

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra jakosti a spolehlivosti strojů**



## **Diplomová práce**

**Diagnostika a prediktivní údržba zvolených strojů**

**Bc. Jakub Doležal**

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Doležal

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Diagnostika a prediktivní údržba zvolených strojů**

Název anglicky

**Condition monitoring and predictive maintenance of selected machines**

---

## Cíle práce

Cílem diplomové práce je na základě literárního rozboru popsat využití prediktivní údržby v průmyslu, představit ukázkové řešení a navrhnout aplikaci, která bude využívat nástrojů pro realizaci prediktivní údržby.

## Metodika

První část práce bude řešena formou literární rešerše na níž naváže ukáзка údržby na zvoleném zařízení s využitím nástrojů prediktivní údržby

Osnova:

- 1) Úvod
- 2) Rozbor současného stavu (popis prediktivní údržby, výhody, nevýhody, příklady z praxe)
- 3) Cíl práce
- 4) Metodika práce
- 5) Výsledky (návrh aplikace, popis řešení a její ověření)
- 6) Závěr

**Doporučený rozsah práce**

50 – 60

**Klíčová slova**

údržba, diagnostika, predikce

---

**Doporučené zdroje informací**

BLOOM, Neil. *Reliability centered maintenance (RCM) : implementation made simple*. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 0-07-146069-1.

JARDINE, A. K. S.; TSANG, Albert H.C. *Maintenance, replacement, and reliability : theory and applications*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006. ISBN 0849339669.

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.

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 8. 12. 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 31. 01. 2024

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Diagnostika a prediktivní údržba zvolených strojů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 29.03.2024

---



### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu prof. Ing. Martinovi Pexovi, Ph.D., vedoucímu mojí diplomové práce, za cenné rady, odborné vedení, vstřícnost, ochotu a čas, který mi v průběhu zpracování této práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, a blízkým, za jejich podporu v průběhu celého studia.

# Diagnostika a prediktivní údržba zvolených strojů

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou údržby strojů a aplikací moderních metod údržby v průmyslu. Práce obsahuje popis základních metod údržby, kdy největší důraz je kladen na prediktivní údržbu a její výhody a nevýhody. Dále je popsáno také využití technologií průmyslu 4.0., které umožňují efektivní sběr a analýzu dat pro predikci poruch. Ve druhé části práce je popsána praktická aplikace prediktivní údržby na konkrétním stroji v praxi. Demonstrace aplikace prediktivní údržby je založena na sledování a analýze klíčových ukazatelů – teplota válců a kvalita oleje. V závěrečné fázi práce jsou vyhodnoceny výsledky aplikace, efektivita a účinnost prediktivní údržby.

**Klíčová slova:** údržba, diagnostika, predikce, kogenerační jednotka, analýza, průmysl 4.0.

# **Condition monitoring and predictive maintenance of selected machines**

## **Abstract**

This thesis describes machine maintenance and application of modern maintenance methods in the industry. It includes a description of basic maintenance methods, with a particular focus on predictive maintenance and its advantages and disadvantages. It also describes the Industry 4.0 technologies, which allow efficient data collection and analysis for fault prediction. The second part of the thesis describes the practical application of predictive maintenance on a specific machine in the industry. The demonstration of the predictive maintenance application is based on monitoring and analyzing key indicators - cylinders temperature and oil quality. In the final phase of the thesis, the results of the application, as well as the efficiency and effectiveness of predictive maintenance, are evaluated.

**Keywords:** maintenance, diagnostics, prediction, cogeneration unit, analysis, industry 4.0

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Údržba strojů.....</b>	<b>3</b>
2.1 Metody řízení údržby .....	5
2.1.1 Korektivní údržba .....	5
2.1.2 Preventivní údržba .....	7
2.1.3 Diagnostická údržba – údržba podle stavu .....	10
2.1.4 Prediktivní údržba .....	10
2.2 Hodnocení výkonnosti údržby .....	10
2.2.1 Benchmarking údržby .....	12
2.2.2 Balanced Scorecard údržby (BSC) .....	12
2.3 Prediktivní údržba .....	13
2.3.1 Technická prognostika .....	15
2.3.1.1 Prognostika založená na základě údajů .....	17
2.3.1.2 Prognostika s použitím modelu .....	18
2.3.1.3 Prognostika založená na pravděpodobnosti .....	19
2.3.2 Technická diagnostika .....	19
2.3.2.1 Vibrodiagnostika .....	20
2.3.2.2 Termografie .....	22
2.3.2.3 Tribotechnická diagnostika .....	23
2.3.2.4 Využití tribotechnické diagnostiky při prediktivní údržbě strojů.....	24
2.3.2.5 Efektivita tribotechnické diagnostiky při prediktivní údržbě strojů..	25
2.3.2.6 Ultrazvuková diagnostika .....	26
2.3.3 Technologie využívané v prediktivní údržbě.....	27
2.3.3.1 Internet věcí (IoT) a umělá inteligence (AI).....	27
2.3.3.2 Specifické formy umělé inteligence .....	28
2.3.3.3 Digitální dvojče (DT) .....	29
2.3.4 Výhody a nevýhody prediktivní údržby .....	29
<b>3 Cíl práce .....</b>	<b>31</b>
<b>4 Metodika .....</b>	<b>31</b>
<b>5 Diagnostika a prediktivní údržba zvoleného stroje .....</b>	<b>32</b>
5.1 Popis aplikace a sledovaného stroje .....	32
5.1.1 Bioplynová stanice.....	32

5.1.2	Kogenerační jednotka .....	33
5.1.3	Technické parametry sledovaného stroje.....	33
5.2	Vizualizační software.....	34
5.2.1	Sledované hodnoty na stroji.....	35
5.2.2	Sledované hodnoty na přidružených systémech .....	36
5.2.3	Analytické nástroje .....	37
5.3	Analýza naměřených hodnot.....	38
5.3.1	Teploty válců .....	38
5.3.1.1	Analýza naměřených hodnot .....	38
5.3.1.2	Vyhodnocení.....	42
5.3.1.3	Určení optimálních servisní intervalů a skladových zásob .....	42
5.3.2	Kvalita oleje.....	43
5.3.2.1	Analýza naměřených hodnot .....	47
5.3.2.2	Vyhodnocení.....	48
5.3.2.3	Určení optimálních servisní intervalů a skladových zásob .....	49
5.3.3	Příklad predikce .....	49
5.4	Ekonomické vyhodnocení.....	51
5.4.1	Teploty válců .....	51
5.4.2	Kvalita oleje.....	53
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>59</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1	Vývoj moderní údržby [2] .....	4
Obr. 2	Přehled typů údržby[3] .....	5
Obr. 3	Schéma korektivní údržby [5] .....	6
Obr. 4	Preventivní údržba [6] .....	9
Obr. 5	Zpracování informací a tok dat podle normy ISO – 133 74 [10] .....	14
Obr. 6	Vývoj poruchy v čase [3].....	15
Obr. 7	Rozdělení prognostických metod [3].....	16
Obr. 8	Porovnání prognostických metod [3] .....	16
Obr. 9	Absolutní a relativní vibrace [3] .....	21
Obr. 10	Etapy architektury prediktivní údržby a průmyslové sítě IoT [17] .....	28
Obr. 11	Schéma bioplynové stanice [32].....	33
Obr. 12	Plynový generátor CG170-12 [27] .....	34
Obr. 14	Graf Tan Delta Number [29] .....	44

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Příklady ukazatelů podle kategorií [2].....	12
Tabulka č. 2 Příklad úspor dosažitelných analýzou olejů [2].....	26
Tabulka č. 3 Hodnota TDN v době výměny oleje.....	48
Tabulka č. 4 dopočet TDN na základě lineárního trendu.....	50
Tabulka č. 5 Výpočet možné úspory při využití prediktivní údržby.....	52
Tabulka č. 6 Výpočet rozdílu nákladů na olej.....	54

## Seznam grafů

Graf č. 1 Vývoj teploty spalovacího prostoru A1 při odstavení stroje.....	39
Graf č. 2 Bezporuchový stav stroje v provozu po dobu 8 hodin.....	40
Graf č. 3 Odchylka teploty u zapalovací svíčky, která se blíží konci životnosti.....	41
Graf č. 4 Vývoj teploty válce A3 před poruchou a po výměně svíčky.....	42
Graf č. 5 Vývoj hodnoty TDN od června 2023 do března 2024.....	45
Graf č. 6 Vývoj hodnoty TDN mezi jedním intervalem výměny oleje.....	46
Graf č. 7 Vývoj hodnoty TDN od června 2023 do března 2024.....	47
Graf č. 8 Predikce datumu výměny oleje.....	51

## Seznam použitých zkratk

CBM	Condition Based Maintenance
SMRP	Society For Maintenance and Reliability Professionals
BSC	Balanced Scorecard
DA	Sběr dat
PA	Prognostické hodnocení
FFT	Fourierova transformace
AAS	Atomová absorpční spektrometrie
AES	Atomová emisní spektrometrie
ICP	Emisní spektrometrie s indukci vázaným plazmatem
XRF	Rentgenová fluorescence
IoT	Internet Of Things (internet věcí)
AI	Umělá inteligence
ML	Strojové učení
DL	Hlubkové učení
DT	Digitální dvojče
TDN	TanDelta Number

# 1 Úvod

V současné době je údržba strojů nezbytným prvkem efektivního provozu a tím také konkurenceschopnosti firem. S postupujícím technologickým pokrokem se údržba strojů posouvá směrem k prediktivnímu způsobu údržby. Prediktivní údržba nabízí možnost předvídat poruchy a nedostatky strojů ještě před jejich výskytem, čímž umožňuje plánování údržby a minimalizaci neplánovaných výpadků.

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku prediktivní údržby strojů, přičemž vlastní práce je zaměřena především na diagnostiku a aplikaci prediktivní údržby v praxi.

Práce začíná kapitolou dva, která poskytuje základní porozumění současným přístupům údržby strojů. V kapitole jsou popsány metody řízení údržby a jejich výhody a nevýhody. Následuje podkapitola popisující hodnocení výkonnosti údržby. Tato podkapitola se zaměřuje na základní ukazatele výkonnosti údržby a jejich způsob využití. Analýza těchto ukazatelů poskytuje porozumění efektivitě a účinnosti aktuálních postupů údržby, což je klíčové pro formulaci návrhů na optimalizaci a zlepšení údržbové strategie v podniku.

Následující podkapitola se detailněji věnuje prediktivní údržbě, která je hlavním cílem této práce. Začíná historií vývoje prediktivní údržby, pokračuje popisem metod a oborů, které jsou v prediktivní údržbě využívány. Samostatná podkapitola této práce je věnována technologiím využívaných v rámci této strategie údržby. Zejména pak technologiím spojených s průmyslem 4.0. Tato část se zaměřuje na moderní technologické nástroje, které umožňují sběr, analýzu a interpretaci dat z provozu strojů a zařízení. Zvláštní pozornost je věnována zhodnocení výhod a nevýhod prediktivní údržby ve srovnání s tradičními metodami údržby. Cílem této podkapitoly je snaha poskytnout informace, jakým způsobem prediktivní údržba přináší skutečnou hodnotu a konkurenční výhodu v porovnání s tradičními metodami údržby.

Následuje praktická část, která představuje implementaci prediktivní údržby v reálném prostředí. Tato kapitola se zabývá diagnostikou a prediktivní údržbou konkrétního stroje. V této části práce je důkladně popsán konkrétní stroj, na kterém je aplikována prediktivní údržba. Následuje detailní popis sledovaných hodnot na stroji a přidružených systémech

a následná analýza těchto dat. Provedená diagnostika stroje a analýza sledovaných parametrů má za cíl přispět k lepšímu pochopení implementace prediktivní údržby v praxi.



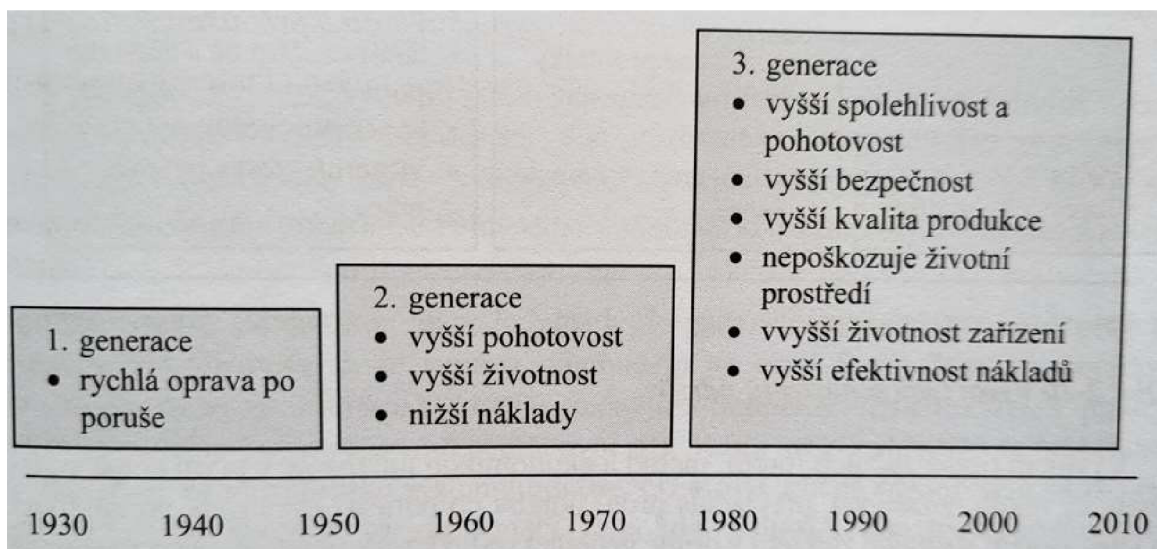
## 2 Údržba strojů

Údržba je spjatá s dávnou historií, tedy s dobou, kdy lidé začali vyhotovovat nástroje, což vedlo také k potřebě poškozené nástroje opravovat. O údržbě se zmiňují např. staří Egypťané, v dochovaných dokumentech, ve kterých se zmiňovali o nadměrných nákladech na opravu posvátné lodi boha AmonRa, což může být v jisté podobě považováno za počátky údržby.

Definice údržby se opírá o normu ČSN EN 13306, která definuje údržbu jako proces řízení, který kombinuje technické, administrativní a manažerské opotřebení během životního cyklu objektu (stroje, zařízení, systému aj.), s cílem udržet stav objektu nebo jej navrátit do stavu, ve kterém může daný objekt vykonávat funkci, pro kterou byl pořízen.

Údržba nabyla na svém významu zejména s rozvojem průmyslové výroby a je spjatá téměř s každým moderně řízeným podnikem. Proces údržby je úzce spojen s výrobním procesem. Představuje nástroj, který v podniku zajišťuje provozní spolehlivost výrobního zařízení, ovlivňuje produktivitu výroby, a kromě toho také přispívá k ovládnutí a snižování rizika provozu. Údržba v podniku by měla být chápána jako investice, která je rychle návratná a vede k dosažení zisku. V dnešní době neexistuje jeden univerzální proces údržby. Údržba by měla být v podnicích aplikována individuálně a to tak, aby směřovala k integraci výroby a údržby hmotného majetku. Tento přístup se odlišuje od dřívějšího pojetí údržby, kdy údržba měla sloužit především k odstraňování problémů a k dobré organizaci práce. Avšak s postupným využíváním moderních nástrojů údržby, jako je systematické monitorování strojů a jejich analýza provozu, došlo k přechodu od koncepce managementu údržby ke koncepci managementu majetku a jeho údržby.[1]

Vývoj údržby znázorňuje následující obrázek č. 1, který zobrazuje tři generace vývoje moderní údržby.



Obr. 1 Vývoj moderní údržby [2]

V první generaci údržby byly náklady na údržbu považovány za plýtvání, od čeho se odvíjel také typ opravy, které probíhala vždy až po poruše, a to v co nejkratším čase. Ve druhé generaci se údržba prováděla již s ohledem na riziko poruchy, a to v souvislosti s vyšší složitostí využívaných zařízení. Údržba měla být dostatečně pohotová, tak aby zabezpečila určitou životnost a spolehlivost zařízení, což mělo vést ke snížení celkových nákladů na údržbu. Ve třetí generaci se v rámci údržby začal brát ohled na další kritéria, kterými byla bezpečnost, životní prostředí nebo kvalita produkce. Ve třetí generaci došlo k výše zmiňovanému propojení údržby a výrobního procesu. Všechny tyto kritéria musí být splněny při trvalé optimalizaci a efektivnosti nákladů vynaložených na údržbu.

Vzhledem k tomu, že údržba představuje významnou část v podniku, která se podílí na efektivnosti řízení celého podniku, jsou v podnicích pro údržbu často vytvořeny samostatné útvary. Proces údržby má vliv např. na snížení negativních důsledků poruch, optimalizaci investičních nákladů, ale i na dodržování legislativních požadavků či vytváření konkurenčních výhod. Proto je velice důležité dbát na způsob řízení údržby.

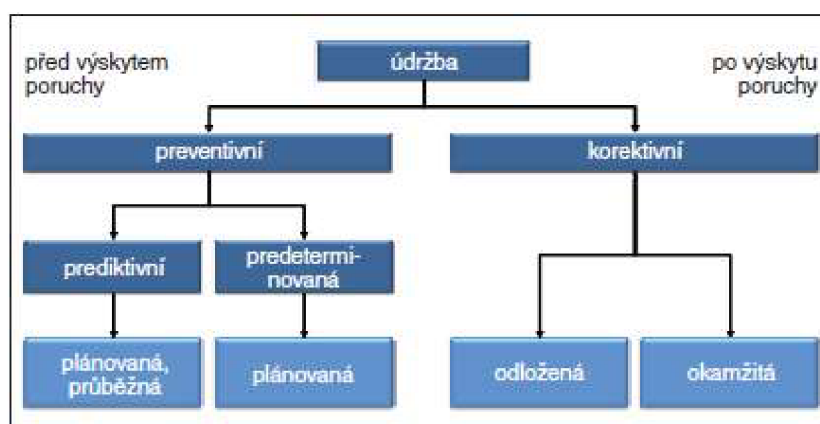
Existují tři základní formy organizace údržby v podniku, které mohou být doplněny ještě o další dvě. Jedná se o centralizovanou, decentralizovanou a kombinovanou formu. Tyto formy lze doplnit o dodavatelskou (outsourcing) nebo integrovanou formu.

