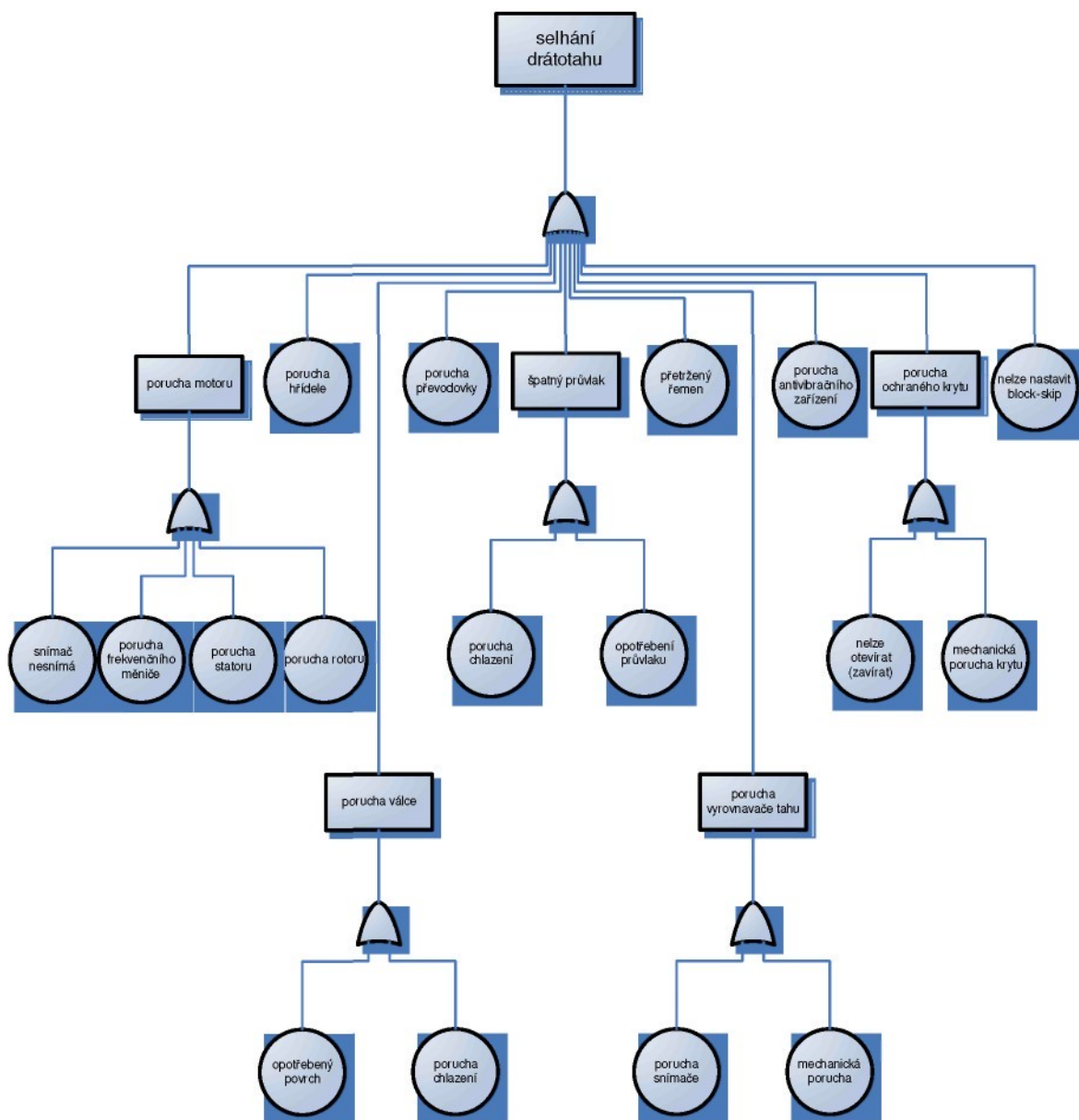
6.1. Kvalitativní analýza

6.1.1. FTA



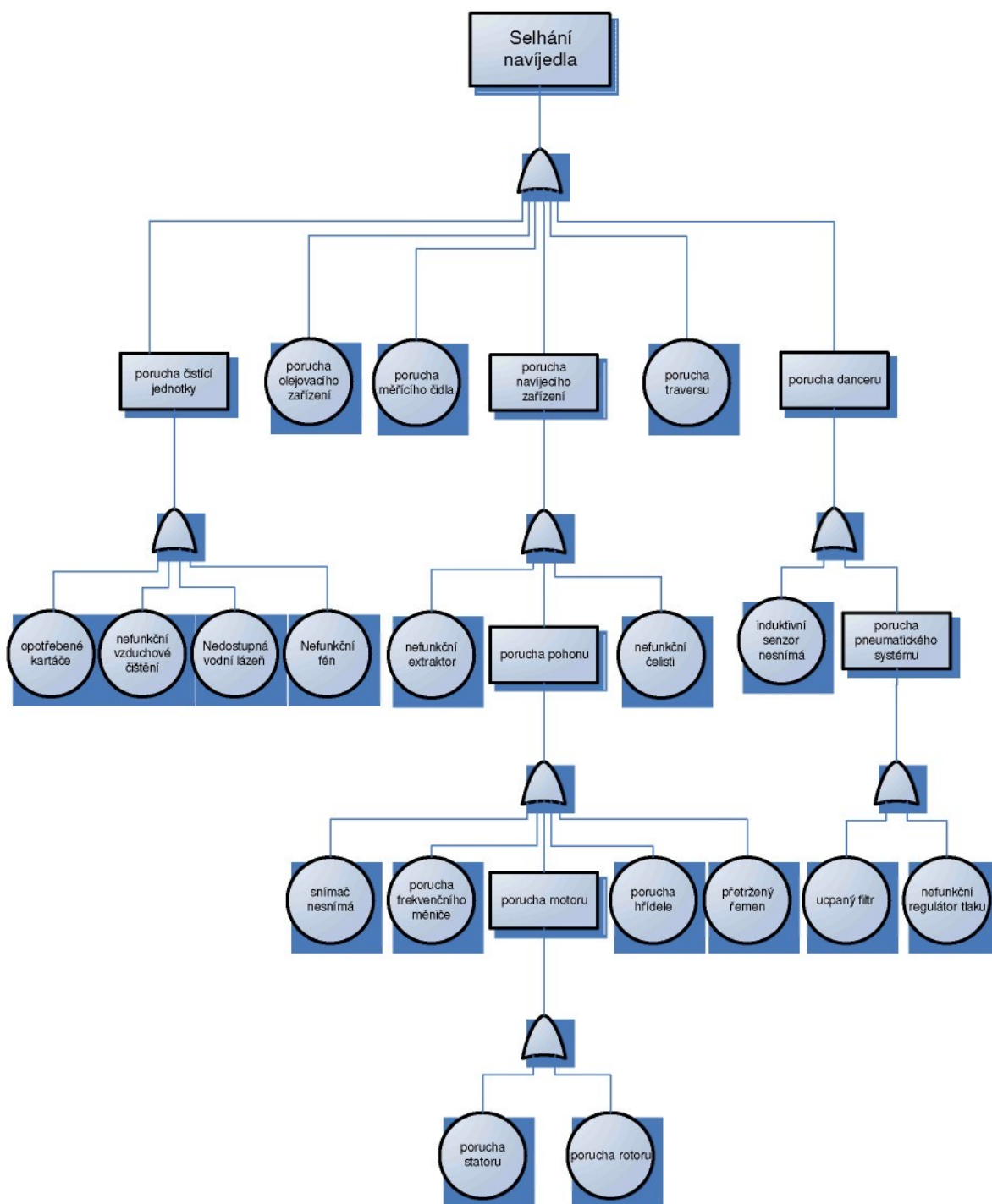
Obrázek 36: FTA odvíjeda

U odvíjeda budou poruchy zaznamenávány do devíti kategorií, přičemž všechny tyto závady mohou způsobit ztrátu funkce systému.



