

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů



Bakalářská práce

Koncepce prediktivní a proaktivní údržby

Ján Puškár

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ján Puškár

Inženýrství údržby

Název práce

Koncepce prediktivní a proaktivní údržby

Název anglicky

Concept of predictive and proactive maintenance

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je popsat koncepci reaktivní, preventivní, prediktivní a proaktivní údržby a její praktické aplikace a nástroje popsat ve zvoleném podniku.

Metodika

Úvodní část práce bude řešena formou literární rešerše, na níž naváže popis a ukázka řešení v rámci zvoleného podniku.

Osnova:

- 1) Úvod
- 2) Rozbor současného stavu (popis systémů údržby, výhody, nevýhody)
- 3) Cíl a metodika práce
- 4) Výsledky (nástroje údržby aplikované ve zvoleném podniku, popis řešení koncepce zvolených systémů údržby)
- 5) Závěr

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

údržba, prevence, predikce, reakce, optimalizace

Doporučené zdroje informací

BLOOM, Neil. *Reliability centered maintenance (RCM) : implementation made simple*. New York:

McGraw-Hill, 2005. ISBN 0-07-146069-1.

HAVLŮ, Vít; LEGÁT, Václav; ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA. *Metodika optimalizace programů údržby na základě analýzy rizik= [rukopis] The methodology for optimization of maintenance programs based on risk analysis : doktorská disertační práce*. Disertační práce. Praha: 2012.

LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. [Praha]: Kamil Mařík – Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.

LEVITT, Joel. *Complete guide to preventive and predictive maintenance*. New York: Industrial Press, 2011. ISBN 978-0-8311-3441-9.

PATTON, Joseph D. *Preventive maintenance*. Research Triangle Park, NC: International Society for Measurement and Control, 1995. ISBN 1556175337.

Předpisy, vyhlášky a firemní literatura

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 15. 11. 2022

prof. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 07. 09. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci "Koncepce prediktivní a proaktivní údržby" vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20.03.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za konzultace a cenné rady při vedení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu a trpělivost při mém studiu.

Koncepce prediktivní a proaktivní údržby

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na jednotlivé typy údržby a myšlenku prediktivní a proaktivní údržby. V první části práce jsou popsány jednotlivé typy údržby a jejich porovnání. Ve druhé části se práce zaměřuje na aplikaci různých nástrojů údržby v logistické hale ve středních Čechách. V závěru je zhodnoceno využití dostupných nástrojů a navrženo jejich efektivnější využití v daném podniku.

Klíčová slova: údržba, prevence, predikce, reakce, optimalizace

Concept of predictive and proactive maintenance

Abstract

This bachelor's thesis focuses on the individual types of maintenance and the idea of predictive and proactive maintenance. The first part of the work describes individual types of maintenance and their comparison. In the second part, the work focuses on the application of various maintenance tools in a logistics warehouse in Central Bohemia. In the conclusion, the use of available tools is evaluated and their more effective use in the given company is suggested.

Keywords: maintenance, prevention, prediction, reaction, optimalization

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Rozbor současného stavu.....	2
2.1 Rozdělení údržby	4
2.2 Údržba po poruše	4
2.3 Preventivní údržba	4
2.4 Prediktivní údržba	6
2.4.1 Vibrační diagnostika	6
2.4.2 Ultrazvuková diagnostika	7
2.4.3 Termografická diagnostika	8
2.4.4 Tribotechnická diagnostika	8
2.4.5 Spotřeba elektrické energie a dalších zdrojů	9
2.5 Proaktivní údržba	10
2.6 Ekonomické aspekty	12
2.7 Údržbové strategie	13
2.8 Společné využití	15
3 Cíl a metodika práce	16
4 Výsledky	17
4.1 CBM – Condition based maintenance.....	22
4.2 Zavedené nástroje pro proaktivní údržbu.....	26
5 Závěr.....	33
6 Seznam použité literatury a norem	35

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Činnosti údržby	2
Obrázek 2 - Dopravníkový pás	8
Obrázek 3 - Proaktivní údržba	11
Obrázek 4 - Sada ultraprůbe 15,000 BTH	23
Obrázek 5 - Měřicí bod a monitor	24
Obrázek 6 - Klínový řemen	25
Obrázek 7 - SLAM	26
Obrázek 8 - OEE	28

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání strategie	15
Tabulka 2 - Rozdělení kritičnosti technologie	17
Tabulka 3 - Hodnocení kritičnosti zařízení	19
Tabulka 4 - Výsledná kritičnost	20
Tabulka 5 - Příklad hodnocení	20
Tabulka 6 - Plánování podle kritičnosti	21
Tabulka 7 - Kvalitativní vyřazení	30
Tabulka 8 - Chybové kódy zastavení	31
Tabulka 9 - Meziroční přehled údržby zařízení SLAM	32

Seznam grafů

Graf 1 - Porovnání nákladů PM	5
Graf 2 - Pístový kompresor	9
Graf 3 - Opakování poruch	10
Graf 4 - Trend vibrací	22
Graf 5 - Dostupnost Slamu 304	29

Seznam použitých zkratk

PM – preventive maintenance – preventivní údržba

PdM – predictive maintenance – prediktivní údržba

PrM – proactive maintenance – proaktivní údržba

CMMS – computerized maintenance management system – počítačový systém pro správu údržby

RCM – reliability centered maintenance – údržba zaměřená na spolehlivost

TPM – total productive maintenance – komplexní produktivní údržba

CBM – condition based maintenance – údržba založená na stavu

OEE – overall equipment effectiveness – celková efektivita zařízení

1 Úvod

V dnešní moderní společnosti, která je obklopena složitou sítí technologií a infrastruktur, se spolehlivost strojů považuje za samozřejmost a význam údržby je často přehlížen. Údržba zahrnuje široké spektrum činností od pravidelných kontrol, řešení mimořádných událostí, až po vytváření inovativních vylepšení, které mohou posunout zařízení za jeho původní limity.

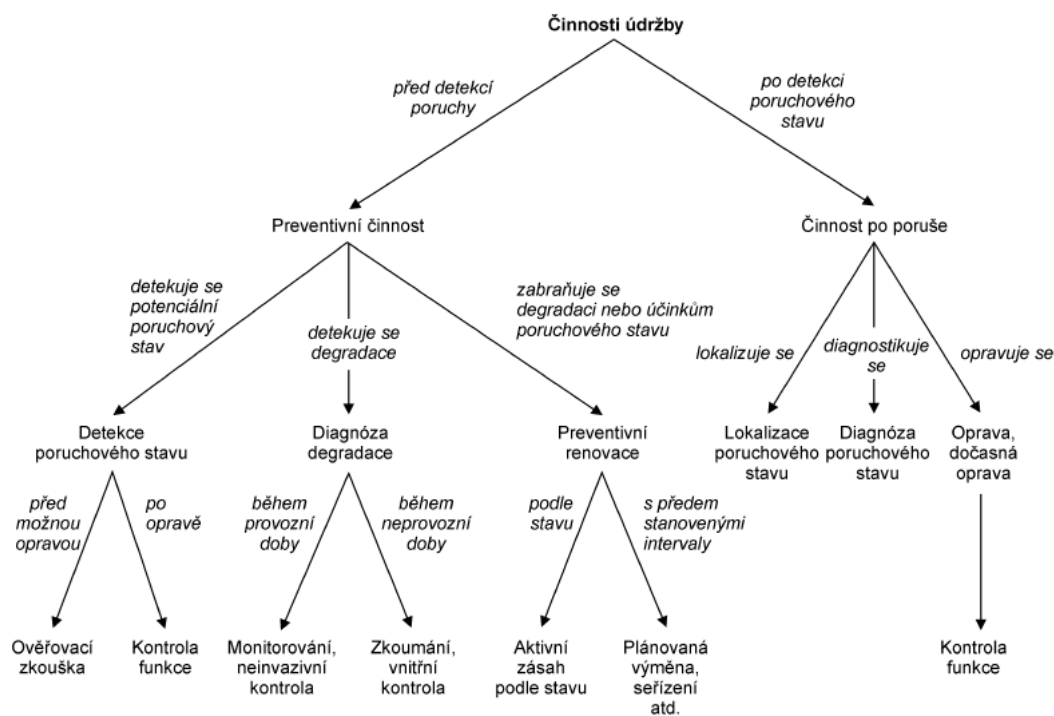
Správně nastavená údržba je klíčovým prvkem pro dosažení efektivity a spolehlivosti ve všech odvětvích, kde se využívají jakékoliv stroje nebo zařízení. V mnoha organizacích se nahlíží na údržbu jako na oddělení, které nepřináší žádný zisk. Toto vnímání vychází ze zjednodušeného pohledu na ekonomiku, kde údržba figuruje jako nákladové oddělení. Role a přínosy pro organizaci jsou mnohem komplexnější než pouhé finanční výdaje. Při správně zvolené údržbové strategii dokáže údržba nejen udržet zařízení v chodu, ale taky prodloužit jejich životní cyklus nebo zlepšit jejich funkci a zvýšit tak produktivitu celé firmy. Organizace se často potýkají s výběrem správné strategie a mnohdy investují do technologií, které pro jejich provozní podmínky nejsou vhodné, a naopak podcení zavedení základních nástrojů. Právě při zavádění složitých strategií se zjistí, že ve firmě chybí kvalitní počítačový systém pro správu údržby a sledování spotřeby náhradních dílů nebo odpracovaných hodin na jednotlivých úkonech. Právě tyto základní vstupy pak brání při vytváření dlouhodobých trendů.

Tato práce se zaměřuje na jednotlivé typy údržby a jejich vhodnou aplikaci podle požadavků a cílů organizace. Ve zvoleném podniku, kterým je logistický sklad ve středních Čechách, jsou zhodnoceny zavedené druhy údržby a jejich efektivní využití. Práce popisuje rozhodovací proces při zavádění jednotlivých údržbových aktivit podle kritičnosti zařízení. Dále taky ukazuje na konkrétním příkladu sběr dat o každém zastavení vybraného stroje a následné vyhodnocování dat pro proaktivní údržbu. Právě tento sběr dat je důležitý pro vytváření dlouhodobých statistik a trendů, díky kterým je možné predikovat chyby nebo hledat kořenové příčiny poruch.