Při centralizované formě organizace údržby je za činnost údržby zodpovědné jedno středisko. Výhodou této organizace je vysoká profesní připravenost, avšak nevýhodou může

být komunikace mezi pracovníky údržby a obsluhy strojů. Tato nevýhoda odpadá při využití decentralizované formy organizace údržby, kdy pracovníci údržby jsou dle svého zaměření zařazeni do útvaru výroby. Nevýhodou této organizace je nejednotné odborné vedení. Zejména ve větších podnicích je pak využívána kombinace centralizované a decentralizované formy organizace údržby. Kombinace umožňuje využít výhody obou těchto forem a potlačit jejich nevýhody. Další možností je využít dodavatelkou údržbu, tedy služby údržby nakupovat od externího dodavatele. V menších podnicích může být využita tzv. integrovaná organizační forma, což znamená, že pracovníci údržby vykonávají kromě údržbářské práce také běžné provozní činnosti v podniku. [1][2]

## 2.1 Metody řízení údržby

Metody řízení údržby jsou zásadní pro zajištění provozuschopnosti, spolehlivosti, a co nejdélejší životnosti technických zařízení při současném minimalizování nákladů. Tyto metody se dělí do dvou základních skupin. Korektivní údržba, tedy údržba po poruše, a preventivní údržba, tedy údržba předtím, než porucha nastane. Preventivní údržba se poté dále dělí na prediktivní a predeterminovanou. Přehled typů údržby je zobrazen na obrázku č. 2.[3]



Obr. 2 Přehled typů údržby[3]

Každá z metod má své klady a zápory a jejich využití je vhodné pro odlišné aplikace a je tedy vždy nutné posoudit, kterou z metod aplikovat.

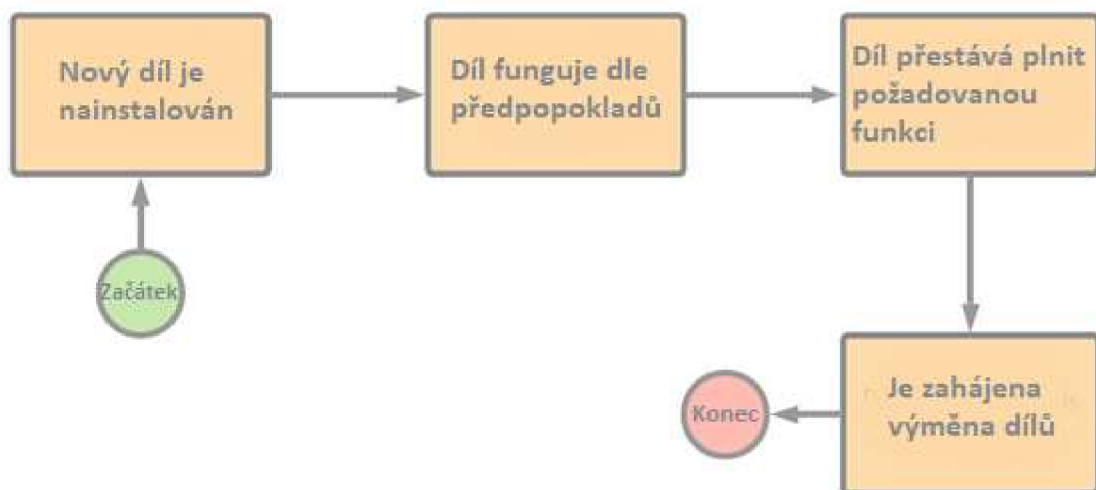
### 2.1.1 Korektivní údržba

Principem korektivní údržby je používání zařízení až do chvíle, kdy dojde k jejímu poškození. Zjednodušeně řečeno, není věnována servisním úkonům pozornost až do doby,

kdy zařízení přestane plnit svoji funkci. Poté jsou provedeny nezbytné kroky k jeho uvedení zpět do provozuschopného stavu. Tento přístup může být aplikován na zařízeních, která nejsou kriticky důležitá pro chod výroby a preventivní údržba by vzhledem k nákladům nebyla efektivní.

Ve společnostech, kde je tento typ údržby aplikován, je nutné udržovat vysoké množství skladových náhradních dílů nebo mít rozsáhlou a spolehlivou síť dodavatelů, aby bylo možné rychle a efektivně zareagovat v případě poruchy. Také je kladen velký důraz na kvalifikovanost zaměstnanců, kteří musí být schopni případnou opravu co nejrychleji a nejodborněji zrealizovat.

I přes to, že se metoda nazývá údržba po poruše, je při naprosté většině aplikací, alespoň základní servis jako je mazání apod. na strojích vykonáván preventivně, aby bylo zařízení udrženo v provozuschopném stavu co nejdéle. [3][4]



Obr. 3 Schéma korektivní údržby [5]

Zařízení, na kterých je korektivní údržba aplikovatelná:

- nekritická zařízení – zařízení na kterých není závislá kritická infrastruktura podniku,
- nízkonákladová zařízení – zařízení jejichž hodnota je nízká a je možné poškozené nebo zničené novým zařízením,
- redundantní zařízení – zařízení, které je v případě poruchy nahrazeno záložním.

Výhody:

- nižší náklady na údržbu nekritického zařízení,
- nevyžaduje složité plány údržby,
- nevyžaduje neustálý monitoring.

Nevýhody:

- nepředvídatelné poruchy vedoucí k prostojům,
- vysoké náklady v případě nutnosti výměny kompletního zařízení,
- bezpečnostní rizika,
- nutnost udržování vysokého množství náhradních dílu na skladě,
- vysoké nároky na kvalifikovanost pracovníků údržby,
- nemožnost plánovaného zásahu.

### **2.1.2 Preventivní údržba**

Princip preventivní údržby se zásadně liší od korektivní údržby, která byla popsána v předešlé části. Úkolem preventivní údržby je případným poruchám zařízení předcházet a prodloužit tak co možná nejvíce jejich životnost. Tato metoda je zaměřena na pravidelnou kontrolu a údržbu zařízení podle předem určených servisních intervalů. Tyto intervaly mohou být dány například počtem provozních cyklů, počtem najetých kilometrů nebo po uplynutí stanoveného časového intervalu. Hlavním důvodem, proč je preventivní údržba

aplikována je minimalizování nečekaných poruch, a tím i neplánovaných odstávek zařízení.(1)

Preventivní údržba výrazně zvyšuje spolehlivost zařízení a prodlužuje jejich provozuschopnost. Současně však zvyšuje náklady na servis zařízení, protože často dochází k výměně komponentů před dosažením konce jejich životnosti. Při aplikaci metody je nutné důkladně zvážit její rentabilitu. [3]

Mezi klíčové prvky preventivní údržby lze zařadit:

- plánování – vypracovaný plán údržby pro konkrétní zařízení, který je založen na doporučeních od výrobce nebo na nashromážděných znalostech (datech) z předchozího používání a opotřebení,
- pravidelná kontrola zařízení – provádění inspekcí a testů, aby došlo k odhalení potenciálních vad dříve, než dojde k selhání,
- preventivní výměna součástí – dodržování intervalu výměny opotřebovaných součástí dle předem stanoveného plánu,
- mazání a čištění – mazání potřebných ploch a udržování čistoty zařízení,
- zaškolený a odporný personál – zaměstnanci musí disponovat znalostmi a zkušenostmi potřebnými k provedení dané údržby,
- vedení záznamů – uchovávání záznamů o provedené údržbě a vyhodnocování nashromážděných dat k identifikaci potenciálních problémů.[6]



Obr. 4 Preventivní údržba [6]

Výhody:

- snížení počtu neplánovaných odstávek,
- prodloužení životnosti součástí,
- vyšší bezpečnost,
- úspora nákladů a energie.

Nevýhody:

- časová náročnost,
- vysoké náklady na implementaci,
- složitá organizace,
- náklady na provoz zařízení.

### **2.1.3 Diagnostická údržba – údržba podle stavu**

Název vychází z anglického názvu Condition-Based-Maintenance, tedy ve zkratce CBM. Jedná se o metodu, jejíž nedílnou součástí je sledování skutečného stavu zařízení. Základem je tedy sledování parametrů, které indikují snižující se výkonnost zařízení, a s tím spojené snížení účinnosti a možnou blížící se poruchu. Cílem této metody je tedy provedení údržby přesně v okamžiku potřeby, a tím minimalizování nákladů spojených s předčasnou preventivní údržbou, a současné předejití neplánovaným poruchám.[3][4]

Mezi hlavní principy a výhody lze zařadit:

- monitorování a diagnostika – využívání senzorů a diagnostických nástrojů k nepřetržitému sledování klíčových parametrů zařízení,
- predikce selhání – analýzou dat shromážděných z monitoringu lze identifikovat stavy, které směřují k potenciálním poruchám,
- optimalizace plánování údržby – umožňuje společně lepší plánování údržby a efektivněji tak využít zdroje, které mají k dispozici,
- delší životnost zařízení – pravidelným monitoringem a údržbami lze docílit prodloužení celkové životnosti zařízení,
- minimalizace neplánovaných odstávek a zvýšení spolehlivosti.[4][3]

### **2.1.4 Prediktivní údržba**

Prediktivní údržba umožňuje předvídat poruchy a závady zařízení, strojů před jejich vznikem, a to na základě znalosti technického stavu stroje. V rámci prediktivní údržby jsou stroje a zařízení trvale sledována a vyhodnocována na základě zpracování dat. Této problematice se bude podrobně věnovat kapitola číslo 2.3.

## **2.2 Hodnocení výkonnosti údržby**

V rámci údržby je kladen důraz na optimalizaci a efektivnost vynaložených nákladů, ale také na přínos pro celkovou výkonnost podniku. Pro měření efektivnosti údržby se používají klíčové ukazatele výkonnosti údržby. Tyto ukazatele zahrnují jak finanční, tak nefinanční



ukazatele, přičemž se tyto ukazatele často prolínají. V minulosti byly přístupy k měření výkonnosti údržby různé a velice subjektivní, což přispělo ke snaze vytvořit jednotný systém ukazatelů výkonnosti údržby v Evropě. V důsledku toho byla v roce 2007 vydána norma EN 15341 Údržba – klíčové ukazatele výkonnosti, která formulovala tři základní kategorie poměrových ukazatelů. Tyto kategorie jsou ekonomické, technické a organizační. Evropský přístup pro jednotné hodnocení ukazatelů výkonnosti není však jediný. V Severní Americe vznikl systém tzv. „metrik“ Society for Maintenance and Reliability Professionals (SMRP), který na rozdíl od normy EN 15341 dělí poměrové organizace do pěti kategorií: obchod a management, spolehlivost procesu výroby, spolehlivost zařízení, organizace a vůdcovství, řízení práce.

Nejjednodušším způsobem využití ukazatelů výkonnosti údržby je jejich porovnáním, přičemž pro provedení porovnání je důležité, aby porovnávané údaje byly v souladu s normalizovanými definicemi dle normy EN13306, IEC 60050-191. Porovnávat lze např. naměřené ukazatele s ukazateli obdobných firem, s odvětvovými průměry nebo s tzv. nejlepšími praktikami (The Best Practices). Další možností využití ukazatelů je měření, diagnóza, ale také lze ukazatele využít při identifikaci a definování cílů, kterých je třeba dosáhnout nebo pro plánování akcí na zlepšení. Ukazatelé, které měří výkonnost údržby, mají svoji hierarchii, nicméně ukazatelé v jednotlivých hierarchiích jsou provázány.

Následující tabulka představuje příklady ukazatelů podle kategorií.

Kategorie	Ukazatel
Ekonomická	$\frac{\text{Celkové náklady na údržbu}}{\text{Reprodukční hodnota majetku}} * 100$
Ekonomická	$\frac{\text{Náklady na údržbu po poruše}}{\text{Celkové náklady na údržbu}} * 100$
Ekonomická	$\frac{\text{Náklady na preventivní údržbu}}{\text{Celkové náklady na údržbu}} * 100$
Technická	$\frac{\text{Celkový provozní čas}}{\text{Celkový provozní čas} + \text{čas nefunkčnosti způsobený údržbou}} * 100$
Organizační	$\frac{\text{Počet pracovníků vlastní údržby}}{\text{Celkový počet vlastních zaměstnanců}} * 100$

### *Tabulka č. 1 Příklady ukazatelů podle kategorií [2]*

Vzhledem k tomu, že pro management společnosti bývá důležitá především výkonnost podniku jako celku, jsou ve společnostech sledovány především náklady, které jsou pro posouzení celkové výkonnosti podniku důležité. V nákladech, zejména v dnešní době spojené s průmyslem 4.0 mají neodmyslitelně své postavení také náklady na údržbu. Náklady na údržbu se vyhodnocují nejčastěji na roční bázi a zahrnují zejména mzdy přímých pracovníků, náklady na náhradní díly a spotřební materiál, náklady na nářadí a zařízení, náklady na konzultační služby, administrativní náklady na údržbu, náklady na vzdělávání a školení, náklady na dokumentaci, náklady na energie a technické vybavení atd. Pro řízení nákladů údržby jsou v praxi využívány manažerské nástroje Benchmarking a Balanced Scorecard údržby.

#### **2.2.1 Benchmarking údržby**

Benchmarking, přeloženo do češtiny jako referenční porovnání, poskytuje srovnání údržby s ostatními systémy řízení firmy na bázi vyvážených ukazatelů. Jedná se o manažerský nástroj, který naměřené hodnoty (ukazatele) porovnává a hledá nejlepší praxe, které lze přenést do podniku. Benchmarking může být:

- interní benchmarking – srovnání probíhá na úrovni jiných oddělení či poboček,
- externí benchmarking – srovnání probíhá vůči jiným organizacím, konkurenci, vedoucím organizacím v odvětví.

#### **2.2.2 Balanced Scorecard údržby (BSC)**

Spoustu nástrojů pro hodnocení výkonnosti vychází pouze z finančních ukazatelů, jejichž nevýhodou je, že zohledňují pouze historický vývoj, z něhož se odvozuje budoucí výkonnost, což není vždy snadné. Nástroj Balanced Scorecard využívá pro strategické plánování a řízení společnosti také nefinanční ukazatele, aby docházelo ke sladění podnikatelské aktivity do vize a strategie společnosti.

V údržbě jsou využívány čtyři hlavní perspektivy BSC:

- finanční perspektiva – zahrnuje měření nákladů a výnosů. V oblasti údržby se jedná o náklady a výnosy souvisejících s údržbou, jako např. náklady na opravu a provoz.

V rámci finanční perspektivy se také měří hodnota, kterou údržba přispívá k celkovému hospodaření společnosti,

- zákaznická perspektiva – zaměřuje se na měření spokojenosti zákazníků. Umožňuje managementu posoudit funkčnost firemních procesů a vyhodnotit, zda jsou firemní produkty v souladu s potřebami zákazníků. V údržbě se tato perspektiva zabývá např. celkovým vlivem údržby na spokojenost zákazníků s produktem nebo službou.
- perspektiva interních procesů – zahrnuje sledování efektivity údržbových procesů, kam lze zařadit plánování údržby a dobu odstávky strojů,
- perspektiva potenciálního růstu – perspektiva cílí na budování lidských zdrojů a firemní kultury. V oblasti údržby se jedná zejména o zlepšování údržbových procesů a dovedností. Toho lze docílit např. investicemi do školení zaměstnanců nebo do nových technologií a metod v oblasti údržby.

Metoda BSC zajišťuje propojením všech čtyřech perspektiv měřitelnost strategických cílů. Důležité pro tuto metodu je, aby se všemi finančními i nefinančními ukazateli byly obeznámeni všichni zaměstnancům na všech podnikových úrovních. Důležité pro fungování této metody je mj. zakomponování prvků zpětné vazby.[2][7][8]

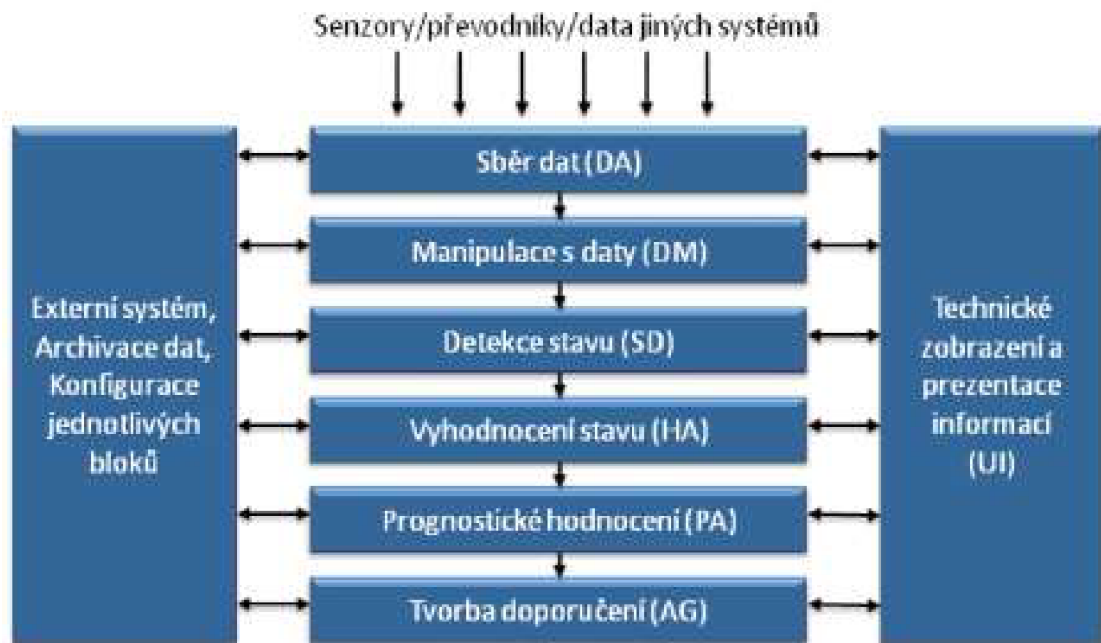
### **2.3 Prediktivní údržba**

Prediktivní údržba je známá již několik let, a to v souvislosti se snahou o dosažení úspory provozních nákladů a snahou o zvýšení spolehlivosti strojů a zařízení. Již ve 20. století začaly firmy využívat jednoduché metody pro kontrolu stavu svých strojů, jako např. vizuální kontrola, poslech zvuků. Tyto jednoduché metody umožňovaly identifikovat potencionální problémy či prevenci jejich vzniku.