Obrázek 37: FTA drátotahu

Zde budou poruchy zaznamenávány do sedmnácti kategorií, přičemž všechny tyto závady mohou opět vést k selhání systému.



Obrázek 38: FTA navíjeda

U posledního analyzovaného objektu (navíjeda) budou závady evidovány do sedmnácti kategorií. Čistící jednotka není dále členěna, i když výskyt poruch byl velmi častý. Po konzultaci s oddělením údržby bylo zjištěno, že jde o poruchy četné, ale nenáročné na opravu. Dospělo se k závěru, že není třeba tuto položku blíže specifikovat.

6.1.2. FMECA

V nově navrhnutém protokolu bude možné kvantifikovat riziko pomocí tří hlavních faktorů : třída významu poruchy, třída výskytu poruchy a třída náročnosti údržby. Protokol je pro ukázkou z části vyplněn na základě informací známých z kapitoly 4. V budoucnosti bude upřesněn a podrobně vyplněn s techniky, znalými problematiky těchto poruch. To se týká především kolonek: příčina poruchy a nápravná opatření.

Jak již bylo řečeno v kapitole 4, základní větev systému se dělí na: odvíjedlo, drátotah, navíjedlo, ovládací panel a elektrický rozvaděč. Zde jsou uvedeny tři FMECA formuláře, které popisují odvíjedlo (Tabulka 14), drátotah (Tabulka 15) a navíjedlo (Tabulka 16). Protokoly pro ovládací panel a elektrický rozvaděč zde nejsou uvedeny. Neobsahují žádné další objekty a budou evidovány jako dva samostatné prvky systému.

Protokoly obsahují poruchy, jejichž reálný výskyt je předpokládáný. K rozčlenění systému přispěla i konzultace s údržbáři, kteří popsali dominantní poruchy předešlého období z hlediska operátorů. Pokud se v budoucnu vyskytne závada, se kterou protokol nepočítá, bude učiněno jednání s techniky a s oddělením údržby o tom, zda poruchu do evidence přiřadit, či ne.

V protokolu FMECA (Tabulka 14 až 16) je postupně po sloupcích uvedeno: číslo analyzovaného objektu, číslo analyzovaného funkčního bloku, číslo poruchového stavu, poruchový stav, který na daném prvku může vzniknout, příčiny vzniku poruchového stavu, náhled na lokální objekt, nejhorší následek poruchy na systém za daných podmínek, nápravné opatření, střední intenzita poruch, faktor hodnotící význam poruchy, faktor hodnotící výskyt poruchy, faktor hodnotící náročnost opravy a míra rizika z nastoupení .

Tabulka 14: FMECA protokol - odvíjadlo

Typ poruchy	Příčiny poruchy	Lokální následky poruchy	Důsledek na systém	Nápravná opatření	λ [h ⁻¹]	Typ a výška poruchy
Porucha kladkostroje		Nemožný posun vozíku	Žádný, pokud nedojde k zablokování drátu	Oprava kladkostroje		
Porucha pneumatického	Ucpaný filtr	Nemožné otevření bezpečnostních háčků	Žádný, pokud nedojde k zablokování drátu	Snížení vlhkosti, prašnosti		
Porucha pneumatického	Poškozený regulátor tlaku	Nemožný posun vozíku	Žádný, pokud nedojde k zablokování drátu	Pravidelné čištění		
Porucha senzoru		Neřízený posun vozíku	Žádný, pokud nedojde k zablokování drátu	Oprava senzoru		
Porucha kladka	Uvolnění kladky, mechanické poškození	Nemožné navíjení drátu	Mimo provoz	Výměna/upevnění kladky		
Porucha vá kladka	Uvolnění kladky, mechanické poškození	Nemožné navíjení drátu	Mimo provoz	Výměna/upevnění kladky		
Porucha svítilny a světelný systém	porucha čerpadla	Není možné sklopit držák	Mimo provoz, pokud je nutná výměna svítku	Oprava čerpadla		
Porucha svítilny a světelný systém	Interní selhání	Není možné sklopit držák	Mimo provoz, pokud je nutná výměna svítku	Opětovné upevnění		
Porucha drátu a mechanická poškození	Neopatrné uložení	Špatné odvíjení	Žádný, pokud lze odvíjet	Výměna		