2 Rozbor současného stavu

Údržbu strojů lze přirovnat k údržbě lidského těla. Vybavení se opotřebovává stejně jako lidské tělo a některé druhy opotřebení se dají ovlivnit návyky (kouření, přejídání a podobně), vyjímaje náhodné události jako nehoda nebo náhlá nemoc. Nejlepší možností, jak mít víc dobrých návyků, je směřovat svůj život k pravidelnému sportování a správnému stravování. Pak je lidské tělo směřováno k lepšímu zdraví a delšímu životu. Pokud by však i přesto došlo k poškození částí lidského těla nebo jeho buněk, je schopno regenerace a obnovy. U strojů slouží preventivní údržba jako zmíněné dobré návyky. Jako u každého zvyku i preventivní údržba se může přehánět, kontroly mohou být příliš blízko u sebe nebo se díly vyměňují zbytečně často. V mnoha firmách je také často pozorováno nepochopení pracovní náplně údržby. Velmi často převládá názor, že pokud se stroj neopravuje aktivně v každém momentu, tak údržba nevykonává žádnou činnost. Proto je na začátku nutno poukázat na veškeré prováděné činnosti a nejen na reaktivní opravy. V příloženém obrázku 1 lze vidět rozdělení činností údržby. [1] [2]

Obrázek 1 - Činnosti údržby



Zdroj: ČSN EN 13306 Údržba – terminologie údržby, Praha, 2018

Ve skutečnosti je údržba strojů ještě náročnější a musí splňovat integritu ve čtyřech oblastech. Údržba, ekonomie, psychologie a management. [3] [4]

- Údržba

Úkoly, které se budou vykonávat, musí být prováděny správně a za použití odpovídajícího nářadí ve správné frekvenci během životního cyklu objektu. Údržba musí zahrnovat analýzu statistik poruch, jejich oprav a doby provozuschopnosti. [3] [5]

- Ekonomie

Prováděné úkoly musí podporovat finanční cíle organizace. Ekonomie taky pokládá otázku, zda je opodstatněné provádět další servisní práce na konkrétním zařízení. Jestliže je současná hodnota stroje, který firma vlastní, nižší než náklady na jeho údržbu, nebo pokud toto zařízení opakovaně představuje environmentální nebo bezpečnostní rizika, pak se z ekonomického hlediska vyplatí investice do nového zařízení více, než jeho další nákladné servisování. [3] [5]

- Psychologie

Zodpovědné osoby, které se zabývají údržbou, musí být motivovány tak, aby prováděly úkoly zodpovědně a pečlivě. Bez motivace údržba otupuje a lidé mají tendenci postupně ignorovat detaily a následně přehlédnout defekty na zařízení. Při školení techniků je důležité, aby si byli vědomi, proč dané úkoly dělají a proč musí úkol pokaždé provést stejným způsobem. [3]

- Management

Údržba musí být integrována do systémů, které řídí závod, a musí být navržena tak, aby její kvalita byla v systému a nebyla závislá na individuálním úsilí. Data nasbíraná z údržby musí být zahrnuta do toku obchodních informací. Zároveň by měla existovat struktura ve vedení společnosti mimo vedení údržby, která klade otázky na průběh plánování a provádění údržbových prací, a vyžaduje odpovědnost, pokud nejsou splněné závazky a projekty, které má na starost oddělení údržby. Z tohoto důvodu se v mnoha firmách údržbové rozpočty a plány schvalují generálními manažery, kteří schvalují plány pro všechna oddělení ve firmě. [3] [4]

2.1 Rozdělení údržby

„Údržba je kombinace všech technických, administrativních a manažerských činností během životního cyklu objektu zaměřených na jeho udržení ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci.“ [5]

2.2 Údržba po poruše

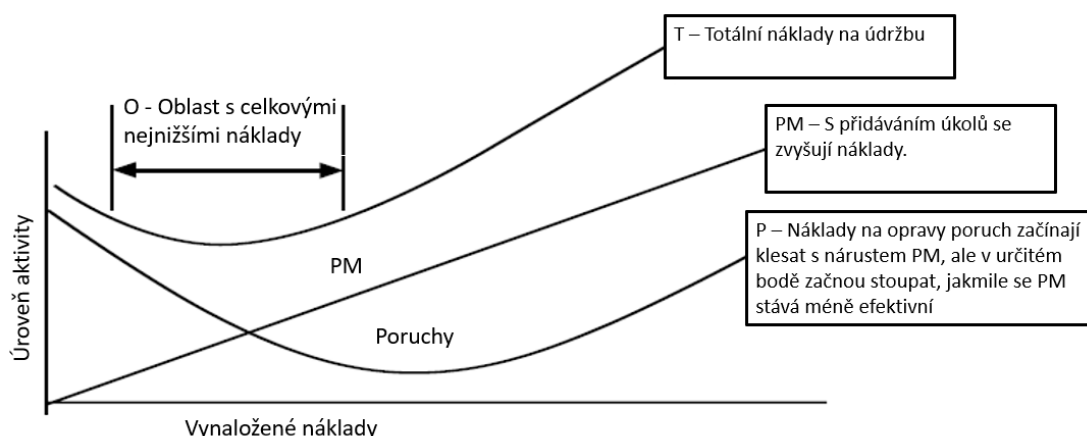
Údržba po poruše, taktéž nazývaná reaktivní údržba, slouží k odstranění poruchy v okamžiku jejího vzniku a taky k provedení následujících oprav bez toho, aby se zabývala jejím vznikem nebo prevencí. Při tomto druhu údržby jsou náklady na prevenci nulové, ale porucha přichází náhodně. Poruchy mají negativní dopad na výrobní proces a s ním spojené neplánované prostoje, které mohou mít ekonomický nebo environmentální dopad. V nejhorsím případě může být poruchou narušena bezpečnost stroje a způsobit tak fatální následky. [6]

2.3 Preventivní údržba

V anglické literatuře se nejčastěji zmiňuje zkratka PM – preventive maintenance, kterou se označuje série úkolů, prováděných v pravidelné frekvenci, která může být diktována plynutím času, počtem najetých kilometrů, motohodin, nebo počtem vyrobených výrobků a podobně.

Norma ČSN EN 13306 rozděluje preventivní údržbu na údržbu s předem stanovenými intervaly a údržbu podle stavu. Preventivní údržba se může také rozdělit na údržbu povinnou a volitelnou. Pod povinnou PM se zahrnují činnosti, které jsou diktovány zákonem, licencí nebo kontraktem od dodavatelské firmy. Volitelnou údržbou se nazývají činnosti, které jsou vytvořeny pro snížení poruchovosti stroje a jejich ekonomických dopadů. Volitelnou údržbu nebo údržbu podle stavu neřídí zákon, ale zisk a ztráta. Přiložený graf zobrazuje křivku celkových nákladů na údržbu na základě zvyšujících se nákladů na preventivní údržbu. V téhle zjednodušené formě v grafu chybí další nákladové položky jako například kvalita, ale důležitým poznatkem, který může být odečten je, že existuje optimální množství PM pro každý podnik. [3] [5]

Graf 1 - Porovnání nákladů PM



- P – Všechny náklady na opravu poruch a další náklady jako jsou výpadky produkce, ovlivnění kvality a podobně.
 PM – Všechny náklady na PM, včetně nákladů na materiál a prostoje na zařízeních pro provádění PM.
 T – Celkový součet všech nákladů na údržbu, prostoje, mzdy atd.
 O – Cílem je mít nejnižší totální náklady na výrobu. Lze vidět, že nejnižší celkové náklady vycházejí z určité úrovně PM, víc ani míň není vhodné

Zdroj: Levitt, Joel. *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance Second Edition*. New York : Industrial Press, 2011. ISBN 978-0-8311-3441-9 (upraveno)

Pro určení frekvence PM se používá několik způsobů. První a základní způsob je zavedení doporučené frekvence PM od výrobce. Další možnost je analýza poruchovosti. Pokud je poruchovost příliš častá, tak se následně zvyšuje frekvence kontrol nebo se upraví seznam úkolů pro jednotlivá PM. V opačném případě se může frekvence PM snižovat, nejedná-li se o úkony spojeny s bezpečností stroje. [3]

Třetí možnost je vyhodnocení frekvence nálezů a defektů, které vyplynuly z pravidelných kontrol. Je možné očekávat určitý počet nálezů na sto nebo tisíc kontrol. Pokud nebyl dosažen požadovaný počet nálezů, lze usoudit, že kontrola probíhá s nadměrnou frekvencí. V závislosti na kritičnosti kontrolovaného zařízení se frekvence nemusí měnit, protože je potřebné zachytit jakoukoliv změnu tak, aby se předešlo neplánovanému zastavení. [3]

2.4 Prediktivní údržba

Prediktivní údržba je údržbová činnost, která zahrnuje určitý přístroj nebo technologii, která dokáže přesně indikovat, kdy se část zařízení dostává na kritickou křivku opotřebení. Prediktivní údržba porovnává data s předem determinovanými hodnotami a nově nasbírané hodnoty se zapisují pro další kontrolu. Postup PdM – prediktivní údržby, je založen na získávání dat, detekci opotřebení a následné diagnostice s prognózou selhání zařízení. Spolehlivost zařízení se zvyšuje, protože opotřebení dílů se detekuje dříve, než by to bylo možné pouze vizuální kontrolou. Prediktivní údržba neprodlužuje životnost zařízení, ale slouží ke sběru dat a prognóze selhání na základě dlouhodobých trendů. Až následná korekce nalezeného defektu prodlužuje životnost stroje. Cílem PdM je předvídat vývoj stavu zařízení na základě dlouhodobě nashromážděných dat o jejich stavu. Například termovize odhalí zahřívající se spojení ve svorkovnici, které se v rámci preventivní údržby dotáhne. Zvýšení teploty nemusí být náhlým jevem, ale právě pravidelné sledování umožňuje vznik trendů, na kterých se projeví zvyšující se křivka teploty. Tím lze předejít eventuální poruše nebo poškození stroje. Pro dosažení komplexní prediktivní údržby by měli být použity různé technologie kondičního monitorování. Tyto technologie zahrnují termografii, monitorování vibrací, tribologii, nedestruktivní defektoskopii a další. PdM neslouží jenom ke snížení neplánovaných zastavení, ale také ke snížení plánovaných zastavení tím, že eliminuje nutnost některých úkonů preventivní údržby, a přispívá tak ke snížení celkových nákladů životního cyklu zařízení. [2] [3] [7] [8]

2.4.1 Vibrační diagnostika

Pro vibrační diagnostiku se používají senzory, které sledují vibrace a umožní tak detekovat opotřebení ložisek zejména u rotačních strojů. Senzory dokážou identifikovat poškozené hřídele, prasklé podpěry nebo problémy se spojkou. Při instalaci senzorů je důležité jejich umístění, aby čtení hodnot nebylo ovlivněno vnějšími vlivy nebo vibracemi z přilehlých částí stroje. V dnešní době se využívají různé počítačové programy pro sledování trendů vibrací a tím monitorují první příznaky poruchy a její postupné zhoršování. Při preventivní výměně dílu je nutno zaznamenat novou základní frekvenci (baseline) a taky ji porovnat s předchozí instalací. Pokud by se tyto frekvence výrazně odlišovaly, je možné, že se závada nesprávně identifikovala a neodstranila. Další možností je prověřit, zda byl dodržen technologický postup instalace dílu a rovněž jeho uskladnění doporučené výrobcem, a to takovým způsobem, aby se vyloučila možnost jeho poškození. [1] [3]