V současné době má na vývoj prediktivní údržby vliv především technologický pokrok, jako internet věcí, cloudové systémy, možnosti pro zpracování enormního množství dat (Big Data), strojové učení, neuronové sítě, obecně vyšší výpočetní kapacita a další technologie, spojované především s Průmyslem 4.0. [9]

Základem prediktivní údržby je trvalé sledování strojů a zařízení a vyhodnocování jejich stavu, což umožňuje predikovat okamžik poruchy strojů, úroveň degradace daného stroje,

ze kterého lze usuzovat jeho blížící se selhání a zbývající provozní dobu životnosti strojů. Tento proces využívá znalostí o technickém stavu stroje. Pro prediktivní údržbu je důležité především zpracování dat, a to od jejich sběru až po tvorbu doporučení vyplývajících ze získaných dat. Následující obrázek číslo 5 graficky znázorňuje jednotlivé bloky zpracování dat v systémech prediktivní údržby. Tyto bloky vycházejí z normy ISO 13374. [10]

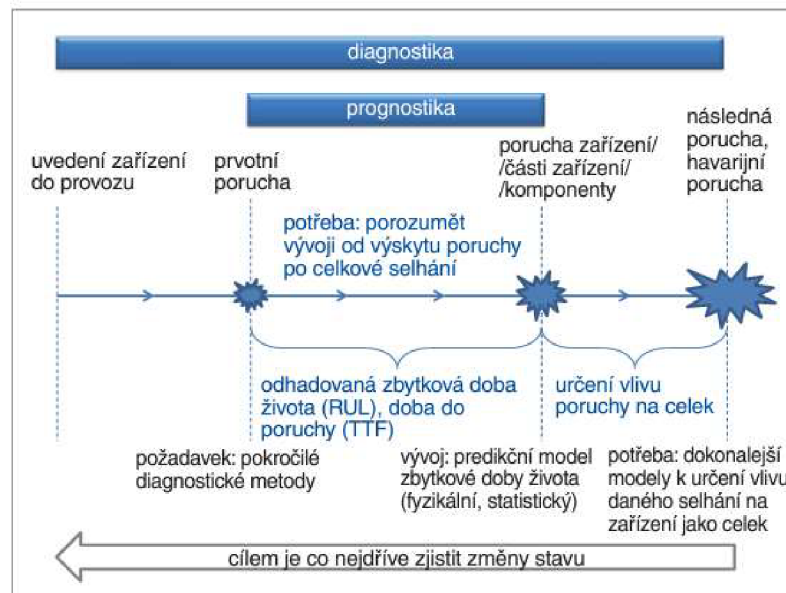


Obr. 5 Zpracování informací a tok dat podle normy ISO – 133 74 [10]

Pro určení funkčního stavu stroje jsou využívány vestavné diagnostické a prognostické nástroje (blok DA a blok PA dle obrázku č. 5. Za pomoci diagnostiky je zjišťován aktuální stav strojů a zařízení, což zahrnuje také identifikaci poruch a rozpoznání anomálií. V rámci diagnostiky jsou zjištěné anomálie spojovány s příčinami poruch a určují tak rozsah poškození. Nejčastějšími metodami, které jsou využívány v rámci technické diagnostiky se bude věnovat samostatná kapitola.

Technická prognostika je často označována jako doplňková hodnota technické diagnostiky, avšak propojením prognostiky a diagnostiky lze vyvozovat nejen současný stav zařízení, ale také jeho předpokládanou dobu životnosti, a to například na základě degradace jednotlivých komponent stroje, podle historie údržby a oprav stroje nebo na základě jeho provozních podmínek aj. Tento vzájemný vztah je graficky znázorněn na obrázku č. 6. Prognostika

využívá složité algoritmy k predikci vývoje poruch od počátku fungování stroje až po jeho selhání, a to s určitou mírou spolehlivosti. Proto také využití prognostiky a diagnostiky umožňuje analyzovat vývoj poruch v čase, tak jak je to znázorněno na obrázku č. 6.[3] [10]



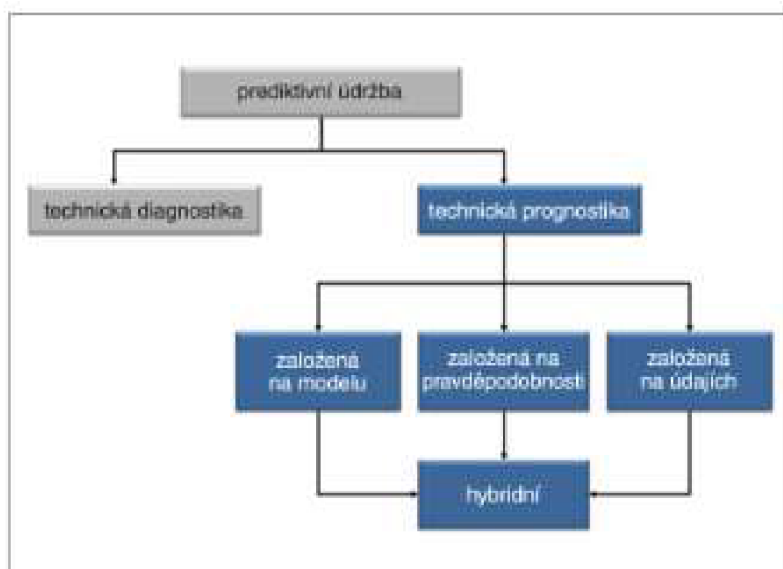
Obr. 6 Vývoj poruchy v čase [3]

### 2.3.1 Technická prognostika

Technická prognostika je relativně novým oborem na poli prediktivní údržby. Jak bylo uvedeno výše, cílem technické prognostiky je predikce vývoje poruch od počátku fungování stroje až po jeho selhání, a to s určitou mírou spolehlivosti. V rámci tohoto nástroje jsou při určité pravděpodobnosti určovány zejména hodnoty jako zbytková doba provozního života nebo doba do poruchy. Tyto hodnoty jsou určovány buď pro jednotlivé komponenty stroje nebo pro celé zařízení. Zbytková doba provozního života je časový interval, který začíná od stanoveného okamžiku, a je ukončen v okamžiku, kdy stroj zcela selhává (přestává být provozuschopný). Na základě zbytkové doby provozního života lze při určité pravděpodobnosti naplánovat např. údržbu zařízení či komponenty, výměnu komponent aj. Oproti tomu doba do poruchy je časový interval, který začíná od stanoveného okamžiku a je ukončen v okamžiku, kdy se objeví porucha, která na rozdíl od zbytkové doby provozního života nemusí nutně znamenat ztrátu provozuschopnosti stroje.

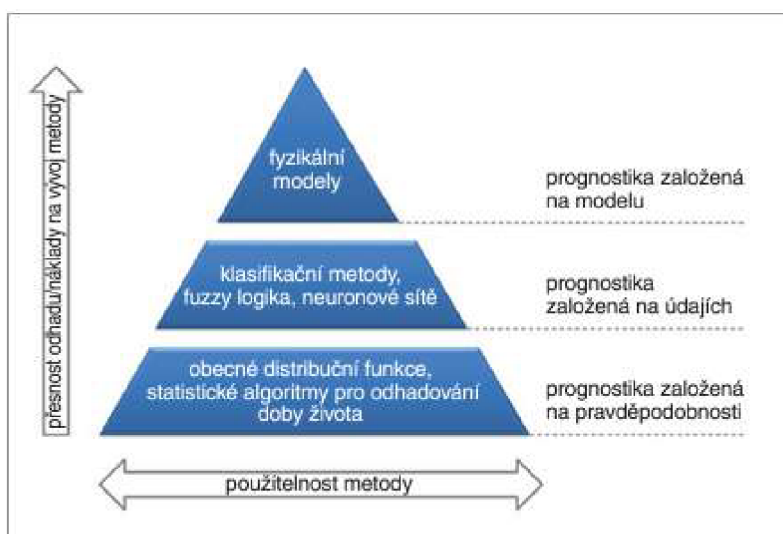
Technická prognostika vyžaduje, aby zjištěné chyby a anomálie, které se týkají degradace jednotlivých dílů stroje, byly extrapolovány na ostatní komponenty, tedy aby bylo

vyhodnoceno, jaký vliv má selhání jednotlivých dílů na ostatní díly či na stroj jako celek. Technická prognostika má v současné době mnoho metod. Tyto metody lze rozdělit podle následujícího obrázku do tří základních skupin.



Obr. 7 Rozdělení prognostických metod [3]

Jak lze vidět na obrázku č. 7 základní metody technické prognostiky se navzájem odlišují podle jejich přístupů k predikci vývoje technického stavu. Některé publikace prezentují také detailnější klasifikaci přístupů, neboť na tyto metody pohlížejí z více úhlů pohledu. Metody bývají často navzájem kombinovány, a to zejména z důvodu výhod a nevýhod jednotlivých metod a jejich rozsahu použitelnosti. Rozsah použitelnosti základních prognostických metod znázorňuje obrázek č. 8. [3]



Obr. 8 Porovnání prognostických metod [3]

Základní metody včetně jejich přístupů budou popsány v následujícím odstavci.

### 2.3.1.1 Prognostika založená na základě údajů

Metoda prognostiky, která je založena na základě údajů, tzv. znalostních modelů, využívá objektivní data, získaná sledováním provozovaného stroje nebo z údržby technických strojů. Pro získání údajů je využíváno mnoho technik, jako např. statistické metody – princip statické a dynamické komponenty, lineární a kvadratické determinanty, parciální metoda nejmenších čtverců), metody založené na principu neuronových sítí (pravděpodobnostní neuronové sítě, rozhodovací stromy, několikvrstvé perceptrony, kvantizovaný učící se vektor), grafické metody (Bayesovy sítě, skryté Markovovy modely), analýzy signálů (FFT, filtry, auto-regresivní modely) až po fuzzy rozhodovací systém.

Znalostní modely, lze dále rozlišit na několik typů. Toto rozlišení se v různých literaturách liší. Jedno z rozdělení může být následující:

- znalostní modely založené na pravidlech (rule-based) – využívají znalostní báze, což je soubor vytvořených pravidel, který je navržen tak, aby napodoboval rozhodování lidského experta,
- znalostní modely založené na případech (case – based) – v tomto modelu je znalostní báze složena z řady předchozích situací a jejich odpovídajících řešení. Když systém narazí na nový problém, snaží se najít podobnosti s již známými případy,
- znalostní metody založené na fuzzy logice – tyto metody jsou podobné modelům založených na pravidlech s tím rozdílem, že ve fuzzy logice jsou využívány i jiné odpovědi než pouze pravda, nepravda.

Výhodou metody prognostiky založené na základě údajů je, že dokáže efektivně zpracovávat a zredukovat velké množství dat na menší. Naopak její nevýhodou je vysoká závislost na množství a kvalitě získaných dat, přičemž metoda prognostiky na základě údajů umožňuje vytvořit znalostní bázi na základě rozsáhlých databází, kdy jsou jednotlivé znalosti sdíleny a opětovně využívány. Tomu napomáhají také moderní technologie jako např. Big Data či obecně vyšší výpočetní kapacita. Tato metoda prognostiky se využívá zejména u komplexních systémů, pro jejichž provozní chování neexistuje žádný přesný matematický

model a nelze jej ani popsat žádným fyzikálním modelem. Metoda může být při využití různých technik použita např. pro predikci budoucího vývoje technického stavu CNC obráběcího stroje, pro diagnostiku nakladačů, diagnostiku a predikci poruch důlních rypadel nebo diagnózu a predikci poruch na palubním systému železničního vozidla.

#### 2.3.1.2 Prognostika s použitím modelu

Tato metoda se využívá pro předpověď vývoje technického stavu komponent při využití kombinace fyzikálních zákonů spolu s matematickým modelováním. Právě přesný popis fyzikálního chování stroje může poskytnout přesné modely degradačního chování stroje nebo jeho komponent. Základním parametrem pro odhad životnosti či doby do selhání stroje této metody je princip rezidua. Rezidua jsou rozdíly mezi skutečnými výstupy sledovaného zařízení a těmi, které jsou predikovány jeho matematickým modelem. Předpokládá se, že tyto rozdíly jsou velké při selhání zařízení a menší během normálního provozu, a to s ohledem na skutečnost, že mohou být ovlivněny nepřesnostmi modelu nebo šumem v signálu. Pro stanovení mezních hodnot odchylek se využívají statistické metody. Existují tři základní přístupy k tvorbě reziduí: odhadování parametrů, pozorování (například pomocí Kalmanových filtrů) a rovnice vztahů.

Literatura zabývající se touto problematikou (např. IoT-Based Prognostics and Systems Health Management for Industrial Applications) shrnuje základní postup prognózy s použitím modelu do pěti bodů:

- identifikaci mechanismů poruch a jejich rozmístění,
- monitoring zatížení, které může způsobovat opotřebení stroje v průběhu jeho provozní životnosti a reakce tohoto zatížení,
- identifikace funkcí odvozených z proměnných, které se mění v reakci na zhoršení stavu, provázané s mechanismy poruch, zjištěnými v daném bodě,
- vyhodnocení poškození a zbývajícího provozního života na základě fyzikálního modelu mechanismů poruch,
- posouzení nejistoty a vyjádření času do opravy jako pravděpodobnostní rozdělení.



Výhodou prognostiky s použitím modelu je využití fyzikálních znalostí stroje při pozorování stroje. Další výhodou je možnost upravovat model se zhoršujícím se stavem sledovaného stroje, čímž se zvyšuje přesnost odhadu náhlé chyby.

Tuto metodu lze využít například při predikci selhání solenoidových ventilů, predikci koroze trubek výměníku kotle, predikci zanášení filtru aj. [11]

### 2.3.1.3 Prognostika založená na pravděpodobnosti

Rozvoj této metody je v současné době zaznamenán zejména spolu s technologickým rozvojem, jako je rozvoj možností zpracování Big Data, s nárůstem výpočetních kapacit, možností cloudového zpracování apod. Základem této metody byly zejména statistické a stochastické modely, ale s rozvojem technologií do prognostiky založené na pravděpodobnosti patří také metody založené na umělé inteligenci, strojovém účetní, rozpoznávání vzorců a anomálií aj.

Základem metody jsou již historicky distribuční funkce pravděpodobnosti, které byly nastaveny na konkrétní zařízení, nebo dokonce na jeho jednotlivé součásti nebo komponenty. Tyto funkce jsou určeny na základě různých faktorů, jako jsou výrobní parametry, provozní údaje a statistická data z minulosti. Dnes tyto funkce mohou být vyhodnocovány právě zmiňovanými technologiemi. Metody prognostiky, které jsou založeny na pravděpodobnosti se využívají nejčastěji v elektrotechnickém průmyslu. Technologie, které lze využít v prediktivní údržbě jsou dále popsány v následující kapitole. [3][10][9]

### 2.3.2 Technická diagnostika

Pro plánování údržby je nezbytné získat co nejvíce informací o stavu zařízení nebo systému, tak aby byla údržba prováděna pouze tehdy, je-li to skutečně nutné, což povede k minimalizaci plánované i neplánované výrobní ztrátě z důvodu vzniku poruchy. Pro získání informací o stavu zařízení nebo systému je klíčové správně vybrat metody, které se často kombinují pro dosažení co nejpřesnějšího a komplexního posouzení jejich stavu. Nejčastěji využívanými metodami jsou analýza vibrací (vibrodiagnostika), termografická analýza (termodiagnostika), analýza maziv a olejů (tribotechnická diagnostika), ultrazvuková analýza. Vybrané metody budou popsány v následujících podkapitolách.

### 2.3.2.1 Vibrodiagnostika

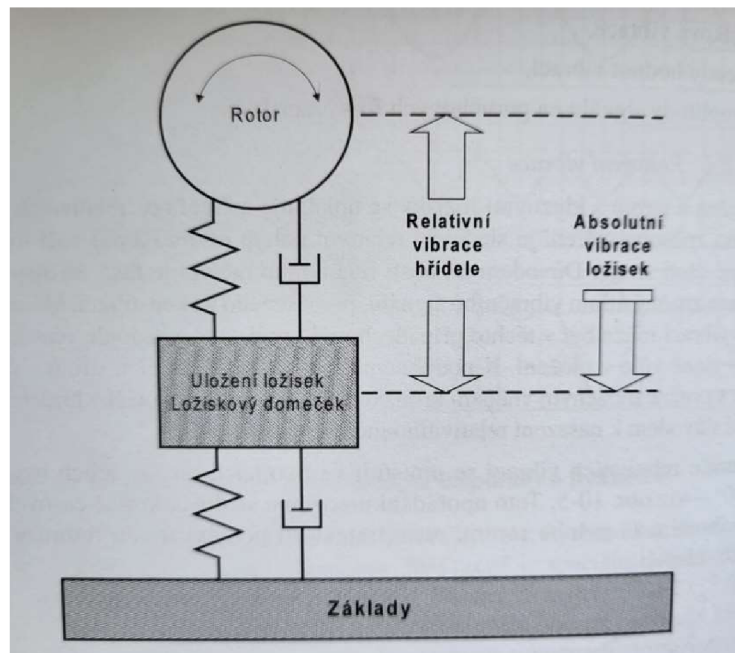
Tato metoda je založena na měření vibrací, které jsou projevem mechanického kmitání stroje. Vzhledem k tomu, že vlivem kmitání dochází ke změně polohy stroje či části stroje, je tato metoda využívána při monitorování technického stavu rotačních strojů. Pro prediktivní údržbu je především důležitá analýza vibrací a následná interpretace naměřených dat. Naměřené vibrace mohou být analyzovány za pomoci základní analýzy, která je založena na porovnání základních hodnot se stanoveným normativem a na sledování vývoje měřených hodnot v čase nebo pokročilejšími metodami analýzy, které hodnotí spektra vibračního signálu.

V rámci měření vibrací se nejčastěji sledují následující druhy vibrací, vibračních signálů:

- relativní vibrace,
- absolutní vibrace,
- celkové vibrace,
- trendy hodnot vibrací,
- amplitudy signálu na poruchových frekvencích.