Tabulka 15: FMECA protokol - drátotah

Typ poruchy	Příčiny poruchy	Lokální následky poruchy	Důsledek na systém	Nápravná opatření	λ [h ⁻¹]	T _{výs} [h]
Stator		Motor nefunguje	Mimo provoz	Oprava/výměna		
Rotor		Motor nefunguje	Mimo provoz	Oprava/výměna		
Snímače		Motor není řízen nebo je špatně řízen	Mimo provoz, poškození materiálu	Pravidelná kontrola, výměna		
Frekvenčního		Motor není řízen nebo je špatně řízen	Mimo provoz, poškození materiálu	Oprava/výměna		
Chlazení		Poškození povrchu válce	Mimo provoz, poškození materiálu	Senzor pro indikaci poruchy, oprava		
Zablokovaný povrch	Provoz, nedostatečné chlazení		Mimo provoz, poškození materiálu	Pravidelná kontrola, výměna, senzor chlazení		
Chlazení		Poškození průvzlaku	Mimo provoz, materiál není opracován	Senzor pro indikaci poruchy, oprava		
Zablokovaný průvzlak	Provoz, nedostatečné chlazení		Mimo provoz, materiál není opracován	Pravidelná kontrola, výměna, senzor chlazení		
Snímače		Motor není řízen nebo je špatně řízen	Mimo provoz, poškození materiálu	Pravidelná kontrola, výměna		
Mechanická porucha	Vychýlení	Motor není řízen nebo je špatně řízen	Mimo provoz, poškození materiálu	Oprava/výměna		
Otevírání	Zablokovaný zámek	Nelze otevřít kryt	Žádný, pokud není třeba interní zásah	Odblokování		
Mechanická porucha		Ohrožena bezpečnost práce	Mimo provoz	Oprava/výměna		
Řídicí hřídele	Opotřebení	Válce se netočí	Mimo provoz	Výměna		
Převodovky	Opotřebení	Válce se netočí	Mimo provoz	Výměna		
Řídicí řemene	Opotřebení	Válce se netočí	Mimo provoz	Výměna		
Antivibračního		Drát není usměrněn	Poškození materiálu	Oprava/výměna		
Uje přeskakovač		Nelze odpojit/připojit blok	Žádné, pokud není třeba přenastavení	Oprava		

Tabulka 16: FMECA protokol - odvějadlo

Typ poruchy	Příčiny poruchy	Lokální následky poruchy	Důsledek na systém	Nápravná opatření	λ [h ⁻¹]	Typ výskytu poruchy
Opotřebené kartáče	Opotřebení	Žádný	Poškození materiálu	Pravidelná kontrola, výměna		
Opotřebený vzduchové		Žádný	Poškození materiálu	Oprava		
Opotřebená vodní lázeň		Žádný	Poškození materiálu	Oprava		
Opotřebený fén		Žádný	Poškození materiálu	Oprava		
Chybný senzor		Špatná synchronizace motorů	Mimo provoz, poškození materiálu	Oprava/výměna		
Porucha pneumatického	Ucpaný filtr	Dancer není poháněn	Mimo provoz	Snížení vlhkosti, prašnosti		
Porucha pneumatického	nefunkční regulátor tlaku	Dancer není poháněn	Mimo provoz	Pravidelné čištění		
Porucha pohonu	snímač nesnímá	Motor není řízen nebo je špatně řízen	Mimo provoz, poškození materiálu	Oprava/výměna		
Porucha pohonu	porucha frekvenčního měniče	Motor není řízen nebo je špatně řízen	Mimo provoz, poškození materiálu	Oprava/výměna		
Porucha pohonu	porucha hřídele	Jumbo se netočí	Mimo provoz	Výměna		
Porucha pohonu	přetržený řemen	Jumbo se netočí	Mimo provoz	Výměna		
Porucha pohonu	porucha statoru	Motor nefunguje	Mimo provoz	Oprava/výměna		
Porucha pohonu	porucha rotoru	Motor nefunguje	Mimo provoz	Oprava/výměna		
Porucha ní extraktor		Nelze vysunout plné jumbo	Žádný, pokud není potřeba vyndat jumbo	Oprava		
Porucha ní čelisti		Nelze upnout/povolit jumbo	Žádný, pokud není potřeba vyměnit jumbo	Oprava		
Porucha olejovacího	Není olej, opotřebená ložiska	Drát není olejován	Žádný pokud není třeba olejovat	Pravidelná kontrola, výměna		
Porucha měřicího čidla		Špatně zaznamenávaná délka drátu	Převinutí/nedovinutí jumba	Pravidelná kontrola, výměna		
Porucha traversu		Drát není naváděn	Mimo provoz, nerovnoměrné navinutí			