2.4.2 Ultrazvuková diagnostika

Tato technologie využívá s vibrační diagnostikou společného jmenovatele, a tím je mechanické vlnění. Rozdíl mezi vibrační diagnostikou a ultrazvukovou je ve sledovaném rozsahu. Zatímco vibrační diagnostika pracuje v rozsahu frekvencí 1 Hz až 30 000 Hz, ultrazvukové přístroje monitorují frekvence vyšší než 20 000 Hz. Primární využití slouží pro testování materiálů, hledání úniků vzduchu a detekci částečných výbojů v rozvaděčích. [3] [6]

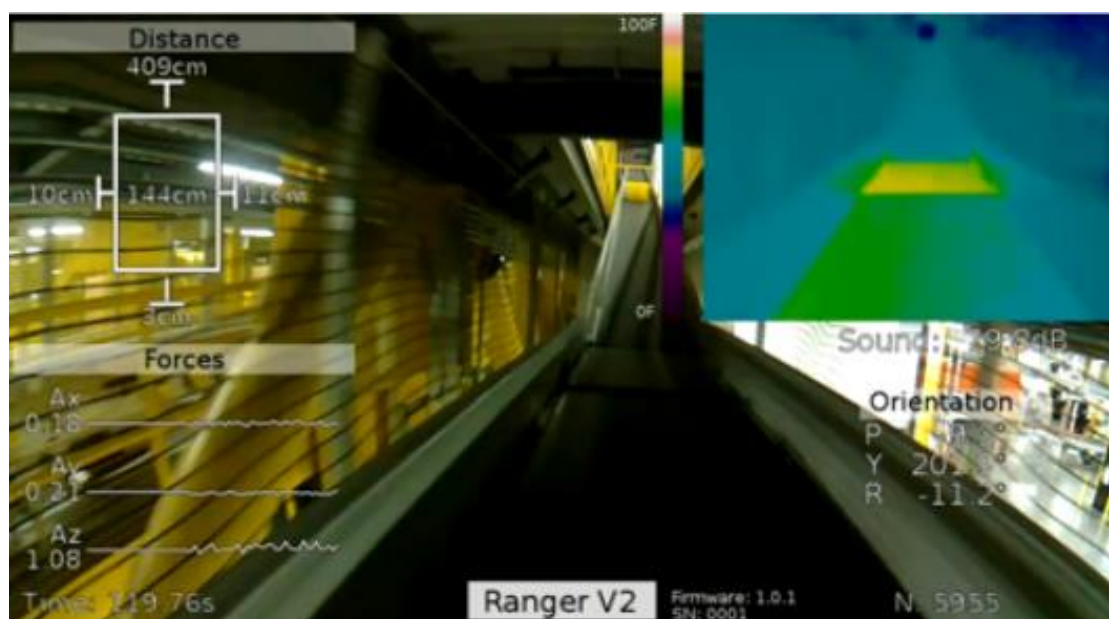
Ve vzniklé netěsnosti dochází k turbulentnímu proudění skrz otvor a vytváří tak vysokofrekvenční zvukový podpis. Proto je ultrazvuk ideální pro odhalování netěsností na ventilech a potrubích. Testování materiálů začíná na frekvencích od 250 kHz do 25 MHz a je primární metodou pro hledání vnitřních chyb odlitků a svárových spojů. Samotné měření spočívá ve srovnání času a amplitudy, nebo komparace síly signálu mezi vysláním a příjmem. Na rozhraní materiálů dochází k zpětnému odrazu zvuku. Kvalita odrážené energie závisí na impedanci mezi dvěma materiály. U otevřené trhliny s rozhraním ocel-vzduch dochází k dostatečnému odrazu. Pokud by byla trhlina na rozhraní ocel-voda, tak se 12 % energie přeneso do vody. Z tohoto důvodu drobná trhlina ve stlačeném poli, která nemá vliv na oxidované povrchy, nebude touto metodou rozeznatelná. [3] [6]

Pro preventivní údržbu se využívají vzduchové ultrazvukové sensory, které detekují změny v kvalitě a amplitudě zvuku tvořené sledovaným zařízením. Tyto zvuky jsou převáděné do oblasti slyšitelné lidským uchem a většina moderních přístrojů má pro tyto účely průmyslová sluchátka nebo displej, kde se zobrazuje měřená velikost zvuku v decibelech. Moderní ultrazvukové přístroje využívají také software pro ukládání dat a jejich analýzu. Dají se využít ve skenovacím nebo kontaktním režimu. Jako skenery se používají k detekci úniků plynů nebo vakuových úniků. V kontaktním režimu je jako součást zařízení využíván kovový prut jako vodič vln. Při kontaktu s povrchem je stimulován vysokými frekvencemi ultrazvuku na opačné straně povrchu. Tato metoda se využívá pro kontrolu ložisek a správného množství maziva. [3] [7] [9]

2.4.3 Termografická diagnostika

U většiny zařízení je vysoká teplota nežádoucím jevem. Podle zvyšování teploty je možné odhadnout, zda je součást v pořádku. Pro měření se využívají optické termokamery, kontaktní a bezkontaktní čidla. Pomocí termografie se kontrolují komponenty v rozvaděčích, vinutí motoru nebo ložiska. Tento způsob se dá taktéž použít na odhalení nesprávného napnutí dopravníkových gumových pásů. Příklad nesprávného napnutí je zobrazen na přiloženém obrázku. Zvýšené pnutí a teplota následně působí na rychlejší opotřebení ložisek a poškozuje vulkanizační nebo mechanické sponové spojení dopravníkového pásu. [1]

Obrázek 2 - Dopravníkový pás



Zdroj: Archiv autora

2.4.4 Tribotechnická diagnostika

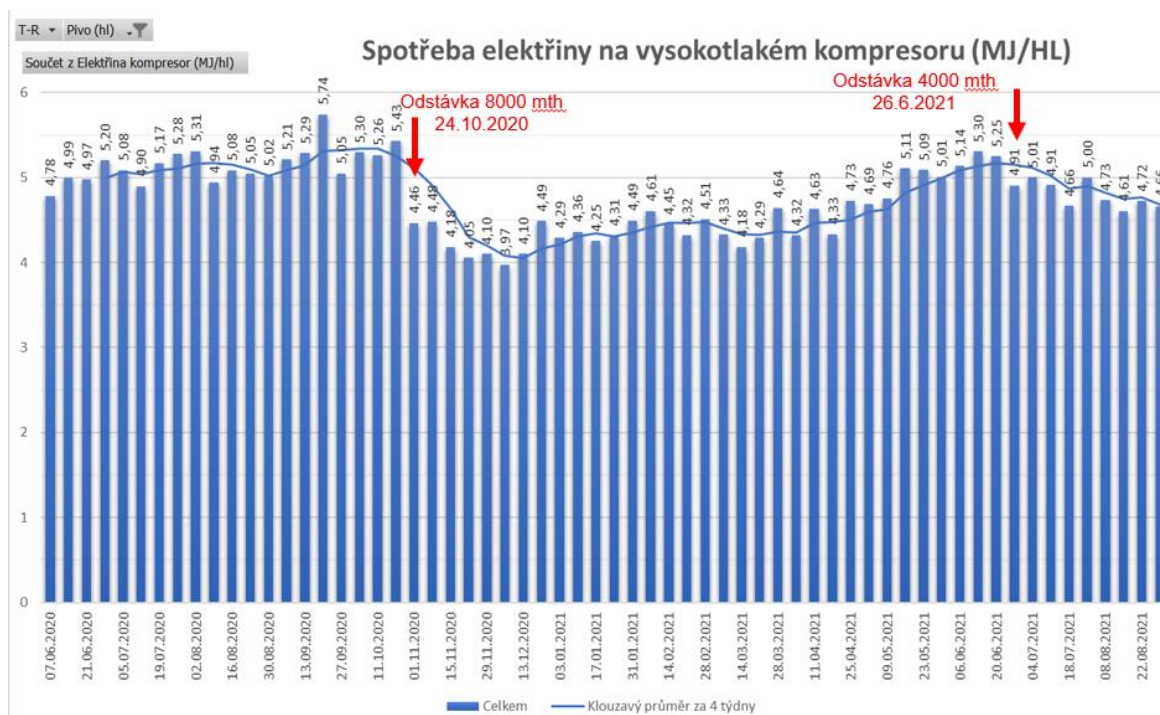
Tribotechnická diagnostika, také nazývaná tribodiagnostika, je určena k vyhodnocování stupně degradace maziv a opotřebení v tribologických systémech. Opotřebení je vyjádřením již probíhajícího procesu v těchto systémech a značí trvalý úbytek materiálu z povrchu při jejich vzájemném pohybu nebo při pohybu média během provozu. Vlivem opotřebení povrchů se do maziva uvolňují částice kovů a jiných sloučenin. Ve značné míře jsou pro tribodiagnostiku využívány specializované firmy a jejich laboratoře. Pravidelné testování olejů umožňuje včasné odhalení problémů, a významně tak snižuje riziko potenciální poruchy. [10]

2.4.5 Spotřeba elektrické energie a dalších zdrojů

V současné době je jedním z primárně sledovaných parametrů spotřeba elektrické energie. Nejen z ekonomického hlediska, ale taktéž podle míry spotřeby energie, lze diagnostikovat stav zařízení. Jedním z nejdražších médií na výrobu je stlačený vzduch. Při výrobě stlačeného vzduchu za pomoci pístového kompresoru postupně narůstá opotřebení pístních kroužků, čím se snižuje efektivita kompresoru a spotřeba elektrické energie značně stoupá. Zvýšená spotřeba stlačeného vzduchu nebo horké páry je považována za indikaci závady jako je například únik z potrubního vedení, případně praskliny na výměnících.

Jako jedním z dalších sledovaných faktorů lze považovat počet zmetků neboli produktů nevhodných k použití. Zvýšení produkce nepoužitelných výrobků lze považovat za indikaci závady, případně jiného poškození zařízení.

Graf 2 - Pístový kompresor



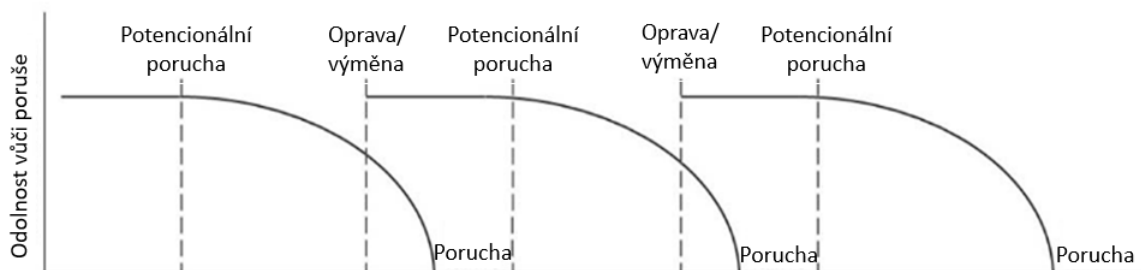
Zdroj: Archiv autora

V grafu číslo dvě je znázorněna spotřeba elektrické energie pístového kompresoru, který slouží pro vyfukování PET lahví v pivovaru Staropramen s.r.o., za období 14 měsíců. Jak lze vidět, po 8000 motohodinové odstávce v listopadu, se spotřeba sníží. V průběhu půl roku narůstá do další odstávky, která ale neobsahuje tolik úkonů jako předchozí, a snížení spotřeby není tak razantní. Sledováním spotřeby energie se dá přesně určit technický stav pístních kroužků a těsnění vysokotlakého kompresoru.