Vibrace se měří pomocí vibračních senzorů a speciálních zařízení. Můžeme je dělit na relativní, absolutní a celkové. Relativní vibrace jsou měřeny a vyhodnocovány k určitému výchozímu bodu, tzn. že udávají rozdíl mezi naměřenou hodnotou vibrace a stanovenou normou, tedy základní hodnotou, kterou může např. být limitní hodnota nebo průměrná hodnota vibrace. Při měření relativních vibrací je sledován relativní pohyb rotoru vzhledem k ložiskům nebo jiným částem stroje. Absolutní vibrace jsou na rozdíl od relativních vibrací měřeny a vyhodnocovány nezávisle na jakémkoliv výchozím bodu, tzn. že se jedná o vibrace stroje nebo jeho části vzhledem k pevné základně. Absolutní a relativní vibrace jsou zachyceny v obrázku č. 9. Celkové vibrace jsou nejčastěji vypočteny jako kombinace relativních a absolutních vibrací z různých bodů na zařízení. Celkové vibrace patří k základním vibrodiagnostickým metodám. Naměřené hodnoty se porovnávají a analyzují vzhledem k normativním hodnotám, které mohou být např. hodnoty celkových vibrací, které byly naměřeny u téhož stroje v bezporuchovém stavu nebo hodnoty, které vycházejí ze

standardu ISO 10816. Tento standard mj. stanovuje limity naměřených vibrací pro různé typy strojů a zařízení. [2]



Obr. 9 Absolutní a relativní vibrace [3]

Dále lze sledovat trendy hodnot vibrací. Základem je dlouhodobé sledování parametrů vibrací stroje, které jsou naměřeny v rámci diagnostiky a jejich vyhodnocení. Trendy jsou často využívány právě v prediktivní údržbě, neboť zaznamenáváním a vyhodnocováním vibrací lze identifikovat potenciální problémy, a to zejména při stanovení alarmních hodnot.[2]

Každé pohybující se části stroje lze přiřadit určitou frekvenci vibrací, které jsou spojeny s konkrétními typy poruch, jako např. nevyváženost, opotřebení ozubených kol, ložiskové závady aj. Hodnoty, které jsou naměřeny v oblasti frekvencí, ve kterých je identifikována určitá porucha, a které signalizují intenzitu vibrací, se právě nazývají amplitudy signálu. Analýza amplitudy signálu na poruchových frekvencích se nejčastěji realizuje pomocí metody Fourierovy transformace (dále jen FFT), která umožňuje získání rozložení amplitudy signálu ve frekvenční oblasti, tzv. spektrogram. Za pomoci spektrogramu lze pak identifikovat potenciální poruchy.[2]

Zhodnocení vibrodiagnostiky v oblasti prediktivní údržby:

Vibrodiagnostika je jedním z klíčových nástrojů v oblasti prediktivní údržby. Díky pravidelné analýze vibrací lze předejít selháním strojů ještě předtím, než k selhání dojde, což při správném zavedení do programu údržby může vést ke zlepšení návratnosti investic, snížení nákladů na údržbu, snížení počtu poruch, snížení prostojů či ke zlepšení bezpečnosti pracovníků.

Správné nastavení vibrodiagnostiky do programu prediktivní údržby zahrnuje:

- lidský faktor – kvalifikace, finanční ohodnocení, angažovanost managementu,
- technologie – vhodné metody, dostatečné přístrojové vybavení, cena,
- procesy – automatizace sběru dat a přenosy informací v systému údržby,
- zprávy – komplexní vyhodnocení stavu, určení příčin.

Využití vibrodiagnostiky v rámci programu údržby vyžaduje vyšší náklady jak na lidský faktor, tak v oblasti technologie. Je důležité, aby zaměstnanci organizace disponovali určitými znalostmi a dovednostmi. Mezi klíčové požadavky na vzdělání zaměstnanců při využití vibrodiagnostiky patří minimálně znalost technických principů strojů, vyhovující vzdělávání v oblasti vibrodiagnostiky a analýzy vibrací. Důležité je také dostatečné finanční ohodnocení a angažovanost managementu.

Pro získání spolehlivých dat je výběr vhodného senzoru pro měření vibrací, správné nastavení procesů, tedy zejména integrace do procesu údržby, nastavení a frekvence automatizace sběru dat a přenosy získaných informací. V neposlední řadě je důležitý záznam a vyhodnocení dat, které vedou k efektivnímu nastavení prediktivní údržby.[2]

### 2.3.2.2 Termografie

Další metodou využívanou v prediktivní údržbě je termografie. Princip této metody spočívá v detekci potencionálních problémů jako přehřátí, nadměrné tření nebo izolační poruchy u motorů, izolací vinutí, čerpadlech, kompresorů, ložiscích aj., pomocí měření povrchových teplot. Měření teploty probíhá za pomoci termokamer. Termokamery snímají infračervené záření, které není lidským okem viditelné. Infračervené záření vydává každé zařízení, jehož

teplota je vyšší než absolutní nula. Na základě intenzity vyzařovaného infračerveného záření dopočítává termokamera teplotu měřeného objektu, a to s ohledem na stupeň emisivity povrchu měřeného objektu (schopnost materiálu přijímat a vyzařovat infračervené záření), vzdálenost měřeného objektu, vlhkost, teploty vzduchu aj.

V rámci prediktivní údržby strojů je termografie rozvíjející se metoda moderního přístupu, která umí detekovat problémy strojů ještě před jejich projevem což opět vede k minimalizaci výpadků strojů a ke snižování nákladů na opravy. V rámci prediktivní údržby je důležité porovnávání jednotlivých měření, které jsou provedeny za dodržení stejných podmínek.[2]

### 2.3.2.3 Tribotechnická diagnostika

Spolehlivost a životnost strojů a zařízení může být také ovlivněno nedostatečným mazáním či kontaminací olejů. Tribotechnická diagnostika umožňuje optimalizovat životnost strojů a zařízení za pomoci analýzy oleje. Analýza oleje se dělí na dvě části:

- tribotechnická diagnostika oleje,
- tribotechnická diagnostika zařízení.

Zatímco při tribotechnické diagnostice oleje se sledují fyzikálně-chemické vlastnosti oleje, pro prediktivní údržbu je důležitá hlavně tribotechnická diagnostika zařízení, při které se sleduje opotřebení zařízení a jeho intenzita.

Pro předpověď vznikající poruchy za pomoci analýzy oleje, je důležité identifikovat materiály jednotlivých dílů, ze kterých je stroj vyroben. Podle materiálů jednotlivých prvků stroje lze identifikovat prvky, které jsou obsaženy v mazacím oleji. Při sledování stavu stroje a jeho opotřebení za pomoci tribotechnické diagnostiky se vyhodnocují částičky kovů v mazivu, které se vyskytují v mazacím oleji právě v důsledku opotřebovávání. Pro stanovení kovů v mazacích olejích se využívají různé metody, které dokážou kvantifikovat přítomnost kovů.

Příklady metod instrumentální analýzy, které lze využít pro stanovení kovů v mazacích olejích:

- atomová absorpční spektrometrie (AAS),
- atomová emisní spektrometrie (AES),
- emisní spektrometrie s indukci vázaným plazmatem (ICP),
- rentgenová fluorescence (XRF).

Jedná se o metody chemické analýzy. Např. při atomové absorpční spektrometrii se využívá pro měření absorpční spektrometr, který pro měření složení materiálů využívá principu absorpce světla volnými atomy prvků při určitých vlnových délkách.[12]

Principem rentgenové fluorescence je ionizace atomů vzorku primárně rentgenovým řízením. [13]

#### 2.3.2.4 Využití tribotechnické diagnostiky při prediktivní údržbě strojů

Při provádění prediktivní údržby strojů se provádí analýza mazacích olejů ve třech skupinách zkoušek:

##### 1) Analýza obsahu různých prvků v oleji

Při analýze prvků v oleji se nejčastěji využívají přímé metody emisní spektrometrie s indukci vázaným plazmatem (ICP). U analyzovaných prvků se sledují otěrové kovy, které predikují, jak je stroj opotřebováván. Otěrové kovy jsou například železo měď, hliník, cín nebo olovo. Dále se sleduje znečištění oleje, zde jsou analyzovány prvky jako křemík, hliník, sodík nebo titan. V neposlední řadě se zkoumají tzv. aditivní prvky, které jsou součástí přísad v olejích např. vápník, zinek, hořčík, fosfor, baryum, u těchto aditivních prvků se zkoumá jejich vyčerpatelnost.

## 2) Analýza prvků, které degradují olej za pomoci infračervené spektrometrie

Pomocí infračervené spektrometrie se sledují prvky, které degradují olej vlivem opotřebení stroje. Jedná se o prvky ze sulfatace, oxidace, nitrace. Za pomoci Fourierovy transformace lze sledovat také přítomnost vody, glykolu, sazí nebo dalších parametrů obsažených v oleji.

## 3) Analýza fyzikálně-chemických parametrů, které se zaměřují na stav a znečištění oleje

Při této analýze se zkoumají parametry, které jsou zaměřené na stav oleje a jeho znečištění. U všech typů oleje se stanovuje jeho viskozita a další parametry se dále zkouší dle závislosti na typu oleje.

Pro optimální dosažení výsledků tribotechnické diagnostiky v prediktivní údržbě je důležité, aby vzorky olejů byly odebírány nejlépe během provozu stroje při jeho běžném pracovním režimu. Pokud stroj neumožňuje odběr vzorku při jeho provozu, musí být vzorek odebrán alespoň co nejdříve po jeho zastavení. Vzorky by měly být odebrány před filtrem vždy ze stejného místa. Vzorky by měl odebírat proškolený pracovník. Vzorky se navzájem pravidelně porovnávají. Právě při pravidelném sledování lze předvídat vznikající poruchy, a to s ohledem na obsah vytypovaných prvků v mazacích olejích.[2]

### 2.3.2.5 Efektivita tribotechnické diagnostiky při prediktivní údržbě strojů

Za výhodu tribotechnické diagnostiky je považována její efektivita, která spočívá v úsporách, kterých lze dosáhnout pravidelnou analýzou olejů. Jedná se o úsporu finančních prostředků na výměnu oleje, ale dále také o úsporu na prostojích strojů či úsporu, která se týká náhradních dílů. Analýza oleje může mít také vliv na životní prostředí, neboť pravidelná výměna oleje, či snížení počtů výměny olejů vede ke snížení úniků oleje a ke snížení znečištění životního prostředí. Příklad úspory dosažitelné analýzou oleje predikuje následující tabulka.

Typ opravy	generální	střední	běžná
Cena za opravu	500 000 Kč	100 000 Kč	20 000 Kč
Podíl poruch	10 %	55 %	35 %
Odhad ročních nákladů na opravy	50 000 Kč	55 000 Kč	7000 Kč
Celkem bez programu analýz olejů	112000 Kč		
Podíl poruch s analýzou olejů	5 %	20 %	75 %
Odhad ročních nákladů na opravy	25 000 Kč	20 000 Kč	15 000 Kč
Celkem s programem analýz olejů	60 000 Kč		

*Tabulka č. 2 Příklad úspor dosažitelných analýzou olejů [2]*

Příklad úspory je implementován především na snížení nákladů z titulu zachycení vyskytujících se velkých, středních a běžných poruch a z nich plynoucích prostojů. Předpokládaná úspora nákladů na opravy může být vlivem pravidelného provádění analýzy olejů až téměř polovina finančních prostředků, které by byly vynaloženy na poruchy, bez programu analýzy olejů. [2]

#### 2.3.2.6 Ultrazvuková diagnostika

V rámci prediktivní údržby se jedná o metodu, která je vhodná jako doplňkový nástroj vibrační analýzy či termodiagnostiky. Stejně jako výše uvedené metody i tato metoda umožňuje predikovat závažné poruchy stroje, zejména na jejich počátku, což může významně snížit náklady v organizaci. Ultrazvuková technologie umožňuje za pomoci ultrazvukových vln odlišit rušivé zvuky v částech akustického spektra. Ultrazvukovou diagnostikou jsou zjišťovány poruchy typu: netěsnost spojů, trhliny v materiálu, výskyt výboje či zvýšení valivého tření.

Netěsnost spojů je detekována ultrazvukovým signálem, který se nachází v pásmu 30 až 50 kHz, tato intenzita ultrazvukového signálu se liší rozdílem netěsností a vzdáleností. Při analýze valivého tření jsou jednotlivá ultrazvuková měření navzájem srovnávána. Při zvýšeném ultrazvuku lze identifikovat nedostatečné mazání ložisek, které dále může vést k mikroskopickým defektům v oběžných drahách nebo až k velkým poškozením, které vedou k havárii ložisek.

Ultrazvukovou diagnostiku, stejně jako termodiagnostikou lze indikovat výboje, které vznikají např. v komponentech rozvodů vysokého napětí, v transformátorech, odpojovačích či rozvaděčích. Výhodou oproti termodiagnostice je zaznamenání výboje v počátečním stavu, termokamery detekují výboj až v momentě vzniku tepelné destrukce.[14]



### 2.3.3 Technologie využívané v prediktivní údržbě

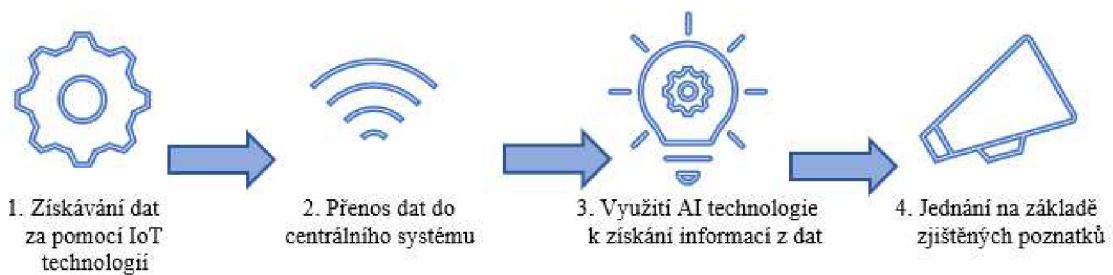
Technologie v oblasti prediktivní údržby přinesl zejména rozvoj průmyslu. V dnešní době existuje široká škála technologií, které pomáhají předvídat poruchy zařízení před jejich vznikem. Mezi nejčastěji využívané technologie v prediktivní údržbě patří Internet věcí (IoT), umělá inteligence (AI), strojové učení (ML), hloubkové učení (DL), digitální dvojče (DT), mobilní a cloudové technologie nebo dálkové monitorování a diagnostika. Tyto technologie jsou v praxi často vzájemně propojovány.

#### 2.3.3.1 Internet věcí (IoT) a umělá inteligence (AI)

IoT (z anglického slova Internet of Things) představuje síť fyzických zařízení, která jsou propojována pomocí datové konektivity. Výhodou IoT je zpracování a analýza obrovského množství dat. Právě tato výhoda je často využívána v oblasti údržby, kdy za pomoci IoT technologií lze jednodušeji odhadovat životnost či poruchovost strojů. IoT technologie umožňují v reálném čase sledovat a sbírat data, která jsou v pravidelných intervalech zasílána do zařízení (aplikací), kde dochází k jejich analýze a vyhodnocování, což umožňuje v prediktivní údržbě identifikovat potenciální problémy a predikovat budoucí potřebu údržby. Na trhu existuje spousta firem, které se zabývají IoT řešení v oblasti prediktivní výroby (např. Siemens MindSphere, Microsoft Azure IoT, IBM Watson IoT a další). Nevýhodou IoT technologií může být vyšší prvotní investice. Při využití IoT technologií je nutné myslet i na rizika s těmito technologiemi spojená. Nejvýznamnějším rizikem je bezpečnost. Existují totiž hrozby hackerských útoků, kdy může dojít ke ztrátě dat. [15][16]

Umělá inteligence je provázána s IoT technologiemi, kdy v první fázi procesu prediktivní údržby dochází ke sběru dat v reálném čase nejčastěji za pomoci IoT. Data jsou dále přenesena do aplikací, kde dochází k analýze a vyhodnocování dat při použití inteligentních technologií jako je právě umělá inteligence nebo analýza strojového učení. Za pomoci AI lze provést pokročilou analýzu, kdy dochází nejen k třídění podnikových dat, ale AI umožňuje porozumět těmto datům, naučit se z nich a využívat poznatky pro doporučení a další analýzy.[17]

Propojení IoT technologií a umělé inteligence znázorňuje obrázek číslo 10 níže.



Obr. 10 Etapy architektury prediktivní údržby a průmyslové sítě IoT [17]

### 2.3.3.2 Specifické formy umělé inteligence

Jednou ze specifických forem umělé inteligence je strojové učení. Strojové učení (Machine Learning) je oblast umělé inteligence, která v posledních letech zaznamenává dynamický rozvoj. Je zaměřena na vývoj algoritmů a statistických modelů, které umožňují počítačovým systémům, aby se učily a prováděly předpovědi a rozhodnutí na základě dostupných dat. To vše bez nutnosti, aby byly na konkrétní úkoly přímo programovány.

#### Kategorie učení

- Supervised Learning (učení s učitelem) - učí se na základě označených tréninkových dat, která obsahují vstupní data a odpovídající správné výstupy,
- Unsupervised Learning (učení bez učitele) – algoritmy pracují s daty, která nejsou označena, a snaží se najít strukturu nebo vzory ve vstupních datech,
- Reinforcement Learning (zpětnovazební učení) - algoritmy se učí prostřednictvím interakce s prostředím.