Závěr

Byl navrhnut nový protokol evidence, který eliminuje nedostatky protokolu původního. Jako nejzávažnější nedostatky původního protokolu se v průběhu práce ukázaly být tyto: nedostatečná hloubka dělení některých objektů, evidování poruch do nekonkrétní položky “ostatní“, nemožnost určení příčin a následků poruch a nemožnost určení nápravných a preventivních opatření.

Systém FSW-D byl analyzován a na základě výsledků těchto analýz byly určeny klíčové objekty, které nový protokol dále dekomponoval. Jako hlavní objekt dekompozice byl však stanoven nekonkrétní prvek FSW-D (ostatní). Dekompozici tedy bylo nutné provést na základě dostupných informací o systému a konzultací s oddělením údržby. Jako druhý nejrizikovější prvek se ukázal být kontrolní zumbach. Po diskuzi s oddělením údržby však bylo zjištěno, že tento prvek systému je sice náročný na opravu, ale není třeba dále rozvíjet druhy poruch, které se na něm vyskytují. Taktéž čistící jednotka, která je místem velmi častých poruch, se ukázala být prvkem, který není nutné dále členit.

Podrobnějším rozdělením některých objektů se z velké části podařilo určit příčiny a důsledky poruch. Z nich je možné stanovit nápravná a preventivní opatření. Možnost kvantifikace rizika byla rozšířena o faktor následku poruchy.

Bylo dosaženo odstranění kolonky “ostatní“, která nepříznivě ovlivňovala využití sledovaných informací. V novém protokolu má každá známá porucha své pevně stanovené místo, do kterého bude evidována. Pokud se vyskytne porucha, se kterou protokol nepočítá, bude se v týmu jednat o jejím zařazení do protokolu. Na základě diskuze s oddělením údržby a s techniky bude rozhodnuto, zda se nová porucha do protokolu začlení či nikoliv.

Tato práce přispěla k rozvoji efektivity výrobního řetězce SSW. Pomocí nového protokolu se sníží poruchovost a zvýší pohotovost a produktivita zařízení FSW-D, které je úzkým místem výroby. Bude dosaženo zvýšení plynulosti a dynamiky materiálního toku celým výrobním řetězcem SSW.

Tato práce mě naučila využívat spolehlivostní metody v praxi a dovolila mi vyzkoušet si řešení reálných problémů za pomoci teoretických znalostí. Napomohla mi pochopit návaznosti mezi firemními procesy a propojení vazeb mezi jednotlivými předměty mého studijního oboru.

Použitá literatura:

- [1] Fuchs P., Vališ D., Chudoba J., Kamenický J., Zajíček J.: Řízení spolehlivosti, skripta Liberec 2006
- [2] Fuchs P., Vališ D., Chudoba J., Kamenický J., Zajíček J.: Bezporuchovost a životnost, Techniky analýzy bezporuchovosti, učební text Liberec 2005
- [3] Žižka M., Vybrané statě z operačního výzkumu, skripta, Liberec 2002
- [4] Fuchs P.: Využití spolehlivosti v provozní praxi, skripta Liberec 2002
- [5] Fuchs P., Vališ D.: Metody analýzy a řízení rizika, skripta Liberec 2004