2.5 Proaktivní údržba

Proaktivní údržba slouží jako opak reaktivní údržby. Je to aktivita, která se dělá za účelem odhalení a nápravy kořenové příčiny poruch na zařízeních. Účelem není zkoumání faktorů degradace materiálu, ale identifikace a oprava abnormálních nebo úchylkových příčin, které vytváří nestabilní provozní podmínky. PrM – proaktivní údržba je hlavní obrana proti degradaci a snižování výkonů. Tímto způsobem lze dosáhnout maximalizace dostupnosti a efektivity strojů v průběhu životních cyklů a značné snižování nákladů spojených s údržbou. Identifikace kořenových příčin a jejich náprava dokáže zajistit, že k degradaci v ideálním případě nikdy nedojde, a tím může proaktivní údržba prodloužit životnost mechanických komponentů a systémů. Proaktivní údržba nahrazuje tradiční identifikaci degradace s rozpoznáváním kořenových příčin poruch. [2]

Graf 3 - Opakování poruch



Zdroj: Bengtsson, Marcus. *On the importance of combining “the new” with “the old” – One important prerequisite for maintenance in Industry 4.0.* ScienceDirect. [Online] 25. 07 2018. [Citace: 01. 10 2023.] <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.065> (upraveno)

Z grafu je vidět křivku opakování se stejného defektu, který je prediktivně odhalen a opraven před způsobením poruchy. V tomto případě se nijak nezkoumá jeho vznik, a proto se frekvence vzniku defektu pravidelně opakuje.

Kořenová příčina je jakákoliv podmínka systému, která může vést k degradaci materiálu nebo snížení výkonnosti. U nového stroje, který splňuje všechny specifikace, by neměli existovat žádné nepříznivé situace, které by se mohly projevit jako kořenové příčiny poruchy. To platí pouze v případě, kdy je stroj v prostředí, pro který je určen, jsou splněny podmínky výrobce, dodržuje se doporučený způsob mazání součástí stroje a rovněž se udržuje v čistotě. V praxi je často uplatněn pojem CIL (clean, inspect, lube). [2] [11]

Proaktivní údržba představuje zcela nový přístup v oblasti údržby. Pro její úspěšné provádění je potřeba, aby zaměstnanci disponovali širší znalostí strojních systémů. Takový personál musí porozumět provozním principům a charakteristice strojů, aby byl schopen správně identifikovat kořenové příčiny poruch. Jinými slovy, údržbáři musí být vyškoleni pro rozpoznávání neobvyklých provozních podmínek, které charakterizují stavové poruchy, podobně jako personál v tradiční údržbě musel rozpoznávat anomálie a symptomy degradačních poruch. Důležitým krokem při implementaci proaktivní údržby je zainteresovat všechna oddělení. Běžně využívanou metodou je vytvoření týmů s různými funkcemi, které mají za úkol přinášet řešení kořenových příčin. [2]

Obrázek 3 - Proaktivní údržba



Zdroj: Fitch, E. C. *Proactive Maintenance for Mechanical Systems*. Oxford : Elsevier Science Publishers Ltd, England , 1992. ISBN 1-85617-166-3.

Nastavení proaktivní údržby vyžaduje několik kroků:

- monitorování klíčových parametrů,
- nastavení rozsahu pro každý klíčový parametr,
- rozpoznání, kdy tyto parametry indikují nestabilní stav stroje,
- hloubková analýza a obnovení stability systému.

2.6 Ekonomické aspekty

Investice do údržby nabízí jednu z nejlepších možných návratností v podobě snižování nákladů a zvyšování produkce. Přesto mnoho investic do údržby bývá odmítnuto a vnímáno buď s nedostatečným zájmem, nebo dokonce s nedůvěrou. Pokud jsou sečteny všechny výpadky technologie za dané časové období bez plánované údržby, budou vyšší než se zavedením PM a PdM. Při zavádění kteréhokoliv typu údržby v závodu je eliminování nežádoucích výpadků hlavním cílem, který musí vedení závodu chápat. [3]

Na makroekonomické úrovni se firma rozhoduje, zda přístup k plánované údržbě má smysl vzhledem k celkovým cílům organizace a požadavkům podnikání. Při rozhodování je vedením firmy nahlíženo na současné provozní náklady a predikce nákladů na provoz s ohledem na navrhované změny. Zavedení prediktivní nebo proaktivní údržby znamená velké počáteční náklady, a proto se analytici snaží předpovědět, za jakou dobu se investice vrátí. Rychlost, za jakou dobu se investice vrátí (ROI), je klíčovým faktorem při rozhodování. V současné době firmy často vyžadují návratnost do třech měsíců. To je u zavádění prediktivní a proaktivní údržby nesplnitelné. [3] [12]

Mikroekonomická úroveň se zabývá jednotlivým zařízením nebo skupinou strojů. I když se na makroekonomické úrovni rozhodlo o výběru údržbové strategie, která bude dominantní, každé zařízení má své faktory, které ovlivní způsob aplikace PM nebo PdM. Jakmile je rozhodnuto o strategii pro dané zařízení, zkoumají se konkrétní PM úkoly, které by měly být prováděny. Na této nejnižší úrovni jsou porovnávány náklady na údržbu s náklady a důsledky poruchy, které je tímto způsobem zabráněno. [3] [12]

Při odhadu nákladů spojených s údržbou je důležité rozdělit je na dvě kategorie. Pravidelné náklady a jednorázové investice při zavádění nových programů.

Jednorázové náklady zahrnují:

- školení a certifikaci zaměstnanců k usnadnění změny kultury na pracovišti,
- modernizaci zařízení,
- nákup zařízení pro PrM,
- nákup licencí a počítačových systémů,
- počáteční práci při vytváření seznamu úkolů a zavedení rutin PM a PdM.

Pravidelné náklady:

- náhradní díly a pravidelné výměny dle PM,
- reaktivní opravy,
- pravidelné školení.

Při odůvodňování investic do nových údržbových programů je také důležité správné vyhodnocení ztrát spojených s neplánovanými poruchami. Mohou být rozděleny na náklady, které spadají pod oddělení údržby a náklady operační. Jedním z nejsilnějších podnětů je limitování operačních nákladů spojených s výpadky provozu. Z rozdělení je možné vidět, že operační náklady jednoduše převyšují náklady na reaktivní údržbu poruchy. [12]

Údržbové náklady:

- materiál, díly,
- pracovní síla,
- služby subdodavatelů,
- nouzové nákupy náhradních dílů.

Operační náklady:

- výpadek provozu,
- nehody,
- zákaznické stížnosti a reklamace,
- nadbytečná spotřeba energie,
- zmeškané plány a termíny,
- ztráta businessu,
- kaskádové zastavení výroby.

2.7 Údržbové strategie

Během zavádění údržby v podniku je příznivé se zaměřit na celkovou strategii firmy než pouze na jednu část, jako například preventivní nebo proaktivní údržbu. Různé přístupy k údržbě mají své specifické vlastnosti a využití. Mezi nejznámější patří CBM, RCM a TPM.

Condition based maintenance (CBM)– údržba založená na stavu

CBM se zaměřuje na sledování reálného stavu zařízení a jeho degradace. Ke sledování stavu se využívají vizuální inspekce a různé techniky, které poskytují možnost sledování trendů na zařízení v reálném čase nebo v přesně stanovených intervalech. Při objevení degradace na zařízení se následně optimalizuje údržbový plán, a tím se eliminuje neplánované zastavení. To znamená, že zařízení se vyřadí z provozu pouze, když je údržba nevyhnutelná, a ne po uplynutí určitého časového období, jak je tomu u preventivní údržby. [1] [13]

Reliability centered maintenance (RCM) – údržba zaměřená na bezporuchovost

Hlavním cílem je zvyšovat spolehlivost zařízení identifikací kořenových příčin poruch, a tím snížit náklady. RCM se snaží identifikovat každý jeden prvek zařízení, který může selhat. Při správném pochopení příčin jednotlivých selhání je pak možné optimalizovat údržbové úkoly posouzením důsledků poruch a výběrem vhodné strategie údržby. Komplikace při zavádění RCM jsou právě náročné analýzy selhání, které jsou často velmi obsáhlé, a zavedení nápravných opatření je velmi nákladné. Dalším problémem jsou drobné změny v provozu (například změna materiálu), které ovlivní chod zařízení, a proto je nutné analýzy aktualizovat. [1] [13] [14]

Total productive maintenance (TPM) – komplexní produktivní údržba

TPM je založená na proaktivním přístupu při odstraňování hlavních faktorů ztrát při produkci. Důraz se klade na zapojení všech zaměstnanců a změnu firemní kultury. Obsluha stroje je vedena k autonomní údržbě, protože má nejobširnější znalosti o zařízení. Cílem změny kultury je, aby se operátor stroje cítil zodpovědný za práce, které provádí. TPM vyžaduje úzkou spolupráci mezi operátory, údržbou a managementem s cílem neustálého zlepšování. Z hlediska zavádění je TPM nejsložitější, a to hlavně z důvodu odporu lidí vůči kulturní změně. Dalším problémem při zavádění TPM jsou příliš velká očekávání zlepšení a také nedostatečné investice do vzdělání zaměstnanců. TPM není zaměřená jen na odstranění poruch, ale také na odstranění krátkých zastavení, nečinnosti a zlepšování procesů zvyšujících produkci. [1] [13] [15]

Tabulka 1 zobrazuje srovnání popisovaných strategií. Každá z těchto strategií má svoje výhody a je vhodná pro různé situace. Při rozhodování je důležité zvážit dlouhodobé cíle, rozpočet firmy, nebo rozhodnout, zda je důležitější spolehlivost nebo výkon zařízení

Tabulka 1 - Porovnání strategie

Strategie	CBM	RCM	TPM
Úloha	Pravidelně sledovat stav zařízení a komponentů	Systematicky analyzovat spolehlivost systému	Maximalizování produkce změnou přístupu k údržbě
Cíl	Provádět údržbu, když se objeví známky degradace	Identifikovat klíčové komponenty a stanovit efektivní PM a PdM	Maximální produktivita, změna kultury
Benefity	Časná detekce poruch, aktivní sběr dat	Optimalizace nákladů na údržbu, redukce pracovní síly	Zvýšená efektivita výroby, snížení ztrát a prostojů