Další ze specifických forem umělé inteligence je hloubkové učení, přičemž se jedná o typ strojového učení. Základem hloubkového učení jsou vícevrstvé neuronové sítě, vysoce výkonné grafické procesory a velké objemy dat. Obecně lze říct, že hloubkové učení je proces, kde se systémy umělé inteligence trénují tak, aby se učily na základě získaných zkušeností s daty, rozpoznávaly vzory, vydávaly doporučení a přizpůsobovali se prostředí. Digitální systémy v hloubkovém učení tak budují znalosti na základě příkladů, které poté využívají k tomu, aby se v určitých situacích chovaly a fungovaly jako lidé. Hloubkové

učení v prediktivní údržbě přispívá k efektivnímu zpracování obrovského množství dat a k identifikaci složitých vzorů anomálií v datech, což umožňuje efektivnější predikci potenciálních selhání nebo poruch. Údržba může být tedy provedena dříve, než dojde k výpadku provozuschopnosti stroje.[18][19]

#### 2.3.3.3 Digitální dvojče (DT)

Digitální dvojče (digital twin) propojuje fyzický a digitální svět. Spočívá ve vytvoření virtuálního modelu reálného protějšku, který může simulovat, předpovídat a optimalizovat výkon a údržbu svého fyzického protějšku prostřednictvím aktualizací a analýzy dat v reálném čase. Digitální dvojče může být dvojčetem prakticky čehokoliv např. stroje, výrobního zařízení nebo produktu, ale také celé továrny. Jedná se o mezidisciplinární obor, který zahrnuje inženýrství, informatiku, automatizaci, materiálové vědy a další, což zdůrazňuje širokou aplikovatelnost od výroby až po zdravotní péči.[20][21][22]

#### 2.3.4 Výhody a nevýhody prediktivní údržby

Změna v oblasti strategie údržby může být náročná, obtížná a může vyžadovat vysoké počáteční investice. Avšak dle nejrůznějších průzkumů a vyhodnocení (např. zpráva společnosti Deloitte z roku 2022) bylo zjištěno, že implementace prediktivní údržby vedla k pozitivním výsledkům a ke zlepšení efektivity v podniku. Výhody prediktivní údržby lze rozdělit do následujících oblastí:

- oblast nákupu – díky lepšímu předcházení výskytu poruch, snížení počtu poruch a redukce prostojů zařízení, dochází ke snížení nákladů na údržbu (např. snížení nákladů na energie, náklady na náhradní díly – minimalizace skladových zásob náhradních dílů, nákup náhradních dílů, náklady na externí dodavatele zajišťující opravu strojů aj.),
- oblast provozu – implementace prediktivní údržby se podílí na zvýšení spolehlivosti a vybavení zařízení vč. nárůstu provozní životnosti stroje, zvýšení ziskovosti. Prediktivní údržba může zabezpečit lepší využití pracovních sil,
- oblast údržby – optimalizace v oblasti údržby přispívá k celkovému růstu efektivity podniku. Optimalizace v oblasti údržby při implementaci prediktivní údržby spočívá především ve zvýšení spolehlivosti, snížení počtu poruch, zvýšení provozní

životnosti, omezení odstávek zařízení, zlepšení bezpečnosti pracovního prostředí, snížení pracovních úrazů.

Dalšími benefitem prediktivní údržby může být lepší viditelnost napříč provozem, která spočívá ve zvýšeném přehledu o zařízeních ve společnosti nebo zajištěním lepšího plánování a provádění podrobných analýz.

Při plánování implementace prediktivní údržby je nutné zvážit také její nevýhody. Mezi ty jednoznačně patří větší náklady na implementaci. Implementace vyžaduje nákup technologií, ale i zaškolení personálu, což může být nákladné. Pro prediktivní údržbu je důležité kvalitní a dostatečné množství dat. Získání optimálních dat může být v některých podnicích obtížné. Kvalita a množství dat dále ovlivňuje přesnost predikcí. Další nevýhodou se může stát vysoká závislost na technologiích, u kterých existuje riziko selhání.  
[17][16][23][24]

### **3 Cíl práce**

Cílem této části diplomové práce je na základě diagnostiky kogenerační jednotky, která je instalována na bioplynové stanici, navrhnout možný systém prediktivní údržby. V rámci diagnostiky je práce zaměřena na analýzu teploty válců a kvality oleje. Dále bude provedeno ekonomické zhodnocení navrženého systému prediktivní údržby a vyhodnocení rentability investice.

### **4 Metodika**

Pro navržení systému prediktivní údržby bude v první řadě provedeno měření a sběr dat. Měření dat bude probíhat na základě nepřetržitého monitoringu provozních stavů kogenerační jednotky na bioplynové stanici pomocí SCADA systému, který umožňuje vzdáleně sledovat aktuální provozní parametry a současně veškerá data zálohovat. Následovat bude analýza nashromážděných dat, na základě které bude navržena aplikovatelná metoda prediktivní údržby. Součástí analýzy bude vyhodnocení naměřených hodnot a určení vztahů mezi naměřenými hodnotami v čase. Na základě analýzy jednotlivých hodnot vybraných ukazatelů budou identifikovány kritické body, které povedou k navržení a vyhodnocení účinnosti prediktivní údržby. V poslední části bude provedeno zhodnocení výhod a ekonomického přínosu pozorovaných metod oproti současnému stavu.

## **5 Diagnostika a prediktivní údržba zvoleného stroje**

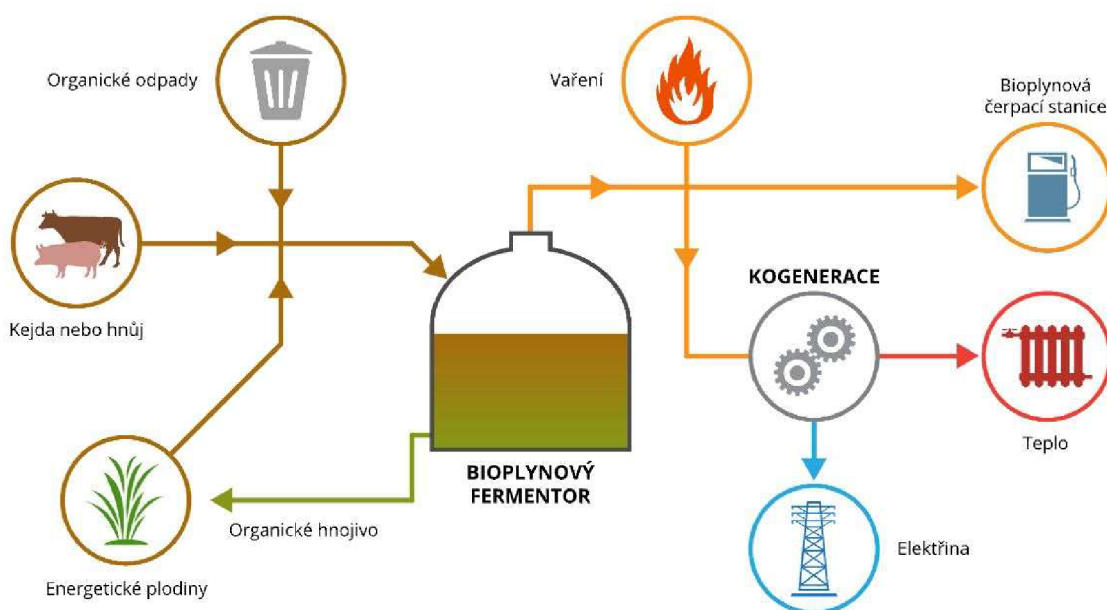
Tato práce se zabývá monitoringem zvoleného stroje skrze moderní SCADA systém, který za pomoci senzorů a čidel instalovaných na stroji, zobrazuje jeho provozní parametry v reálném čase. Následně jsou data analyzována, a na jejich základě jsou určeny intervaly servisních úkonů (výměny oleje a svíček) a ideální zásoba náhradních dílů. Posléze je provedeno ekonomické vyhodnocení návratnosti investice do tohoto systému vzhledem k úspoře nákladů, které by vznikaly předčasným nebo nedostatečným servisem. K analýze jsou využita data nashromážděná za téměř jeden rok provozu.

### **5.1 Popis aplikace a sledovaného stroje**

Zvolený stroj je provozován jako kogenerační jednotka na bioplynové stanici. Spaluje tedy bioplyn, který je v bioplynové stanici vyráběn, a tím za pomoci spalovacího motoru s generátorem vyrábí požadovanou elektrickou energii. Jelikož se ale jedná o kogenerační jednotku, je odváděno také teplo, které při spalování vzniká a je dále využíváno pro ohřev vody/topení v přílehlém výrobním podniku.

#### **5.1.1 Bioplynová stanice**

Velké množství biologického odpadu, který vzniká při chovu zemědělských zvířat, v potravinářství nebo zemědělství, je možné efektivně využít pro výrobu bioplynu. A právě to je účelem bioplynových stanic. Zjednodušeně by se dalo říct, že v bioplynové stanici dochází k zahřívání rozmělněné organické hmoty (na cca 42 °C), a tím dochází k rozkladným procesům a současně k produkci bioplynu. Bioplyn je následně odváděn do zásobníků, kde se vyčistí a upraví pro další využití. V našem případě je poté distribuován ke kogenerační jednotce, kde slouží jako její palivo. Jednoduché schéma bioplynové stanice je zobrazeno na obrázku číslo 11.[25]



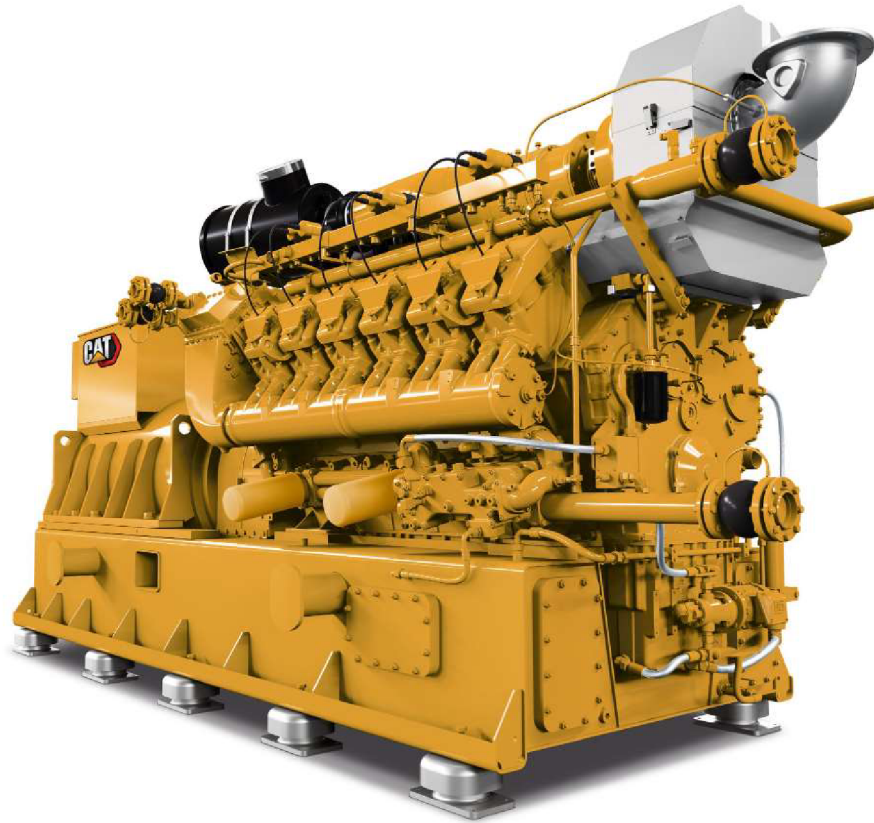
Obr. 11 Schéma bioplynové stanice [32]

### 5.1.2 Kogenerační jednotka

Kogenerační jednotka slouží ke kombinované výrobě elektřiny a tepla. Jádrem kogenerační jednotky je soustrojí motoru a generátoru. Pohonnou jednotkou je tedy spalovací motor, který je přizpůsobený pro spalování plynu (bioplynu, zemního plynu apod.). Motor tedy spaluje palivo a roztáčí generátor, a tím vyrábí elektrickou energii. Tato energie je následně využívána pro vlastní spotřebu výrobního závodu nebo odeslána do distribuční soustavy. Při spalování vzniká teplo, které je v případě kogenerační jednotky odváděno přes výměník do topného systému a je tak následně využito k ohřevu vody/topení. Tím dochází k zásadnímu navýšení účinnosti soustrojí (přes 85 %). [26]

### 5.1.3 Technické parametry sledovaného stroje

Motor je vidlicový dvanáctiválec o objemu 53 litrů, který disponuje výkonem 1000kW. Je upraven pro spalování bioplynu, a díky využívání tepla vznikajícího při spalování přesahuje celková účinnost kogenerační jednotky 85 %. Celkové rozměry motorgenerátoru jsou D/Š/V 5970/1810/2210 mm. Suchá hmotnost je 13 tun. [27]



*Obr. 12 Plynový generátor CG170-12 [27]*

## **5.2 Vizualizační software**

Aplikace slouží k nepřetržitému monitoringu provozních stavů a ke sběru dat z instalovaných strojů z divize energetických systémů. Jedná se tedy především o monitoring dieselgenerátorů, plynových generátorů a kogeneračních jednotek. Systém umožňuje vzdáleně sledovat aktuální provozní parametry jako je aktuální výkon, tlaky, teploty apod. ale také vstupní a výstupní veličiny přidružených systému jako jsou stav ventilačního systému, palivového hospodářství nebo stav prvků v rozvodnách.

Všechny parametry jsou od prvního okamžiku připojení zálohovány. Data je posléze možné využít k analýze ideálních provozních stavů nebo k vyhledávání příčin poruch. Součástí systému je také schématická vizualizace pro rychlou a uživatelsky jednoduchou orientaci v technologii.



### 5.2.1 Sledované hodnoty na stroji

Na stroji je nepřetržitě monitorováno velké množství parametrů, které mají vliv na fungování zařízení. Některé hodnoty slouží pouze jako informativní a některé jsou přímo vyhodnocovány řídicí jednotkou stroje a ovlivňují jeho provoz nebo mohou vést i k jeho odstavení, aby nedošlo k jeho poškození.

#### Výkon a otáčky motoru

První sledovanou hodnotou je výkon. Konkrétně pak aktuální výkon a požadovaný výkon. Stroj v tomto případě disponuje maximálním výkonem 1000kW a je na provozovateli, zda bude chtít využít jeho plný výkon. Pokud ano, bude požadovaný výkon roven tomu maximálnímu. Tato hodnota je poté porovnávána s aktuálním výkonem, tedy reálným výkonem, kterého stroj v daném okamžiku dosahuje.

#### Palivové hospodářství

Palivo ve spalovacím motoru plní zásadní funkci, jelikož je zdrojem energie potřebné k pohonu motoru, a tedy i celého zařízení. V našem případě se jedná o bioplyn. Neustále je sledován tlak plynu, který je do stroje přiváděn, a za pomoci analyzátoru plynu také jeho složení, protože kvalita plynu má zásadní vliv na správné spalování.

#### Olejové hospodářství

Správné mazání má zásadní vliv na správné fungování a životnost stroje. Z tohoto důvodu je neustále sledováno množství oleje, teplota a jeho kvalita. Toto bude dopodrobna vysvětleno v kapitole 5.3.2

#### Generátor

Na generátoru jsou sledovány otáčky a také teploty na vynutí, aby se vyloučilo jeho poškození při přehřátí.

#### Hodiny provozu

Sledováno je také velké množství časových intervalů. Mezi ně patří například doba od startu stroje, celkové hodiny od uvedení do provozu nebo intervaly od posledního servisního

úkonu. Od těchto parametrů se podobně jako u automobilů odvíjí další servisní zásahy jako je výměna oleje a filtrů nebo interval mazání ložisek. Jelikož se ale nejedná o mobilní zařízení, jsou počítány motohodiny namísto ujetých kilometrů.

Ložiska

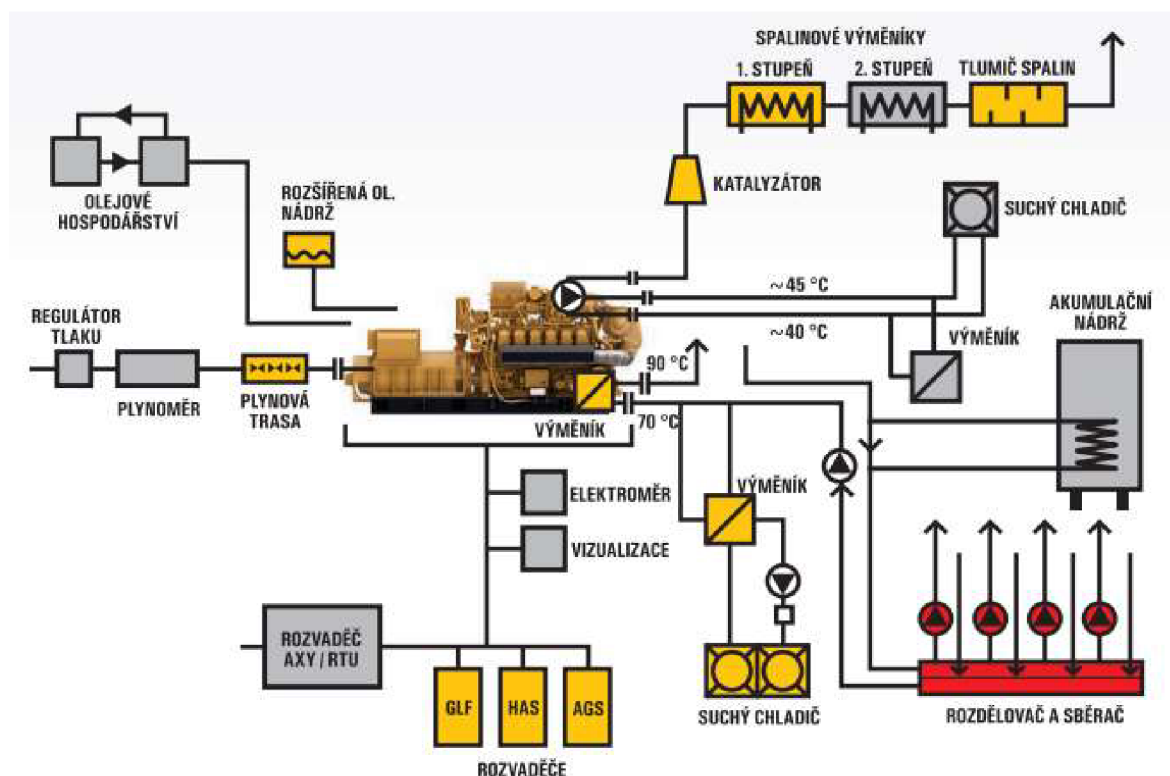
U ložisek je sledována jejich teplota a také interval jejich mazání a výměny.

Teploty válců

Součástí monitoringu je také měření teploty na jednotlivých válcích motoru. Z těchto hodnot je možné vyzorovat, jestli spalování probíhá správně a rovnoměrně ve všech válcích. Tyto data budou podrobně analyzována v kapitole 5.3.1.

### 5.2.2 Sledované hodnoty na přidružených systémech

Kogenerační jednotka není pouze samotný motorgenerátor, ale její součástí je také velké množství dalších konstrukčních prvků. Mezi tyto prvky patří například palivové hospodářství, spalínová trasa s tlumičem a katalyzátorem, olejové hospodářství a v neposlední řadě tepelné hospodářství.