Zdroj: Autor

2.8 Společné využití

Celkový plán proaktivní údržby zahrnuje prediktivní, ale i reaktivní údržbu. V mnoha případech je využíván takzvaný “run to fail mode“. To znamená, že určitý díl nemá smysl prediktivně kontrolovat nebo preventivně měnit, ale čeká se na jeho selhání. Tyto díly nesmí mít žádný bezprostřední dopad na závod a jeho celkovou produkci. Rozdíl je, že tato porucha je očekávaná, a proto se neaplikují jiné prevence. Správný management skladových zásob musí o takových dílech vědět a udržovat jejich minimální zásobu. Pokud je na takovou poruchu pohlíženo z pohledu totální proaktivní údržby, tak i tady by se hledala řešení, jak prodloužit životnost každé jedné spotřební části zařízení. Skutečného pochopení zařízení nelze dosáhnout bez znalostí provozní efektivity každého stroje nebo systému. Míra poruchovosti je závislá taktéž na tom, zda je zařízení využíváno na kraji jeho kapacity nebo se spouští pouze na krátké cykly a znovu odstaví. [2] [13] [16]

Pro správné nastavení údržbových plánů je nezbytné znát nejen technické parametry, ale také monitorovat celkový provoz. Pokud má podnik kvalitní vstupní data, tak může pracovat na implementaci celkové strategie (RCM, TPM, CBM) nebo jejich hybridní implementaci. Pokud chce podnik zvyšovat celkovou efektivitu a produktivitu, je nejvhodnější použít TPM. RCM se zavádí pro kritická zařízení, u kterých je klíčová spolehlivost. U zařízení s nákladní preventivní údržbou, složitých zařízení nebo technologie, se doporučuje sledování v reálném čase a zavedení CBM. Z důvodu komplikovaného zavádění a vysokých vstupních nákladů je TPM vhodná pro velké podniky, zatímco RCM se může implementovat ve středních nebo menších závodech. [2] [13] [16] [17]

3 Cíl a metodika práce

Cílem bakalářské práce je popsat koncepci reaktivní, preventivní, prediktivní a proaktivní údržby a její aplikace v praxi ve zvoleném podniku, kterým je logistický sklad ve středních Čechách. V teoretické části práce je vysvětlení jednotlivých údržbových směrů a způsob jejich aplikace. V praktické části práce je zdokumentování současného rozdělení technologie logistického skladu podle kritičnosti, plánování údržbových aktivit, popis a zhodnocení zavedené údržbové strategie.

Úvodní část práce je řešena formou literární rešerše, která popisuje jednotlivé druhy údržby a jejich rozdíly, na kterou následně navazuje popis a ukázka řešení. Ve zvoleném skladu je popsáno rozdělení technologie podle její kritičnosti a následné plánování údržby. Po rozdělení kritičnosti následuje ukázka nového modelu rozdělení kritičnosti, který bude ve skladu implementován v roce 2025. V další části práce jsou popsány zavedené nástroje pro prediktivní a proaktivní údržbu a jejich využití ve zkoumaném skladu. Následně bylo vybráno jedno zařízení, na kterém se aplikuje proaktivní údržba, účelem byla ukázka analýzy chyb a jejich následné řešení včetně odstranění příčiny těchto závad. Poslední část práce se zabývá zhodnocením současného stavu, přínosy a nedostatky zavedených strategií.

4 Výsledky

Ve zkoumaném skladu je technologie rozdělena do třech úrovní kritičnosti. V příložené tabulce 2 je soupis všech zařízení v budově a jejich rozdělení. Jako zařízení se považují dopravníky, balicí stanice, etiketovací stroje, stroje pro sortování balíku a všechny technologie spojené s požární ochranou budovy. Analýza dopadu prostožů je nezbytná pro správné určení kritičnosti.

Ve zkoumaném skladu byla kritičnost posuzována pouze na základě jedné podmínky, a to, zda má zařízení redundanci při jeho výpadku prostřednictvím duplicitních zařízení. Pokud je zařízení bez redundance, je jeho kritičnost jedna. U zařízení s jednou náhradní cestou je kritičnost dvě a kritičnost tři je zvolena u zařízení, kde výpadek neovlivní chod budovy, protože existuje několik náhradních cest.

Tabulka 2 - Rozdělení kritičnosti technologie

Kritičnost	Zařízení	Procenta
Kritičnost 1 - bez redundance	993	16 %
Kritičnost 2 - jedna redundance	4093	66 %
Kritičnost 3 - vícero redundancí	1096	18 %
Součet	6182	100 %

Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

Jak je z podmínky kritičnosti zřejmé, tak nejsou vzaty v úvahu žádné jiné faktory, jako například četnost poruch nebo délka opravy. Také je možné, že zařízení, jehož porucha nijak neovlivní chod celého skladu, může mít kritičnost 1, protože je jediné svého druhu.

Rozdělení technologie popsané v tabulce dvě bylo implementováno po otevření skladu před deseti lety a od té doby nebylo nijak aktualizováno. Protože je sledovaný sklad součástí velké korporátní sítě skladů, musí se řídit pravidly, které určuje centrální tým plánování údržby pro region, ve kterém se sklad nachází.

Na základě výše popsaných důvodů je vhodné překvalifikovat všechna zařízení podle navrhovaného postupu, který byl vypracován pro zkoumaný sklad a jeho další pobočky v regionu. Kritéria navrhl centrální tým pro plánování údržby. Centrální tým zastřešuje plánování odstávek a rozpočtů pro údržbu v daném regionu, ale také navrhuje i četnost jednotlivých aktivit. Například pokud by chtěl jeden ze skladů v regionu upravit frekvenci kontrol na vybraném zařízení, musel by o to zažádat centrální tým, který by návrh

přezkoumal, a pokud by ho zhodnotil jako správný, zavedl by ho ve všech skladech současně. Sledovaný sklad se nachází v regionu střední Evropa, kam spadá Česko, Polsko a Slovensko, celkově se jedná o 10 skladů.

Následující postup se vyhodnocuje samostatně pro každé jedno zařízení. V tabulce 3 je popsáno bodové hodnocení všech kategorií, podle kterého by se měla všechna technologie ve zkoumaném skladu přehodnotit na základě dlouhodobých trendů. Hodnocení je založeno na nasbíraných datech za deset let provozu skladu a jejich správnost je závislá na svědomitosti techniků při zaznamenávání pracovních aktivit do systému pro správu údržby CMMS. Toto hodnocení zatím nebylo implementováno.

Postup pro hodnocení zařízení:

1. Ohodnotit každé zařízení podle závažnosti dopadu na provoz.
2. Přiřadit zařízení body podle průměrné délky trvání poruch na základě dat z CMMS.
3. Přiřadit zařízení body frekvence výskytu poruch.
4. Přiřadit zařízení body podle možnosti včasné detekce defektů.
5. Rozhodnout, zda má zařízení dopad na životní prostředí nebo bezpečnost provozu.
6. Rozhodnout, zda porucha na zařízení ovlivní kvalitu zboží pro koncového zákazníka.

Tabulka 3 - Hodnocení kritičnosti zařízení

Počet bodů	Závažnost poruchy a její dopad na produktivitu skladu
2	Ovlivněná jedna pracovní stanice / 1 zaměstnanec
4	Ovlivněná jedna pracovní stanice / 2 zaměstnanci
6	Ovlivněné dvě pracovní stanice / 4 zaměstnanci
8	Výpadek klíčového systému – zastavení celého oddělení
10	Zastavení provozu celého skladu
Počet bodů	Průměrná délka opravy
2	< 30 minut na opravu
4	30-60 minut na opravu
6	60-120 minut na opravu
8	120-180 minut na opravu
10	180 > minut na opravu
Počet bodů	Četnost poruch
2	Méně než jedna porucha za 2 roky
4	Jedna porucha za rok
6	Jedna porucha za 6 měsíců
8	Jedna porucha za čtvrtletí
10	Jedna porucha za měsíc
Počet bodů	Detekce defektů
2	První příznaky lze detekovat alespoň měsíc předem
4	První příznaky jsou detekovány týden před selháním
6	První příznaky jsou detekovány 24 hodin před selháním
8	První příznaky poruchy budou detekovány pouze několik hodin před selháním.
10	Nejsou k dispozici žádné nástroje nebo opatření k detekci. Selhání nastane bez možnosti detekce.
Počet bodů	Dopad na životní prostředí a bezpečnost
0	Selhání zařízení nepředstavuje riziko v oblasti bezpečnosti nebo environmentálních ztrát
50	Selhání zařízení by pravděpodobně vedlo k závažnému riziku v oblasti bezpečnosti nebo životního prostředí.
Počet bodů	Ovlivnění kvality
0	V případě selhání není žádný významný dopad na konečného zákazníka.
50	Pokud toto zařízení selže, má ZÁVAŽNÝ dopad na zákazníka (vyjma zpoždění dodávek)

Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

Po ohodnocení zařízení se použije vzorec pro výpočet kritičnosti.

$$(Z * O) + (P * \check{C}) + E + K = \text{Celkové hodnocení}$$

Z – Závažnost

O – Délka opravy

P – Detekce poruch

Č – Četnost poruch

E – Dopad na životní prostředí a bezpečnost

K – Ovlivnění kvality

Na základě bodového hodnocení se pak přidělí kritičnost zařízení podle tabulky 4.

Tabulka 4 - Výsledná kritičnost

Kritičnost	Počet bodů
1	Víc než 100
2	50 až 100
3	Méně než 50

Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

Pro ujasnění výpočtu kritičnosti je v tabulce 5 porovnaný lis na karton, který se ve skladu nachází na dvou místech a jeho zastavení nijak neovlivní chod budovy. Podle původního hodnocení je jeho kritičnost 2 a provádí se na něm množství přebytečných kontrol, které jsou popsány v odstavci plánování podle kritičnosti. Na druhém místě v tabulce je paletovací robot, jehož kritičnost je v obou případech 1, protože jeho zastavení ovlivní celé oddělení distribučního skladu a způsobí bezpečnostní riziko v důsledku ručního překládání palet. Průměrná délka opravy byla zvolena na základě historických dat.

Tabulka 5 - Příklad hodnocení

Zařízení	Závažnost	Průměrná délka opravy	Četnost poruch	Detekce defektů	Životní prostředí a bezpečnost	Ovlivnění kvality	Bodové hodnocení
Lis na kartony	4	10	2	2	0	0	44
Paletovací robot	8	6	4	4	50	0	114

Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

Všechna zařízení mají nastavený plán preventivní údržby, který byl implementován na základě technické dokumentace a doporučení od dodavatele. Tyto preventivní údržby zahrnují denní kontroly, mazání, čištění a výměny dílů. Zkoumaný sklad má nastavená pravidla všech dalších prediktivních kontrol podle příložené tabulky 6. Jejich četnost se mění podle sezóny. Hlavní sezóna začíná 1. listopadu a končí 24. prosince. Kromě tribotechnické diagnostiky se všechny prediktivní kontroly v hlavní sezóně provádí na týdenní bázi, aby se zabezpečil nepřetržitý chod skladu a všechny defekty okamžitě detekovali a odstranili v nejbližším servisním okně.