Obr. Schéma kogenerační jednotky [28]

Na těchto systémech je neustále sledováno velké množství parametrů, které mají vliv na bezproblémový chod soustrojí. Na jednotlivých částech se sleduje:

- Palivové hospodářství – neustále je sledována kvalita a složení plynu. Konkrétně se sleduje obsah kyslíku, sirovodíku a methanu. Sledován je také aktuální tlak.
- Olejové hospodářství – sleduje se hladina oleje v provozní a zásobní nádrži. Dále pak teplota a tlak oleje.
- Spalinové hospodářství – je sledováno zanesení spalinového výměníku tepla a teplota spalin za výměníkem. Také je sledován protitlak spalin.
- Tepelné hospodářství – jsou sledovány teploty na několika místech hospodářství. Konkrétně před a za výměníkem tepla, před a za chladičem a před a za spalinovým výměníkem tepla. Dále je v celém hospodářství pomocí tlakových čidel sledován tlak kapaliny.

### **5.2.3 Analytické nástroje**

Aplikace v reálném čase pracuje s dostupnými daty a provádí jejich analýzu a může v případě dosažení definovaných stavů upozornit obsluhu nebo dispečera. Konkrétně jsou sledovány následující parametry:

- Konstantní data – jedná se o zařízení, kde se měřená data neustále drobně mění (teploty, výkon apod.) a je tedy logické, že se zobrazovaná data také musí neustále měnit. Jakmile dojde k situaci, že jsou data konstantní, došlo pravděpodobně k poruše a dispečer musí situaci prověřit.
- Chyba komunikace – aplikace si neustále ověřuje, že je spojení mezi strojem aktivní. Pokud nastane přerušování komunikace, došlo pravděpodobně k výpadku sítě nebo chybě PLC a obsluha musí být upozorněna.
- Nízký výkon – porovnávání aktuálního a požadovaného výkonu. Pokud se hodnoty liší o více než přípustnou je nutné provést diagnostiku pro určení možné příčiny.

- Kvalita oleje – v reálném čase je pozorován stav a kvalita oleje a pokud parametry dosáhnou stanovené hodnoty je upozorněn dispečink.
- Teplota válců – je sledována aktuální teplota válců a pokud se nepohybuje ve stanovených mezích je informován dispečink, aby se předešlo poškození stroje.

## **5.3 Analýza naměřených hodnot**

### **5.3.1 Teploty válců**

Stroj je osazen čidly pro měření teplot na jednotlivých válcích motoru. Tyto teploty jsou monitorovány z důvodu kontroly správného spalování, a aby byl stroj automaticky odstaven v případě dosažení kritických hodnot, čímž by došlo k zamezení případného poškození stroje.

Tato práce se zabývá analýzou těchto naměřených hodnot za účelem zjištění možnosti jejich využití k prediktivní údržbě, a to konkrétně k upozornění na nutnost výměny zapalovacích svíček dříve než dojde ke konci jejich životnosti, a tím k neplánovanému odstavení stroje.

Sledovaný stroj má dvanáctiválcový vidlicový motor. Disponuje tedy dvěma řadami válců po šesti. V jedné řadě jsou označeny A1 až A6 a v druhé řadě B1 až B6. K dispozici je tedy dvanáct datových souborů z období od ledna roku 2023 až po březen 2024.

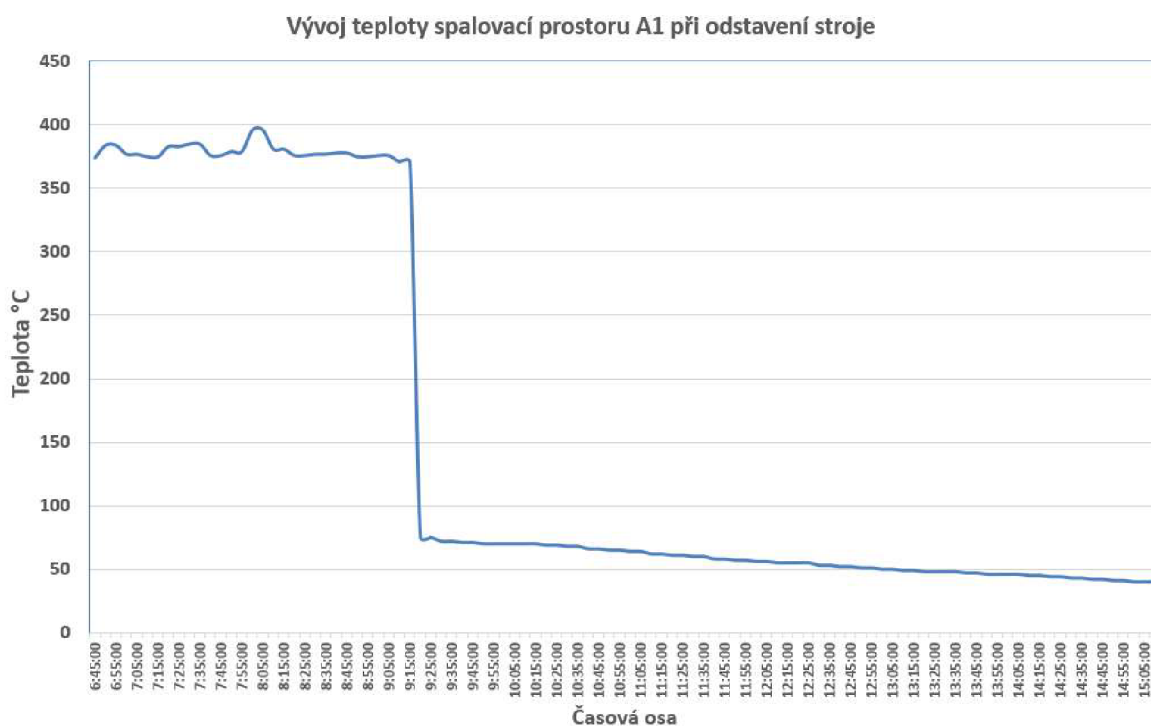
#### **5.3.1.1 Analýza naměřených hodnot**

Jak bylo již zmíněno v předešlé části, úkolem analýzy je zjistit, zda by se naměřená data dala využít k predikci poruchy. K tomu je nutné definovat bezporuchový stav a sledovat případné odchylky, které povedou k poruše.

Data jsou monitorována a ukládána každou vteřinu a jedná se tedy o obrovské množství dat, které se musí nejprve vyfiltrovat, k dosažení požadovaného výstupu. Pro tuto analýzu není nutné natolik časté měření a budou tedy použita data s pětiminutovým odstupem. Naměřená data jsou k dispozici jako příloha č.1 této práce.

Dále je nutné vyfiltrovat data pouze z doby, kdy byl stroj v provozu a dosahoval tedy provozních teplot. Důvodů odstávky stroje může být několik, například z důvodu nutnosti servisního zásahu (plánovaného nebo neplánovaného) nebo v případě, že provozovatel

z jakéhokoliv důvodu momentálně nepotřebuje, aby byla elektrická energie nebo teplo vyráběno. V některých případech stroje nejsou provozovány nepřetržitě, ale jsou využívány pouze na pokrývání špiček. V tomto případě jsou startovány a odstavovány i několikrát za den. To se v naměřených hodnotách projevuje poklesem teploty na přibližně 40 °C viz graf č.1. Další pokles teploty již nenastává, protože právě na tuto teplotu je motor neustále přehříván, aby byl schopen v případě obdržení pokynu ke startu co nejrychleji začít dodávat požadovaný výkon. Díky tomu je stroj schopen dodávat plný výkon do přibližně dvanácti minut. Teploty válců dosáhnou provozních hodnot již po dvou minutách.

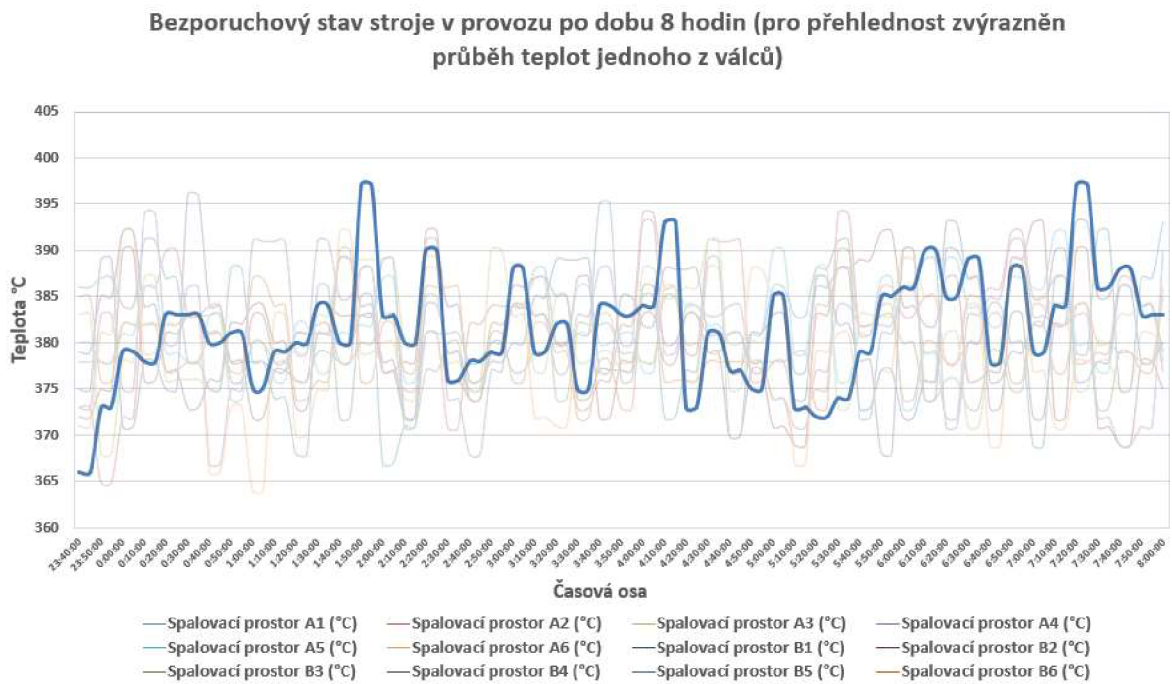


*Graf č. 1 Vývoj teploty spalovacího prostoru A1 při odstavení stroje*

Pokud je stroj v provozu, měla by se teplota na všech válcích pohybovat v rozmezí přibližně 350-400°C. Pokud je tato teplota po delší dobu mimo tento rozsah, je pravděpodobné, že je něco v nepořádku. Příčin může být několik, například špatné seřízení ventilů nebo špatné plnění, ale nejčastějším důvodem je, že se zapalovací svíčka již blíží ke konci své životnosti (je již zoxidovaná, zanesená apod.). Monitoringem by tedy mělo být možné určit dobu, kdy se konec životnosti bude blížit a včas upozornit obsluhu, aby provedla její výměnu, aby nedošlo k odstavení stroje, a tím k neplánované odstávce a ztrátě zisku.

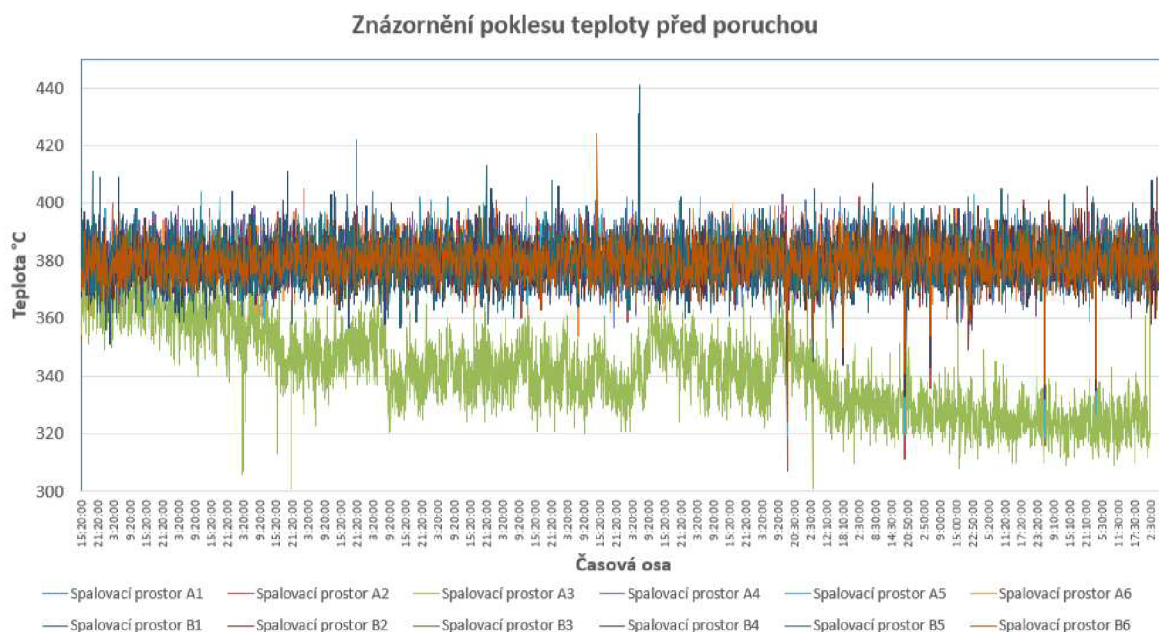
Nejprve je nutné určit parametry bezporuchového stavu. V tomto případě se tedy jedná o stav, kdy je stroj v provozu a teplota na všech dvanácti válcích se pohybuje v rozmezí 350-

400°C. Tento stav je pro názornost promítnut na grafu č.2, kde je tento stav znázorněn po dobu 8 hodin. Pro přehlednost je v grafu zvýrazněn jeden z válců. Tento stav může dle naměřených hodnot trvat mnohem déle, ale v grafu je interval omezen z důvodu větší přehlednosti. V grafu je tedy zřetelně vidět, že při bezporuchovém stavu jsou všechny teploty bez výrazných odchylek v požadovaném rozmezí.



*Graf č. 2 Bezporuchový stav stroje v provozu po dobu 8 hodin*

Dalším krokem je rozpoznání odchylky od bezporuchového stavu, která vede ke konci životnosti svíčky a následné poruše. Tato odchylka je znázorněna na grafu číslo 3.



*Graf č. 3 Odchylka teploty u zapalovací svíčky, která se blíží konci životnosti*

Z grafu je patrné, že snižování teploty ve válci s označením A3 probíhá postupně a pokles bylo možné v tomto případě pozorovat v přibližně čtrnácti denním intervalu. Konkrétně se teplota snižovala od 3.2.2024 až do 20.2.2024, kdy teplota po delší dobu klesla pod spodní stanovenou mez a motor se preventivně odstavil.

Obsluha stroje v návaznosti na tuto událost vyměnila na válci A3 svíčku a stroj byl znovu uveden do provozu. Na grafu číslo 4 je poté vidět, že se po tomto úkonu teplota na zmiňovaném válci vrátila opět na bezporuchový stav a je tedy zřejmé, že k odstavení stroje došlo právě z důvodu vadné zapalovací svíčky.





Graf č. 4 Vývoj teploty válce A3 před poruchou a po výměně svíčky

### 5.3.1.2 Vyhodnocení

Na základě provedené analýzy naměřených hodnot je možné potvrdit, že měření teplot spalovacích prostorů lze využít v prediktivní údržbě. Ukázalo se, že je s dostatečným předstihem možné vyzorovat možnou nadcházející poruchu a včasným zásahem předejít neplánované odstávce.

Ve sledovaném období došlo ke konci životnosti svíčky dvakrát a v obou případech byl průběh snižování teploty válce v čase obdobný. Aby však bylo možné s jistotou tvrdit, že je průběh vždy podobný, bylo by nutné analyzovat větší časový úsek, a tedy větší množství dat.

Ve srovnání s preventivním způsobem údržby by tak bylo možné docílit finanční úspory, protože pokud díly měněny preventivně, není zpravidla využít jejich úplný potenciál, jelikož jsou vyměněny před dosažením konce jejich životnosti.

### 5.3.1.3 Určení optimálních servisních intervalů a skladových zásob

Životnost svíček se odvíjí od typu plynu, který se v motoru spaluje. Pokud by se jednalo o zemní plyn, dosahuje životnost až 4000 motohodin. V aplikaci, kde je jako palivo používán bioplyn, může z důvodu složení plynu být životnost i poloviční. Právě typ a složení plynu komplikuje určení optimálního intervalu preventivní údržby – výměny svíček. Z tohoto



důvodu může docházet k předčasné výměně nebo v horším případě k odstavení stroje z důvodu dosažení konce životnosti dílu.

Pokud dojde k neplánovanému odstavení takto velikého stroje, znamená to značné ztráty pro provozovatele. Servisní intervaly jsou tedy zpravidla nastaveny tak, aby k odstávkám docházelo co možná nejméně. Důsledkem jsou tedy časté výměny před využitím veškerého potenciálu svíček a tím rostou náklady na provoz.

Z tohoto důvodu se jeví jako ideální volba právě investice do monitoringu a využití metod preventivní údržby. Díky tomu je možné co nejvíce využít instalované díly a provést jejich výměnu v ideálním čase, tedy když se blíží konec jejich životnosti.

Skladové zásoby:

- Preventivní údržba – pokud provozovatel mění preventivně všechny zapalovací svíčky v jednu chvíli, je vždy nutné počítat se skladovou zásobou dvanácti kusů na naplánovaný termín servisu a minimálně dvěma navíc po celou dobu jako rezervu pro případ, kdy by nastala porucha a byla nutná jejich neplánovaná výměna.
- Prediktivní údržba – pokud provozovatel bude měnit svíčky na základě prediktivní údržby, může skladovou zásobu výrazně snížit. Jelikož je možné vyzorovat, že bude nutné provést výměnu s relativně dlouhým předstihem, může jednotlivé kusy objednávat až na základě potřeby (samozřejmě záleží na aktuální dostupnosti u výrobce). Z tohoto důvodu by mělo stačit držet skladem pouze dva kusy pro případ nepředvídatelné poruchy.

### **5.3.2 Kvalita oleje**

Kontrola stavu oleje je u strojních zařízení klíčová. Zahrnuje měření, monitorování a analýzu změn v mazivech a topných olejích z hlediska kontaminace, chemického obsahu a sledování degradace kvality oleje od nového až po konec životnosti. Tato data poskytují náhled na problémy ovlivňující výkon a spolehlivost a tvoří základ efektivního programu údržby.

V našem případě je instalováno čidlo, které měří tzv. TanDelta Number (TDN), které uvádí přesnou kvalitu oleje v jednom čísle. V této hodnotě je promítnuta oxidace, alkalita, obsah

vody, množství částic a viskozita. Díky tomu, že výstupem je jediné číslo, je relativně snadné definovat limitní hodnoty pro danou aplikaci.