Tabulka 6 - Plánování podle kritičnosti

Kritičnost	Aktivita	Četnost v týdnech	
		Mimo sezónu	Hlavní sezóna
1	Ultrazvuková inspekce – motory, převodovky, ložiska	4	1
	Termografická inspekce – motory, převodovky ložiska	4	1
	Termografická inspekce rozvaděčů	4	1
	Kontrola klínových řemenů stroboskopem	12	1
	Tribotechnická diagnostika	52	52
2	Ultrazvuková inspekce – motory, převodovky, ložiska	12	4
	Termografická inspekce – motory, převodovky ložiska	12	4
	Termografická inspekce rozvaděčů	26	4
	Kontrola klínových řemenů stroboskopem	12	4
	Tribotechnická diagnostika	52	52
3	Není aplikována žádná aktivita	N/A	N/A

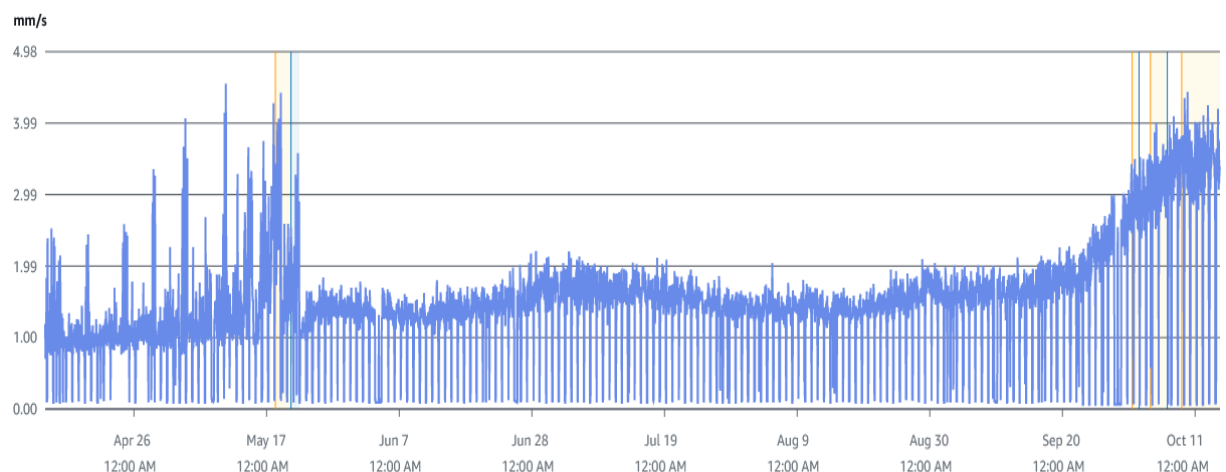
Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

4.1 CBM – Condition based maintenance

Ve zkoumaném skladu je zavedená vibro a termodiagnostika pomocí technologie Amazon Monitron. Senzory monitron jsou nainstalované na všech zařízeních kritičnosti 1. Na každý dopravník je nainstalováno několik senzorů podle jeho typu. Standardně jsou nainstalované na motor, převodovku a všechny přístupná ložiska. Všechna data o vibracích a teplotě jsou ukládána na server a jejich zobrazení a editování je možné ve webovém prohlížeči. Pokud dojde ke změně teploty nebo vibrací, uživatel dostane upozornění a může se podívat na data v libovolném časovém horizontu – den, měsíc, rok. Systém generuje upozornění na základě předem definovaných hodnot. Na základě upozornění je k danému zařízení vyslán technik, který provede další měření ultrazvukem. Pokud není nalezen žádný defekt, Monitron následně automaticky posune hladinu pro detekci problému výše a nebude vyhlášovat alarm na základě nastaveného základního parametru.

Graf 4 zobrazuje vibrace na napínací rolně dopravního pásu v časovém horizontu 6 měsíců. Na grafu je možné vidět pokles po výměně ložisek v květnu a opětovné zvýšení vibrací po čtyřech měsících, kdy se naplánovala další výměna. Důvod rychlé degradace ložisek se ve zkoumaném skladu nijak neanalyzuje a nehledá se ani kořenová příčina nebo její odstranění. Tato technologie je ve zkoumaném skladu zavedená pouze jeden rok a dlouhodobé statistiky se pouze začínají sbírat tak, aby se daly podrobněji zkoumat a analyzovat. [17]

Graf 4 - Trend vibrací



Zdroj: Archiv autora

Další důležitou technologií je ultrazvukový systém s názvem UE Systems, který se využívá pro měření akustických emisí. Na obrázku 4 je zobrazena sada Ultraprobe 15,000 BTH, která se ve zkoumaném skladu využívá ke hledání úniků tlakového vzduchu pomocí dálkového modulu Trisonic. Přídavným prvkem je stetoskopická kontaktní sonda, která se využívá pro monitorování vnitřních ultrazvuků v ložiscích a převodovkách. Před každým měřením je potřebné provést kalibraci zařízení pomocí tónového generátoru. [18] [19]

Obrázek 4 - Sada ultraprobe 15,000 BTH



Zdroj: Archiv autora

1. Pistolové tělo s dotykovým displejem.
2. Tónový generátor pro kalibraci přístroje.
3. Sluchátka.
4. Dálkový modul Trisonic.
5. Stetoskopický modul s gumovým tlumičem.
6. Nabíjecí kabely, náhradní baterie.

Pro zabezpečení kontinuity správného měření a odečítání hodnot ze stejného bodu se na zařízení nalepí kovový kontaktní pin. Na obrázku 5 je umístěný senzor Monitron oranžové barvy a kontaktní pin označený štítkem MP. V konkrétním uvedeném případě jde tedy o měřený subjekt motor-převodovka, značený zkratkou MP.

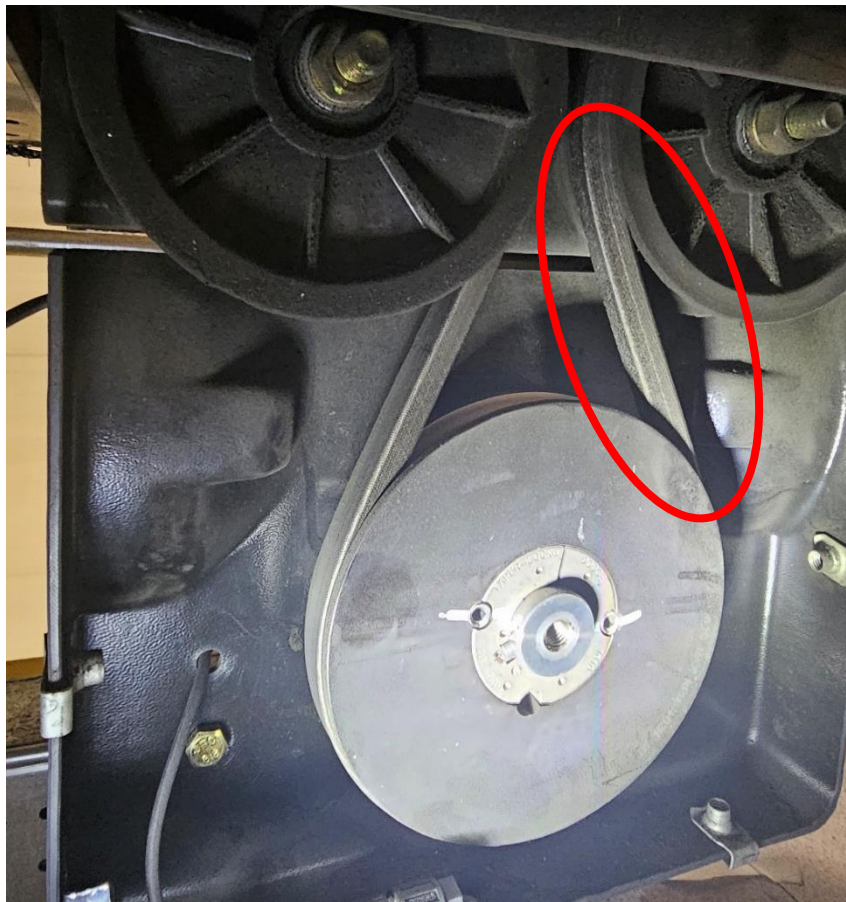
Obrázek 5 - Měřicí bod a monitron



Zdroj: Archiv autora

Posledním zařízením, které je ve skladu využíváno, je stroboskop. Díky schopnosti generovat záblesky světla různých frekvencí umožňuje měřit otáčkové rychlosti strojů. Když frekvence otáčení stroje odpovídá frekvenci světelných pulzů, pak se díky stroboskopickému jevu proces jeví jako stacionární. Tato vlastnost je využívána pro kontrolu klínových a plochých ozubených řemenů na dopravnících, které fungují bez zastavení několik dnů, a proto je potřeba provádět kontroly při zapnutém stroji. [20]

Obrázek 6 - Klínový řemen



Zdroj: Archiv autora

Na obrázku 6 je vyfocený klínový řemen, na kterém je vydřená drážka po celé jeho délce. Poškození bylo objeveno použitím stroboskopu a díky tomu byla na následující servisní okno naplánovaná nápravná akce. Toto poškození nebylo volným okem při vysokých otáčkách viditelné. Díky stroboskopickému jevu bylo možné poškození zpozorovat. Nesprávně vycentrovaný klínový řemen se opotřebovával o hranu řemenice. Kontrola za provozu s pomocí stroboskopu umožňuje efektivněji zkontrolovat více zařízení v kratším čase a díky tomu v servisních oknech naplánovat pouze nápravné akce.

4.2 Zavedené nástroje pro proaktivní údržbu

Ve zkoumaném skladu se proaktivní údržba aplikuje pouze na jednom typu zařízení, na kterém se údržba snaží odstranit všechny úchytkové stavy, které by mohly zapříčinit zastavení stroje. Jedná se o automatické etiketovací stroje s názvem SLAM. Akronym SLAM je složen ze čtyř slov, scan, label, apply, manifest. SLAM zahrnuje celý proces přípravy zásilky před jejím odesláním ke koncovému zákazníkovi. Zásilka je odvážena, vyfocena, naskenována a označena etiketou s finální adresou a odpovídajícím digitálním kódem (EAN, QR) se všemi informacemi pro doručovací firmu. Jedno zařízení SLAM odbaví až 2700 balíčků za hodinu. I několikaminutový výpadek tohoto zařízení ovlivní celý proces a zastaví několik oddělení jako vyskladňování, balení, odesílání. Z tohoto důvodu je důležitý stoprocentní stav Slamů.

Obrázek 7 - SLAM



Zdroj: Archiv autora

Na obrázku 7 je zobrazena hlavní část zařízení SLAM bez vstupních a výstupních dopravních cest. Vstup do zařízení je chráněn bezpečnostní světelnou závorou.