Obr. 13 Graf Tan Delta Number [29]

V současné chvíli je u diagnostikovaného stroje kvalita oleje sledována pouze z důvodu, aby při výrazném poklesu kvality oleje (poklesu TDN) došlo k upozornění obsluhy. Data ale nejsou využívána k určení ideálního termínu výměny oleje a olej je tedy měněn preventivně přibližně na měsíční bázi.

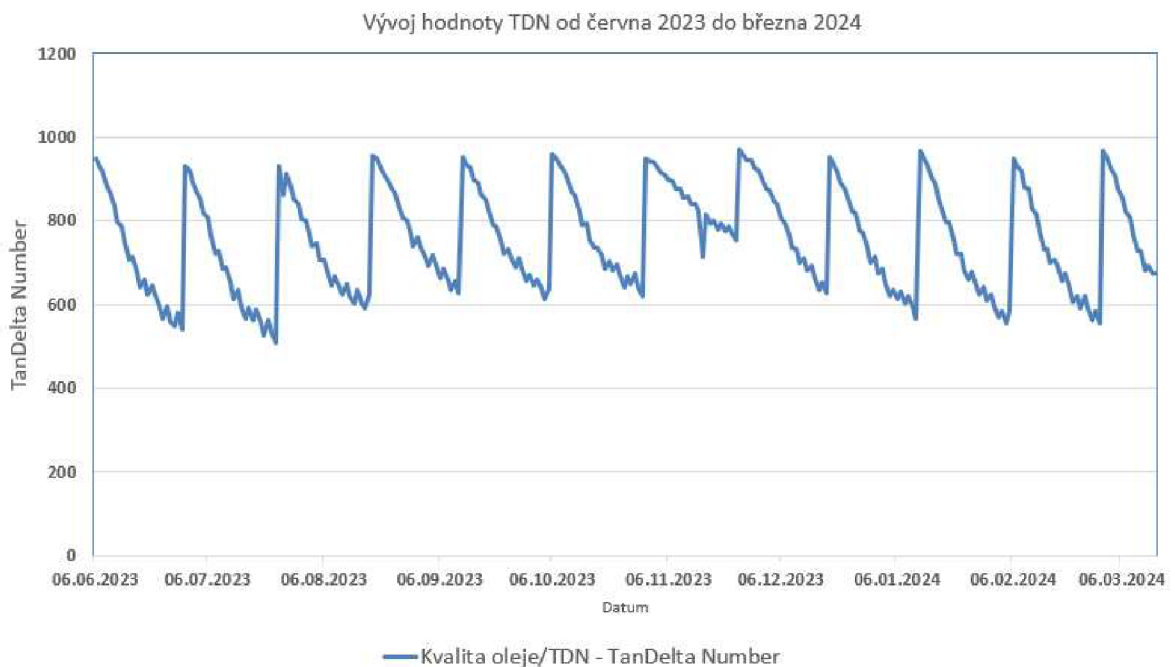
Kvalita oleje je sledována nepřetržitě. Hodnota TDN je však závislá na tom, zda je zařízení v provozu nebo nikoliv, protože na viskozitu a potažmo tedy i hodnotu TDN má vliv teplota oleje. Z tohoto důvodu je nutné při vyhodnocování naměřených výsledků myslet nato, že se musí pracovat pouze s daty, která byla naměřena v době provozu stroje a olej tedy měl požadovanou provozní teplotu. Tato teplota se pohybuje v rozmezí 92-95 °C.

Kvalita oleje s časem jeho využívání přirozeně klesá. Toto způsobuje několik faktorů, mezi které lze zařadit:

- Znečištění – během provozu stroje dochází k opotřebenosti pohyblivých částí stroje a tím vznikají mikroskopické částice, které se mohou dostat do oleje. Případně se mohou do oleje také dostat částice zvenčí, například prach.
- Chemické změny – vysoké teploty a tlak, kterým je olej ve stroji při provozu vystavován, může způsobit chemické změny v oleji a snížit tak jeho kvalitu.

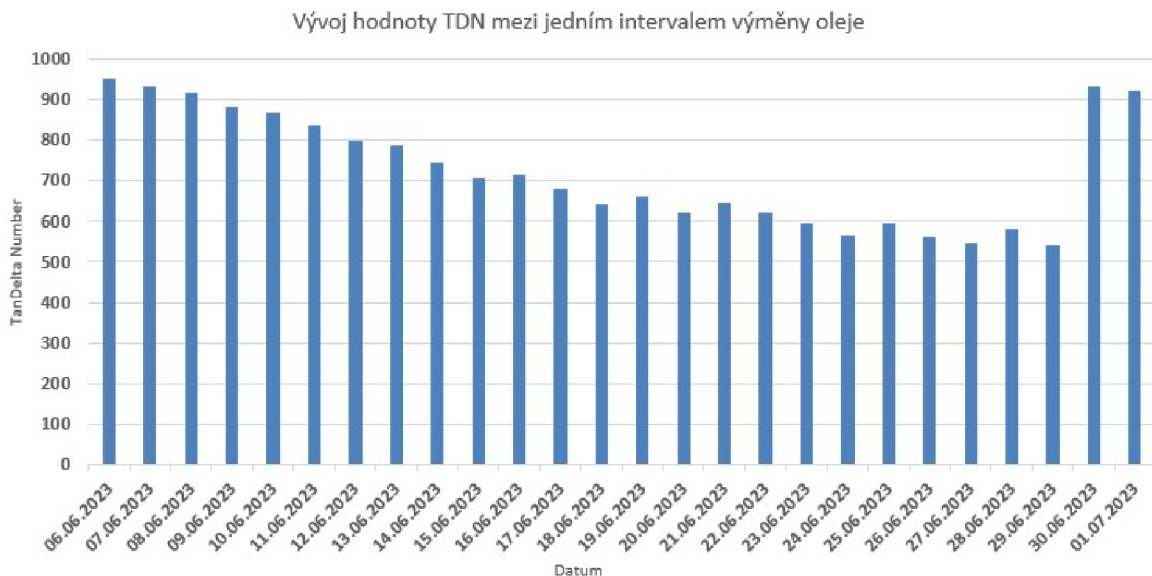
- Spotřeba aditiv – moderní motorové oleje obsahují různá aditiva, která slouží ke zlepšení vlastností oleje. Jedná se například o detergenty, antioxidanty a inhibitory koroze. Tyto aditiva mají pozitivní vliv na vlastnosti oleje a postupem času jsou spotřebovávány a tím dochází ke snížení kvality oleje.
- Voda a kondenzace – může docházet ke kondenzaci vody v oleji. Voda v oleji posléze snižuje jeho mazací schopnosti a může způsobovat korozi.

Snižování kvality oleje je dobře patrné na grafu č.5, který vychází z naměřených hodnot z přílohy č.2. Na grafu je zřetelný pokles TDN mezi jednotlivými intervaly výměny oleje.



*Graf č. 5 Vývoj hodnoty TDN od června 2023 do března 2024*

Na grafu je také vidět, že hodnota TDN pouze neklesá, ale v určitých momentech také mírně stoupá viz graf č.6, který podrobněji ukazuje jeden interval mezi výměnami oleje. Toto může být způsobeno několika příčinami. Jelikož stroj při provozu spotřebovává jisté množství oleje, probíhá v případě, že hladina oleje klesne pod stanovou mez, automatické doplnění z externí nádrže. Toto si pomoci čidla hlídajícího maximální a minimální hladinu oleje obstarává řídicí jednotka stroje. Dále může drobný nárůst způsobit uvolnění větší usazeniny v oleji nebo odstavení a následný start motoru. Z dlouhodobého hlediska je ale zřejmý klesající trend.



*Graf č. 6 Vývoj hodnoty TDN mezi jedním intervalem výměny oleje*

Limitní hodnoty TDN se liší podle stroje. Jiné požadované hodnoty jsou tedy například pro motor spalující benzín, naftu anebo právě jako v našem případě plyn. Tyto hodnoty jsou uvedeny v provozním manuálu výrobce snímače.[30]

Pro naši aplikaci jsou směrodatné hodnoty TDN následující:

- TDN pro nový olej – 900,
- varování pro nízkou hodnotu TDN – 760,
- varování pro vysokou hodnotu TDN – 1060,
- vysoká hladina TDN – 1140,
- nízká hladina TDN – 660.

Příliš vysoká hodnota TDN je zpravidla způsobena špatnou konfigurací (například na špatný druh oleje) anebo špatnou lokalizací senzoru (může být instalován v místě kde není kompletně ponořen apod.). V našich hodnotách však nikdy nedošlo k naměření hodnot dosahujících horních mezí a senzor je tedy instalován správně.[30]

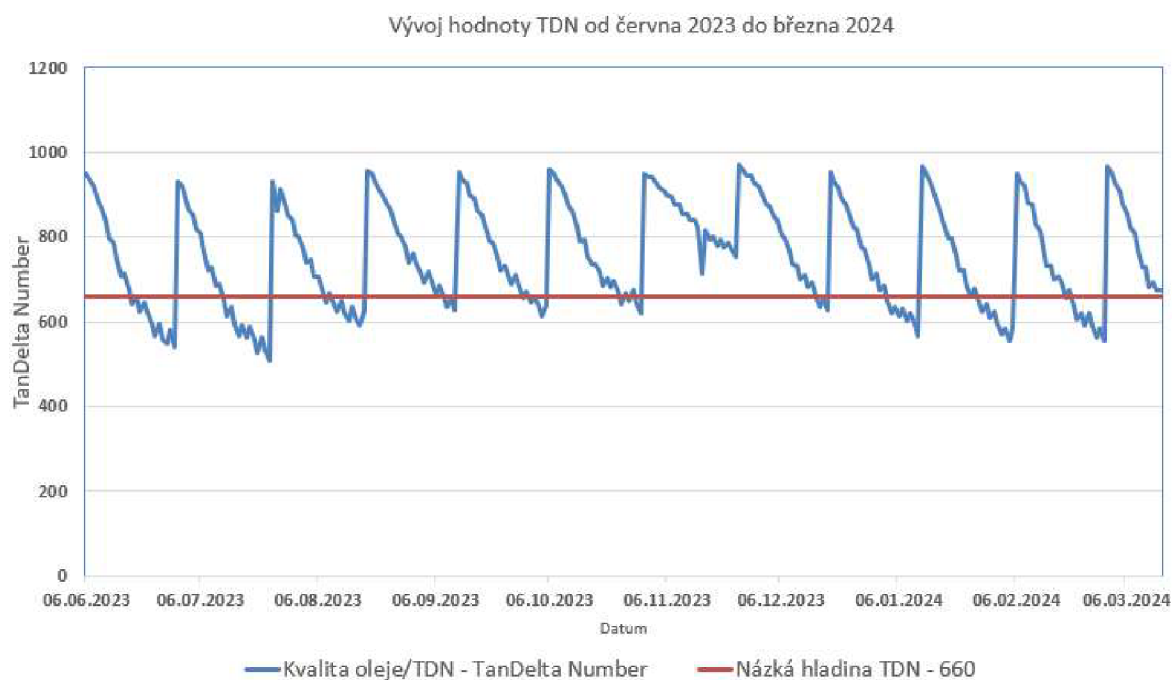
Jelikož je měření senzorem v současné chvíli ve zkušebním provozu, je vždy s výměnou oleje odebírán vzorek, který je následně podroben laboratorním testům. Výsledky testů jsou

následně porovnány s hodnotou z čidla, aby se ověřila důvěryhodnost snímaných dat. Prozatím byla naměřená data a laboratorní výsledky velice podobné a naměřené hodnoty se tedy na základě této skutečnosti dají považovat jako důvěryhodné.

### 5.3.2.1 Analýza naměřených hodnot

Data, která budou analyzována, byla naměřena v časovém úseku od začátku června 2023 do března 2024. Kvalita oleje je snímána a zaznamenávána každou vteřinu, ale pro účely určení servisního intervalu není takto časté měření nutné. Budou tedy použity denní hodnoty.

Nejdůležitější hodnoty, které je nutné z naměřených dat získat, je množství provedených výměn oleje za sledované období a hodnoty TDN v okamžiku těchto výměn. Toto je přehledně zobrazeno v grafu číslo 7. V grafu je také znázorněna hodnota TDN 660, tedy hodnota dolní hranice TDN, která dle výrobce signalizuje doporučenou výměnu oleje.



*Graf č. 7 Vývoj hodnoty TDN od června 2023 do března 2024*

Podle grafu je patrné, že za sledované období došlo k jedenácti výměnám oleje, a to přibližně v třítydenních intervalech. Konkrétní datumy výměny včetně hodnoty TDN, kterou měněný olej v den výměny disponoval, jsou uvedeny v tabulce č. 3. Tyto termíny byly stanoveny dle manuálu výrobce stroje na základě doby provozu – motohodin.

Výměna č.	Termín výměny oleje	Hodnota TDM při výměně	Rozdíl oproti doporučené dolní hranici TDN
1	30.06.2023	542,45	-117,55
2	25.07.2023	507,48	-152,52
3	19.08.2023	623,18	-36,82
4	12.09.2023	629,06	-30,94
5	06.10.2023	638,87	-21,13
6	31.10.2023	621,22	-38,78
7	25.11.2023	753,21	93,21
8	19.12.2023	627,71	-32,29
9	12.01.2024	564,96	-95,04
10	06.02.2024	583,36	-76,64
11	01.03.2024	555,03	-104,97

Tabulka č. 3 Hodnota TDN v době výměny oleje

V tabulce je uveden rozdíl mezi hodnotou TDN, kterou disponoval olej v den výměny, a hodnotou 660, což je hodnota doporučená pro výměnu výrobcem senzoru. Na první pohled je z tabulky patrné, že k výměně oleje dle naměřených hodnot nedocházelo vždy v ideálním intervalu.

#### 5.3.2.2 Vyhodnocení

Na základě provedené analýzy dat je patrné, že interval výměny oleje, který se provádí pouze na základě počtu provozních hodin stroje není ideální.

Výměny číslo 3, 4, 5, 6 a 8 proběhly v relativně ideálním čase, protože TDN oleje bylo v ten okamžik velice blízko minimální doporučené hodnotě TDN 660.

Výměny s pořadovým číslem 1, 2, 9, 10 a 11 byly provedeny vzhledem k minimální doporučené hodnotě TDN 660 příliš pozdě. Kvalita oleje tedy byla v okamžiku výměny již nízká, a to může mít negativní vliv na funkci stroje. V krajním případě by mohlo dojít i k poruše a odstavení stroje.

Naopak výměna číslo 7 proběhla příliš brzy a olej byl tedy vyměněn před koncem jeho životnosti, což znamenalo pro provozovatele zbytečné náklady.

Sledováním aktuální kvality oleje by tedy bylo možné docílit ideálního servisního intervalu výměny a tím předejít negativním dopadům, které může příliš dlouho používaný olej mít na strojní zařízení a zároveň zamezit nadbytečným nákladům spojeným s předčasnou výměnou.

### 5.3.2.3 Určení optimálních servisní intervalů a skladových zásob

Preventivní servisní interval výměny oleje je prováděn po dosažení výrobcem stanoveného množství odpracovaných motohodin nebo po uplynutí určené časového intervalu od poslední výměny (co nastane dříve, podobně jako u osobního automobilu).

Toto se dle analýzy naměřených hodnot nezdá být vždy ideálním intervalem, protože v několika případech došlo k relativně pozdní výměně anebo nebo k předčasné výměně.

Jelikož je součástí technologie externí olejová nádrž, ze které je v případě poklesu hladiny oleje ve stroji pod stanovenou mez (olej je spotřebováván při provozu) olej doplňován, a ze které je také načerpáván nový olej v případě výměny oleje (na pokyn provozovatele), bylo by relativně jednoduché zrealizování automatizované výměny oleje na základě měření jeho aktuální kvality. Interval výměny by tedy nastal v ideální okamžik a bylo by nutné hlídat pouze dostatečné množství oleje v externí nádrži a vyprazdňování nádrže na použitý olej.

Optimální skladová zásoba by tedy byla minimálně 500 litrů (objem potřebný pro jednu kompletní výměnu oleje + zásoba pro spotřebu během provozu) až 2000 litrů (plná externí nádrž). Její doplňování by pak mohlo probíhat méně často a po větším množství. To by mělo za následek další úsporu nákladů (množstevní sleva a úspora za dopravu).

### 5.3.3 Příklad predikce

Na základě znalosti naměřených dat a jejich analýzy je možné predikovat, kdy přibližně nastane další potřeba výměny oleje nebo svíčky. Díky tomu je možné dopředu počítat s nutnou odstávkou a naplánovat ji tak, aby nedocházelo k odstavení stroje pouze z důvodu servisu.

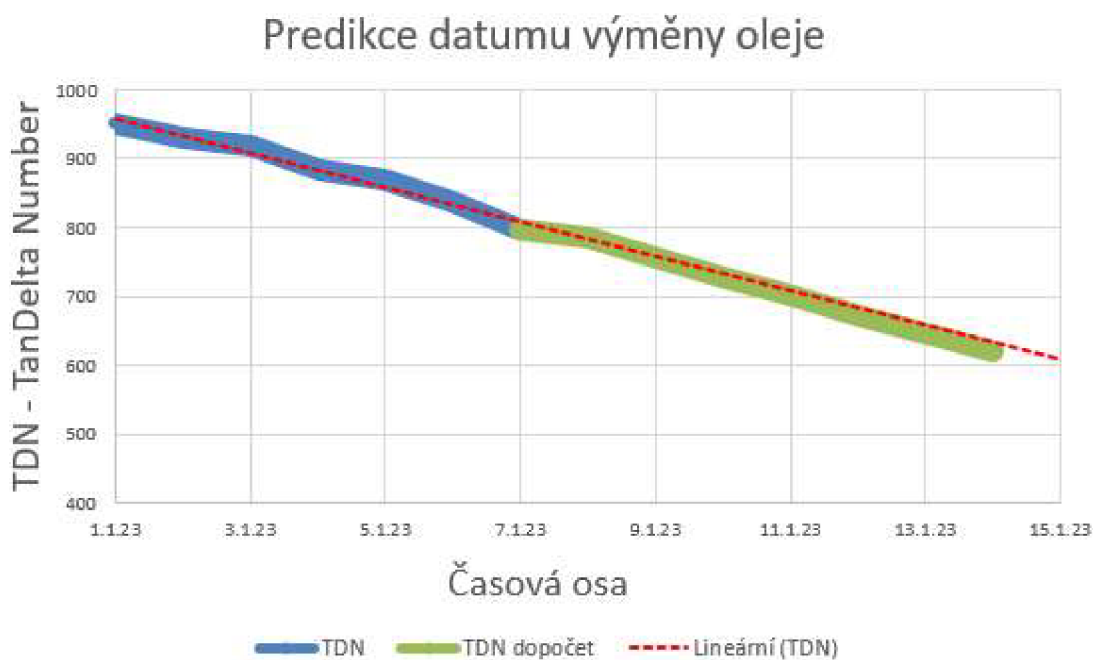
Pokud známe současnou hodnotu TDN, nebo v případě svíček teplotu válců, a její dosavadní vývoj, je možné odhadnou přibližnou dobu, kdy bude nutná další výměna. Na základě analýzy dat se potvrdilo, že v obou výše uvedených případech mají hodnoty lineárně klesající trend.