1. Vstupní váha.
2. Vstupní kamery pro načtení balíku.
3. Tiskárny 1 a 2.
4. Aplikační rameno a hlava.
5. Výstupní kamery pro kontrolu štítků.

Nejdůležitější data pro predikci chyb se sbírají pomocí programu navrženého speciálně pro sledovaný sklad s názvem OEE – Overall Equipment Effectiveness. Tento systém zaznamenává data o všech systémech ve sledovaném skladu, ale aktivně se sledují pouze Slamy a jejich výkonnost. Na základě výstupu z OEE je možné identifikovat všechna zastavení zařízení, jeho chybové záznamy a celkovou kvalitu.

OEE neboli celková výkonnost je vypočítávaná ze vzorce níže.

$$\text{Výkonnost} * \text{Dostupnost} * \text{Kvalita} = \text{OEE}$$

Hodnota výkonnosti zobrazuje počet konečných výstupů ze slamu za požadovanou časovou jednotku versus jeho maximální kapacita. Z pohledu údržby ve zkoumaném skladu je výkonnost zanedbána, protože je ovlivněna zákaznickou poptávkou a rychlostí balení zásilek operátorů na balících linkách.

Dostupnost zohledňuje nepředvídatelné výpadky a doplňování materiálu nebo odstranění nežádoucích zastavení na dopravníku. Kvalita zohledňuje vadné produkty, které vyžadují předělání nebo další kontrolu operátorem. Zásilky, které neprojdou kvalitou jsou vyřazeny za Slamem na vedlejší pás. Za kvalitativní chyby se považuje nesprávná váha, kterou lze vyvodit z daného počtu patřičných produktů obsažených v zásilce, nebo kvalita čitelnosti štítku s adresou. Kvalita se vypočítává jako podíl dobrých kusů a celkového počtu zásilek, které byly zpracované konkrétním Slamem.

Na obrázku 8 je náhled systému OEE, kde je zobrazen aktuální stav všech Slamů, které jsou v provozu a jejich statistiky za poslední hodinu. Tento náhled není vhodný pro dlouhodobé trendy, a proto je nutné ze systému stáhnout data k jednotlivým Slamům za požadované období a ty následně v tabulkovém akceleratoru upravit a filtrovat.

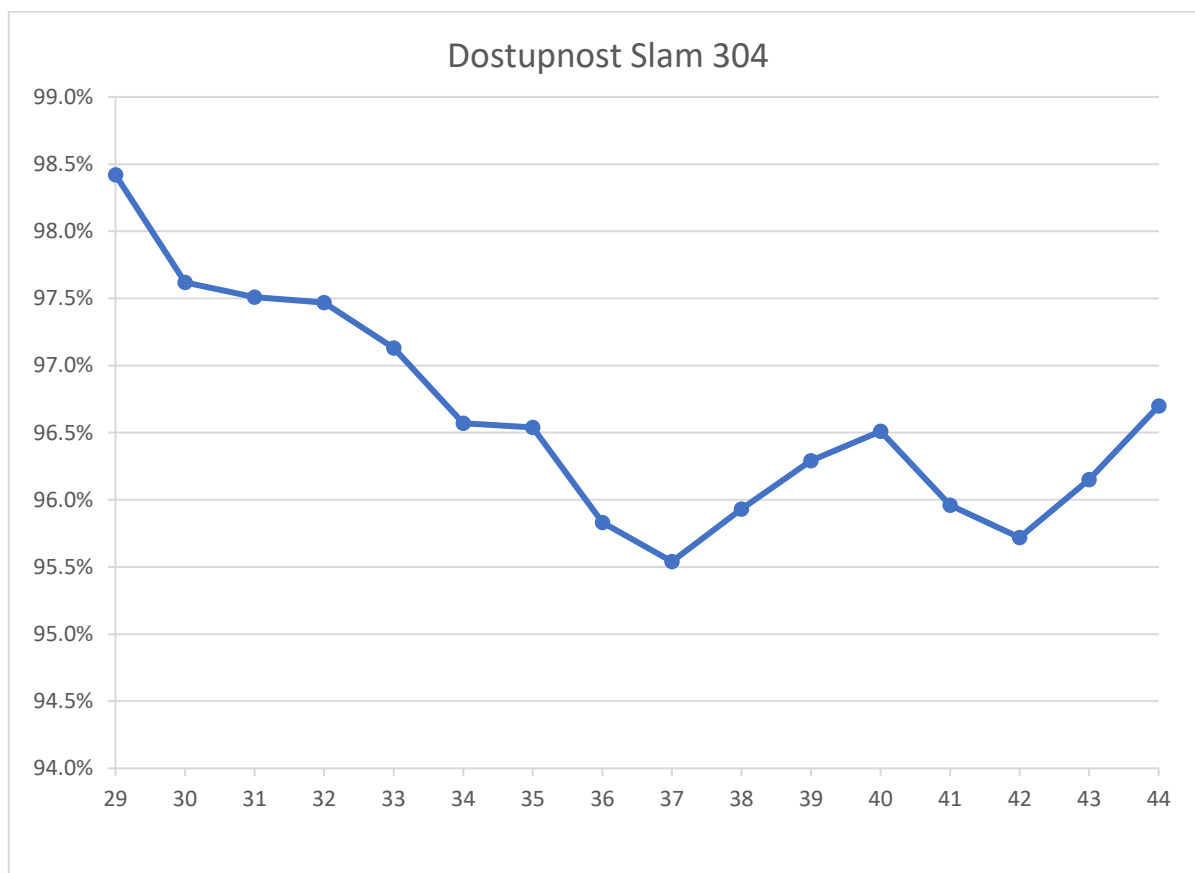
Obrázek 8 - OEE



Zdroj: Archiv autora

Ve sledovaném skladu byl zkoumán Slam s označením 304, který vykazoval dlouhodobě klesající dostupnost a efektivitu, a tím vyžadoval pravidelné zásahy údržby. Po přivolání technika ke Slamu se jednalo hlavně o odstraňování nežádoucích zastavení a kalibraci tiskáren. Na přiloženém grafu 5 je zobrazený trend dostupnosti za posledních 15 týdnů. Technické úpravy s pomocí OEE se provedly v týdnu 41 a pak je vidět opětovné stoupání dostupnosti. Pro nalezení kořenové příčiny se porovnávají chybové kódy jednotlivých vyřazení kvality a zároveň chybové kódy zastavení celého stroje.

Graf 5 - Dostupnost Slamu 304



Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

V tabulce 7 jsou zobrazené kvalitativní vyřazení v týdnu 41 a 42, kdy bylo analyzováno vyřazení z důvodu nečitelného čárového kódu nalepeného na zabalené zásilce. Nepřečtená zásilka je pak vyřazena na speciálně určený dopravník, nazýván Výkop 2, kde obsluha stroje musí zásilku zkontrolovat a ručně zpracovat. Při velkém množství vyřazených zásilek se Výkop 2 přeplní a zastínění odpovídajícího senzoru způsobí zastavení celé balicí linky, jelikož pro plynulý chod je nutností neustálá možnost vyřazení v případě potřeby.

Při zkoumání stavu čtecí kamery byl zjištěn špatný úhel kamery, která nesnímala celý dopravník, pouze jeho část. Po upravení pozice kamery se v týdnu 42 vyřazení snížilo trojnásobně. Při dalším šetření bylo zjištěno, že technik při preventivním čištění kameru naklonil a nevrátil do původní pozice. Jako nápravný a proaktivní řešení se na všech Slamech označila správná poloha čtecích kamer.

Při sledování chodu balicí linky bylo pozorováno, že balíky jdou na dopravníku uložené přes sebe nebo jejich směr je značně nesouměrný a chaotický. Tím se zvyšuje počet vyřazení kvůli nesprávné váze zásilky nebo naskenování více štítků najednou. Následný problém, který je tím způsobený, je náraz aplikační hlavy tiskárny štítků o zásilku, která nebyla načtena, a stroj ji neočekával. V tomto případě se aplikační hlava spouští vertikálně dolů na předem očekávanou výšku balíku. V tabulce 8 jsou zobrazené všechny chybové kódy zastavení Slamu v týdnech 41 a 42. Opravením čtecí kamery se snížila chyba přeplnění Výkopu 2, ale také počet nežádoucích zastavení Výkopu 2. Vysoký počet servisních zastavení stroje, který je zaznamenán v tabulce 8 je způsoben převážně zaseknutím tiskové hlavy o neočekávaný balík.

Díky těmto datům dokáže oddělení údržby identifikovat různé kořenové příčiny a předcházet tak větším poškozením, které by nastaly například opakovaným narážením tiskové hlavy o zásilky, a tím způsobily její poškození. Analýza počtu nežádoucích zastavení dokáže také odhalit odrazku optického senzoru dopravníkového pásu, která je znečištěná a způsobuje krátké zastavení nebo sníženou funkci čtení čárových kódů, což může indikovat poškozenou tiskovou hlavu. Oddělení údržby má vyhrazený tým pro analýzu chyb na Slamech, hledání kořenových příčin a jejich odstraňování.

Tabulka 7 - Kvalitativní vyřazení

	Týden 41.	Týden 42.
Vyřazení špatné kvality	Počet	Počet
Nepřečten čárový kód zásilky	3553	1113
Nenalezena zóna pro nalepení štítku	1469	1056
Váha mimo toleranci	1321	1055
Nepřečten čárový kód destinace	847	861
Chybí data pro zákazníka	589	572
Naskenováno víc štítků najednou	431	346
Chybí štítek – Bezpečnostní označení	247	237
Třídící dopravník je plný	238	295
Zásilka zrušena	154	185

Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

Tabulka 8 - Chybové kódy zastavení

Týden 41.		Týden 42.	
Kód zastavení	Počet	Kód zastavení	Počet
Přerušení vstupní brány	426	Přerušení vstupní brány	368
Výkopový dopravník přeplněn	149	Výkopový dopravník přeplněn	102
Nežádoucí zastavení na třídícím dopravníku	59	Nežádoucí zastavení na třídícím dopravníku	62
Balík ztracen pod tiskárnou 2	55	Nežádoucí zastavení na výkopu – čidlo 1	40
Nežádoucí zastavení na výkopu 2 - čidlo 2	54	Balík ztracen na vstupu	37
Nežádoucí zastavení na výkopu 2 - čidlo 1	42	Balík ztracen pod tiskárnou 2	29
Nežádoucí zastavení na vstupu	25	Nežádoucí zastavení na výkopu 2 - čidlo 1	26
Balík ztracen na vstupu	23	Nežádoucí zastavení na výkopu 2 - čidlo 2	21
Nežádoucí zastavení na váze	22	Nežádoucí zastavení před tiskárnou 2	20
Nežádoucí zastavení na výkopu 2	21	Nežádoucí zastavení na vstupu	18
Nežádoucí zastavení před tiskárnou 2	19	Nežádoucí zastavení na výkopu 1	16
Nežádoucí zastavení na výkopu 1	17	Nalezen nesprávný štítek	15
Balík ztracen pod tiskárnou 1	11	Nežádoucí zastavení na váze	13

Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

Tabulka 9 zobrazuje vývoj dostupnosti všech Slamů za poslední 3 roky. Sloupec počet nálezů PM zobrazuje počet vytvořených nápravných akcí, které technici zaznamenali při pravidelných kontrolách. Z tabulky 9 je možné vidět snížení počtu preventivních údržeb o 24.58 % mezi roky 2021 a 2023. Nejdůležitější ukazatel pro management skladu je dostupnost Slamů, protože jejich nepřetržitý chod je klíčový pro plynulý chod všech oddělení. Zkoumáním kořenových příčin a jejich odstraňováním se zvýšila dostupnost a taky snížil počet reaktivních zásahů. V roce 2023 je možné vidět nárůst ve spotřebě náhradních dílů a taky snížení kvality (zvýšení kvalitativních vyřazení stroje). Tento trend byl způsoben změnou obalového materiálu z kartonových krabic na papírové obálky, které vyžadovaly přesunutí čtecích kamer do jiné pozice, a instalaci dalších prvků, jako vodících lišt a výškových čidel, které se po instalaci musely dlouho seřizovat a tak ovlivnily celoroční výsledek.

Tabulka 9 - Meziroční přehled údržby zařízení SLAM

Rok	Počet nálezů PM	Počet reaktivních zásahů	Spotřeba náhradních dílů	Dostupnost SLAMů (%)	Kvalita SLAMů
2021	129	111	476 000 Kč	95.52 %	97.78 %
2022	111	81	386 000 Kč	96.70 %	97.86 %
2023	105	76	647 000 Kč	97.37 %	97.22 %

Zdroj: Autorovo zpracování interních firemních dat

5 Závěr

Ve zvoleném logistickém skladu má oddělení údržby název RME. Tato zkratka znamená Reliability Maintenance Engineering, a tím naznačuje, že celá údržba je vedená ke strategii RCM. Z popsaných druhů zavedené údržby lze vidět značné investice do oddělení, ale také i velké plýtvání dostupnými zdroji. Údržba vykonává současně mnoho aktivit, které spadají pod různé údržbové směry a navzájem se duplikují. Zařízení kritičnosti 1 podléhají všem kontrolám, které jsou v podniku zavedené. Podle uplatněných pravidel pro plánování údržby je na zařízení kritičnosti 1 nainstalován senzor Monitron, který snímá teplotu a vibrace, a zároveň se u něj provádí pravidelná kontrola termokamerou a denní obchůzky. Zkoumaný sklad má také zavedené preventivní výměny dílů, i když nevykazují známky degradace a jsou aktivně sledované v rámci CBM.

Nejdůležitějším faktorem pro zkoumaný sklad je spolehlivost zařízení, a proto je RCM správnou cestou. V současné době je sklad převážně orientován na CBM, protože aktivně sleduje a sbírá spousty dat, na základě kterých se mění díly v servisních oknech. Podle Interního firemního CMMS systému se denně provádí až 55 plánovaných aktivit, které jsou rozděleny mezi pracovníky údržby na denní i noční směně. Zavedením nového modelu kritičnosti a přehodnocením kontrol, které jsou redundantní, by oddělení RME získalo víc času pro analýzu nasbíraných dat, které jsou nezbytné pro správné zavedení RCM. Hlubkové analýzy poruch jsou aplikované pouze na zařízení SLAM, i když údržba disponuje dostatkem dat pro další zařízení.

Proaktivní odstraňování defektů na Slamech zlepšilo jejich celkovou dostupnost o 1.85 % a počet reaktivních zásahů se snížil o 31 %. To znamená, že 14 zařízení SLAM zpracuje v průměru o 699 balíků za hodinu více. Nejdůležitější změny, které přispěly ke zlepšení, byly instalace senzorů Monitron, ale také zavedení OEE. To pomáhá rozklíčovat jednotlivá zastavení stroje a díky získaným datům ukáže, zda dochází ke změnám, které snižují spolehlivost zařízení. Jako další opatření se dá zařadit také instalace automatických mazacích systémů nebo označení přesných pozic a vytvoření postupů při instalaci a servisování vysokorychlostních kamer.

Cílem práce bylo popsat koncepci prediktivní a proaktivní údržbu. Pro objasnění problematiky byly popsány jednotlivé druhy údržby, jejich náročnost při zavádění a jejich dopad na životnost strojů. Z praktické ukázky je patrné, že zavedení jakéhokoli údržbového směru (RCM, CBM, TPM) je velmi náročný úkol i pro celosvětové korporáty.

Společnosti jsou navrženy tak, aby dosahovaly největších zisků. Základní problematikou je, kolik z tohoto zisku využít tak, aby se vyhnuly haváriím s velkým dopadem.

V současné době se s tímto problémem setkává mnoho firem a výrobních závodů. Právě z tohoto důvodu vznikají nové pohledy na údržbu, které jsou podporovány univerzitními programy a různými kurzy nebo certifikáty.

Zavedení prediktivní a proaktivní údržby je velmi nákladný a zdlouhavý proces, a proto mnoho podniků nedosahuje požadovaných výsledků. Správné načasování výměny dílu na základě nasbíraných dat je kritické pro udržení nejnižší nákladovosti, a proto se prediktivní údržba jeví jako správný trend v údržbě. Proaktivní údržba je dalším krokem pro rozvoj každé firmy. Správné vyhodnocení kořenových příčin problémů nevyžaduje jen nákladné vyhodnocovací systémy, ale také vysoce kvalifikované pracovníky s technickým zaměřením.

6 Seznam použité literatury a norem

- [1] BLOOM, Neil. *Reliability Centered Maintenance Implementation made simple*. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 0-07-146069-1.
- [2] FITCH, Ernest. *Proactive Maintenance for Mechanical Systems*. Oxford: Elsevier Science Publishers Ltd, England, 1992. ISBN 1-85617-166-3.
- [3] LEVITT, Joel. *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance*. Second Edition. New York: Industrial Press, 2011. ISBN 978-0-8311-3441-9.
- [4] LEVITT, Joel. *The handbook of Maintenance Management*. New York: Industrial Press, 2009. ISBN 0831133899.
- [5] ČSN. *EN 13306: 010660, Údržba - Terminologie údržby*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [6] PEXA, Martin; ALEŠ Zdeněk; HROCH Jan; LEGÁT Václav. Údržba snižuje riziko. *Česká společnost pro údržbu, z.s.* [Online] ČSPÚ, 17. listopad 2021. [Citace: 16. září 2023.] Dostupné z: <https://udrzba-cspu.cz/>.
- [7] MOBLEY, Keith. *An introduction to predictive maintenance*. Second edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-7531-4.
- [8] HRNJICA, Bahrudin; SOFTIC, Selver. Explainable AI in Manufacturing: A Predictive Maintenance Case Study. Online. In: LALIC, Bojan; MAJSTOROVIC, Vidosav; MARJANOVIC, Ugljesa; VON CIEMINSKI, Gregor a ROMERO, David (ed.). *Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing*. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 66-73. ISBN 978-3-030-57996-8. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57997-5_8. [cit. 2024-01-10].
- [9] MaintWorld. [Online] 15. 6 2021. [Citace: 11. 11 2023.] <https://www.maintworld.com/Asset-Management/Ultrasound-and-Vibration-analysis-two-key-elements-of-predictive-maintenance>.
- [10] SASAKI, Shinya. Advances in Tribology Driven by Surface Science. Online. *E-Journal of Surface Science and Nanotechnology*. 2023, roč. 21, č. 2, s. 98-104. ISSN 1348-0391. Dostupné z: <https://doi.org/10.1380/ejssnt.2023-036>. [cit. 2024-01-10].
- [11] BENGTTSSON, Marcus; LUNDSTRÖM, Gunnar. On the importance of combining “the new” with “the old” – One important prerequisite for maintenance in Industry 4.0. Online. *Procedia Manufacturing*. 2018, roč. 25, s. 118-125. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.065>. [cit. 2024-01-10].
- [12] COSTELLO, Orlagh; KENT, Mary Doyle; KOPACEK, Peter. Cost-Oriented Maintenance Engineering: Case Study of an Irish Manufacturing Plant. Online. *IFAC-PapersOnLine*. 2019, roč. 52, č. 25, s. 409-414. ISSN 24058963. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.572>. [cit. 2024-01-10].
- [13] AZID, Nuramirah; SHAMSUDIN, Shazarel; YUSOFF, Mohd Ssuffian; SAMAT, Hasnida Abdul. Conceptual Analysis and Survey of Total Productive Maintenance (TPM) and Reliability Centered Maintenance (RCM) Relationship. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, roč. 530, č. 1. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/530/1/012050>. [cit. 2024-01-10].
- [14] DRENT, Collin.; KAPODISTRIA, Stella; RESING, Jacques. Condition-based maintenance policies under imperfect maintenance at scheduled and unscheduled opportunities. Online. *Queueing Systems*. 2019, roč. 93, č. 3-4, s. 269-308. ISSN 0257-0130. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09627-w>. [cit. 2024-01-10].

- [15] TIAN XIANG, Zhang; JENG FENG, Chin. Implementing total productive maintenance in a manufacturing small or medium-sized enterprise. Online. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2021, roč. 14, č. 2, s. 152-175. ISSN 2013-0953. Dostupné z: <https://doi.org/10.3926/jiem.3286>. [cit. 2024-01-10].
- [16] RAZA, Syed Asif; HAMEED, Abdul. Models for maintenance planning and scheduling – a citation-based literature review and content analysis. Online. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2021, roč. 28, č. 4, s. 873-914. ISSN 1355-2511. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/JQME-10-2020-0109>. [cit. 2024-01-10].
- [17] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. [Praha]: Professional Publishing, 2013. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [18] AWS. [Online] Amazon Web Services, Inc. [Citace: 16. 10 2023.] https://aws.amazon.com/?nc2=h_lg.
- [19] UE systems. [Online] UE systems Inc. The ultrasound approach. [Citace: 16. 10 2023.] <https://www.uesystems.com/bearing-condition-monitoring/>.
- [20] COCKERILL, Aaron; CLARKE, Alastair; PULLIN, Rhys; BRADSHAW, Timothy; COLE, Peter. Determination of rolling element bearing condition via acoustic emission. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2016, roč. 230, č. 11, s. 1377-1388. ISSN 1350-6501. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1350650116638612>. [cit. 2024-01-10].
- [21] BRANCALIÃO, Laiany; CAMARGO, Caio; GONÇALVES, José; LIMA, José. Prototyping of a Low-Cost Stroboscope to Be Applied in Condition Maintenance: An Open Hardware and Software Approach. Online. In: GONÇALVES, José Alexandre; BRAZ-CÉSAR, Manuel a COELHO, João Paulo (ed.). *CONTROLO 2020*. Lecture Notes in Electrical Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2021, s. 762-772. ISBN 978-3-030-58652-2. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58653-9_73. [cit. 2024-01-10].