Příklad predikce je zobrazen v následující tabulce číslo 4 a grafu číslo 8. V tomto případě je známá počáteční hodnota TDN (950) a současná hodnota (797). Také je známo datum poslední výměny oleje a aktuální datum – v tomto případě 07.01. Na základě těchto dat je možné dopočítat předpokládaný pokles TDN v následujících dnech a predikovat tak datum, kdy bude nutné provést výměnu. Tento způsob dopočtu by bylo možné aplikovat také na případ výměny zapalovacích svíček.

	<b>DATUM</b>	<b>TDN</b>	<b>TDN dopočet</b>
	<b>1.1.23</b>	<b>950</b>	
	<b>2.1.23</b>	<b>931</b>	
	<b>3.1.23</b>	<b>919</b>	
	<b>4.1.23</b>	<b>884</b>	
	<b>5.1.23</b>	<b>868</b>	
	<b>6.1.23</b>	<b>838</b>	
<b>Aktuální datum</b>	<b>7.1.23</b>	<b>797</b>	<b>797</b>
	<b>8.1.23</b>		<b>784,43</b>
	<b>9.1.23</b>		<b>755,96</b>
	<b>10.1.23</b>		<b>726,73</b>
	<b>11.1.23</b>		<b>700,67</b>
	<b>12.1.23</b>		<b>672,17</b>
<b>Predikovaný datum výměny</b>	<b>13.1.23</b>		<b>646,73</b>
	<b>14.1.23</b>		<b>621,87</b>

*Tabulka č. 4 dopočet TDN na základě lineárního trendu*





Graf č. 8 Predikce datumu výměny oleje

Z vypočítaných hodnot a také z grafu číslo x je tedy předikovaný datum poklesu kvality pod požadovanou hranici, a s tím spojené výměny oleje, 13.1.2023.

## 5.4 Ekonomické vyhodnocení

Mezi hlavní důvody investování do prediktivní údržby je zvyšování efektivity a snižování nákladů. Každá inovace je spojena s určitou počáteční investicí a je tedy nutné před její realizací posoudit vhodnost vzhledem ke konkrétní aplikaci a reálnou návratností investice.

### 5.4.1 Teploty válců

Z ekonomického hlediska je na sledování teplot válců nutné nahlížet ze dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem je možná úspora na náhradních dílech, nových zapalovacích svíčkách, využitím jejich maximální doby provozu. Druhým je pak ztráta zisku v případě odstavení stroje.

Servisní intervaly jsou z důvodu velkých ztrát při odstavení stroje nastaveny hodně bezpečně. Znamená to, že jsou často měněny s velkým předstihem a svíčky jsou tedy měněny zbytečně brzy. Životnost svíček závisí na typu a složení spalovaného plynu. V případě zemního plynu je jejich životnost až 4000Mth, ale v případě bioplynu může být

životnost i pouze 2000Mth. Z tohoto důvodu jsou standardně svíčky preventivně měněny právě při tomto milníku. Sledováním však bylo zjištěno, že průměrná životnost by mohla dosahovat v případě bioplynu průměrně až 2500Mth. Úspora by tedy byla vysoká viz tabulka č. 5.

Počet hodin provozu za rok	Interval výměny zapalovacích svíček	Cena zapalovací svíčky	Počet válců	Roční náklady	Rozdíl
6000 Mth	2000 Mth	20 000 Kč	12	720 000 Kč	<b>144 000 Kč</b>
6000 Mth	2500 Mth	20 000 Kč	12	576 000 Kč	

Tabulka č. 5 Výpočet možné úspory při využití prediktivní údržby

Ve sledovaném období došlo ke dvěma neplánovaným odstávkám stroje z důvodu vadné zapalovací svíčky, kterým se dalo předejít sledováním. V prvním případě byl stroj odstaven dvě a půl hodiny a ve druhém případě hodinu a půl. Celkem tedy za sledované období 4 hodiny. Nutno podotknout, že takto krátký čas na znovuvvedení stroje do provozu byl pouze díky nepřetržité přítomnosti obsluhy a skladové zásobě náhradních dílu. Pokud by tomu tak nebylo, mohl být stroj odstaven i na několik týdnů (v závislosti na dostupnosti náhradních dílů).

Aktuální výkupní cena MWh se pohybuje okolo 2000 Kč. Po odečtení nákladů na palivo a provoz stroje došlo tedy ke ztrátě přibližně 700 Kč za každou hodinu nečinnosti stroje. V tomto případě se tedy jednalo o nižší tisíce korun, ale pokud by nebyl takto pohotový servisní zásah, docházelo by ke ztrátám v řádech desítek tisíc korun každý den.

Výsledkem je, že investováním do systému pro monitoring teplot je možné výrazně ušetřit na provozních nákladech a současně snížit riziko neplánované odstávky. Současně by bylo možné snížit skladové zásoby, a tedy i finance v nich uložené. Jelikož je měření teplot válců již standardní výbavou stroje od výrobce (pro možnost odstavení motoru při dosažení kritických hodnot), spočívá investice na rozšíření vybavení stroje pro prediktivní údržbu pouze v dokoupení komunikačního modulu a připojení do SCADA systému. Toto je investice v nižších desítkách tisíc korun a je tedy velice rentabilní.

### 5.4.2 Kvalita oleje

V případě sledování kvality oleje je nutné investici posuzovat ze dvou hlavních pohledů. Jedním z nich je možná úspora nákladů na pravidelný servis a s ním spojené náklady na pořizování oleje a servisu. Druhý pohled je spíše dlouhodobého charakteru a spočívá v prodloužení celkové životnosti stroje a minimalizace nákladů na opravy díky provozování stroje pouze s olejem v předepsané kvalitě.

Úspory na pravidelném servisu je možné relativně snadno vyčíslit. Je nutné znát cenu oleje a jeho množství a cenu servisního úkonu. V tomto případě je využíván olej Mobil Pegasus 705. Jeho cena se odvíjí od odebraného množství, ale vzhledem k potřebnému množství jsou nejvýhodnější barely o objemu 208L.

Aby bylo možné vyčíslit možnou úsporu na oleji, je potřeba vypočítat průměrnou životnost. Dle sledovaných hodnot trvá průměrně 18 dnů provozu, než olej degraduje na spodní hranici 660 TDN.

Cena jednoho barelu o objemu 208L byla v době analýzy 22 900 Kč a jeden litr tedy stojí 110 Kč. [31]

Při jedné výměně oleje je nutná výměna 400L oleje a s cenou 110Kč za litr je náklad na jednu výměnu (pouze za olej) 44 tisíc korun. Jedná se tedy o významnou položku nákladů na provoz stroje.

Nyní je možné jednoduše napočítat náklady na olej na jeden den provozu. Jak je výše uvedeno, průměrně trvá 18 dní provozu, než olej degraduje. Náklad na olej na jeden den provozu je tedy 2 444 Kč podle vzorce níže.

$$\text{Náklady na olej za jeden den provozu} = \frac{44\,000}{18} = 2444 \text{ Kč}$$

*Vzorec č. 1 Výpočet nákladů na olej*

Dle naměřených hodnot je možné určit, že byl průměrný pokles 16 TDN za jeden den provozu. Se znalostí této hodnoty je možné vypočítat reálné náklady oproti ideálnímu servisnímu intervalu. Tato data jsou zobrazena v tabulce č. 6.

Výměna č.	Termín výměny oleje	Hodnota TDM při výměně	Rozdíl oproti doporučené dolní hranici TDN	Počet dní před/po ideálním intervalu výměny	Náklady oproti ideálnímu servisnímu intervalu
1	30.06.2023	542,45	-117,55	7	-17 108,00 Kč
2	25.07.2023	507,48	-152,52	10	-4 440,00 Kč
3	19.08.2023	623,18	-36,82	2	-4 888,00 Kč
4	12.09.2023	629,06	-30,94	2	-4 888,00 Kč
5	06.10.2023	638,87	-21,13	1	-2 444,00 Kč
6	31.10.2023	621,22	-38,78	2	-4 888,00 Kč
7	25.11.2023	753,21	93,21	-6	14 664,00 Kč
8	19.12.2023	627,71	-32,29	2	-4 888,00 Kč
9	12.01.2024	564,96	-95,04	6	-14 664,00 Kč
10	06.02.2024	583,36	-76,64	5	-12 220,00 Kč
11	01.03.2024	555,03	-104,97	7	-17 108,00 Kč

Tabulka č. 6 Výpočet rozdílu nákladů na olej

Z tabulky je zřejmé, že za sledované období došlo k pouze jedné předčasné výměně. Olej mohl být využíván ještě dalších šest provozních dní, a tím tedy vznikl provozovateli na oleji vícenáklad 14 664 Kč.

Ostatní výměny byly provedeny až po ideálním intervalu výměny. Z tohoto důvodu jsou v tabulce uvedeny záporné hodnoty nákladů, tedy úspory. Toto však není z hlediska dlouhodobého provozování stroje dobře. Tyto úspory jsou na úkor provozování stroje s olejem o neodpovídající kvalitě a mohou vést k vážnému poškození stroje. Toto by posléze vedlo k nákladům výrazně převyšujícím tyto provozní úspory.

Při rozhodování o investici je nutné brát v potaz, že kvalita oleje má klíčový vliv na správné fungování a životnost motoru. Nejedná se tedy pouze o možnou úsporu na servisních úkonech spojených s výměnou oleje, ale především je možné touto investicí zajistit vyšší spolehlivost a celkovou životnost stroje. Vzhledem k tomu, že takto veliký stroj má hodnotu několika milionů korun a náklady na pořízení technologie na sledování kvality oleje se pohybují do 100tis. Kč, je tato investice zcela jistě rentabilní.

## 6 Závěr

Tato diplomová práce potvrzuje význam a účinnost prediktivní údržby v průmyslu na příkladu aplikace diagnostických metod na kogenerační jednotku provozovanou na bioplynové stanici. Během této aplikace byly sledovány a analyzovány vybrané ukazatele ovlivňující funkci kogenerační jednotky.

Jedním z těchto ukazatelů byla teplota válců, pomocí které je možné sledovat správnou funkci zapalovacích svíček. Průběžným monitorováním a vyhodnocováním teplot v čase bylo zjištěno, že blížící se konec životnosti zapalovací svíčky má přímý vliv na teplotu válce. Přibližně ve čtrnáctidenním intervalu bylo možné pozorovat pozvolný pokles teploty, který posléze vedl k odstavení stroje. Tento konkrétní případ ukazuje praktické uplatnění prediktivní údržby v reálném provozu, kdy analýza teploty válců umožňuje minimalizovat náklady spojené s neplánovanými výpadky a opravami a zároveň zvýšit spolehlivost a efektivitu provozu stroje.

Dalším ukazatelem byla analýza kvality oleje. Měření, monitorování a analýza degradace oleje byla provedena za pomoci zavedení čidla, které měří hodnotu TenDelta Number (TDN). U kogenerační jednotky byl olej měněn v souladu s manuálem výrobce. V rámci 11 výměn oleje za určité období bylo na základě hodnoty TDN vyhodnocováno, zda výměna oleje proběhla v optimálním intervalu. Zatímco polovina výměn byla provedena v optimálním čase, druhá polovina výměn byla provedena příliš pozdě a jedna s relativně velkým předstihem. U opožděných výměn bylo zjištěno, že olej měl v době výměny již výrazně nižší kvalitu než je výrobcem doporučena. Toto může mít za následek snížení celkové výkonnosti a životnosti stroje. Na základě provedené analýzy lze konstatovat, že implementace prediktivní údržby na základě diagnostiky teploty oleje může určit ideální servisní interval pro výměnu oleje, čímž lze předejít možným poruchám a zároveň prodloužit životnost stroje.

Výsledkem provedeného ekonomického vyhodnocení, ve kterém byla porovnávána počáteční investice do vybavení, umožňujícího prediktivní údržbu, a možné úspory, které by z investice mohly vyplynout, je doporučení do technologie investovat. Možné úspory v tomto případě výrazně převyšují počáteční náklady a návratnost investice je tedy rychlá.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] VDOLEČEK, František. Technická diagnostika v systémech údržby. *Automa* [online]. 2008, **2008**, 30-32 [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/37313.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/37313.pdf)
- [2] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.
- [3] KRUPA, Miroslav. Technická prognostika v kontextu prediktivní údržby. <https://www.automa.cz/> [online]. 2012 [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: [https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/9344.pdf](https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/9344.pdf)
- [4] MOBLEY, R. Keith. *AN INTRODUCTION TO PREDICTIVE MAINTENANCE*. Second Edition. Elsevier Science, 2002. ISBN 0-7506-7531-4.
- [5] Run-To-Failure (RTF) Maintenance Explained. *Omupkeep* [online]. 2011 [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.upkeep.com/learning/run-to-failure-maintenance/>
- [6] What Is Preventive Maintenance? The Beginner's Guide to Running PMs. *MaintainX* [online]. [2023] [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.getmaintainx.com/blog/what-is-preventative-maintenance/>
- [7] ŠPAČEK, Miroslav. Hodnotové řízení podpůrných procesů údržby a jeho využití v praxi. *ResearchGate* [online]. 2013, **2013** [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: doi:10.18267/j.aop.409
- [8] LEGÁT, DRSC., Prof. Ing. Václav, Doc. Ing. Martin PEXA, PH.D. a Doc. Ing. Zdeněk ALEŠ, PH.D. Zajištěnost údržby v koncepci Průmysl 4.0. In: *Nenalezený vydavatel*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2018. ISBN 978-80-02-02819-2. Dostupné také z: [https://www.csq.cz/fileadmin/user\\_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky\\_spolehlivost/192\\_72sbornik72.pdf](https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky_spolehlivost/192_72sbornik72.pdf)
- [9] ČEDÍK, PH.D., Ing. Jakub a prof. Ing. Martin PEXA, PH.D. Úloha prediktivní údržby ve spolehlivosti. In: *Nenalezený vydavatel*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2022, s. 3-11. ISBN 978-80-02-02999-1. Dostupné také z: [https://www.csq.cz/fileadmin/user\\_upload/Spolkova\\_cinnost/Odborne\\_skupiny/Spolehlivost/OSS\\_sbornik\\_83.pdf](https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Spolkova_cinnost/Odborne_skupiny/Spolehlivost/OSS_sbornik_83.pdf)
- [1] KRUPA, Miroslav. Prediktivní údržba a metody technické prognostiky – seznámení se s problematikou. *Seznámení se s problematikou | BOZPinfo.cz* [online]. 2012 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/prediktivni-udrzba-metody-technicke-prognostiky-seznameni-se-s-problematikou>
- [1] KWON, D., M.R HODKIEWICZ, J. FAN, T. SHIBUTANI a M.G. PECHT. IoT-Based Prognostics and Systems Health Management for Industrial Applications. *ResearchGate* [online]. 2016, **2016** [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2016.2587754
- [1] Laborař plamenové atomové absorpční spektrometrie (FAAS). *Nenalezený vydavatel* [online]. [2023] [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geologie/laboratore/laboratore-a-metody/laborator-plamenove-atomove-absorpcni-spektrometrie-faas>
- [1] *Rentgenová fluorescence (XRF)* [online]. [2023] [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://erca.cz/rentgenova-fluorescence-xrf>

- [1] Ultrazvuk jako klíčová součást prediktivní údržby. *Vše o průmyslu* [online]. [2021] 4] [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.vseoprurnyslu.cz/udrzba-a-diagnostika/elektrotechnika-elektronika-a-energetika/ultrazvuk-jako-klicova-soucast-prediktivni-udrzby.html>
- [1] KOŘOUSKOVÁ, Barbora. Internet věcí (IoT): definice, příklady využití, produkty. 5] *Rascasone* [online]. [2023] [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.rascasone.com/cs/blog/iot-internet-veci-definice-produkty-historie>
- [1] KAŇOVSKÁ, PH.D., doc. Ing. Lucie. Smart technologie pro prediktivní údržbu. 6] *Www.mmspektrum.com* [online]. 2019 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/smart-technologie-pro-prediktivni-udrzbu>
- [1] Co je to predictive maintenance (prediktivní údržba)? *SAP* [online]. [2023] [cit. 2024-7] 03-12]. Dostupné z: <https://www.sap.com/cz/products/scm/apm/what-is-predictive-maintenance.html>
- [1] Hluboké učení strojové vidění = kontrola kvality nové generace. *Vše o průmyslu* 8] [online]. 2019 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.vseoprurnyslu.cz/inspirace/firemni-novinky/hlubo-ke-uceni-strojove-videni-kontrola-kvality-nove-generace.html>
- [1] Co je hluboké učení? *Microsoft Azure* [online]. [2023] [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: 9] <https://azure.microsoft.com/cs-cz/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-deep-learning>
- [2] Digitální podnik pro výrobní průmysl. *Siemens Česká republika* [online]. 2024 [cit. 0] 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/cz/cs/reseni/digitalni-podnik/discrete-industry.html>
- [2] Digitální dvojče Siemens a jeho výhody v praxi. *Vše o průmyslu* [online]. [2021] [cit. 1] 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.vseoprurnyslu.cz/inspirace/nazory-a-komentare/siemens-digitalni-dvojce-a-jeho-vyhody-v-praxi.html>
- [2] Innovations in digital twin research. *Nenalezený vydavatel* [online]. [cit. 2024-02-17]. 2] Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/d42473-021-00325-x>
- [2] RACH, Jiří. Prediktivní údržba se vyplácí. *Www.mmspektrum.com* [online]. 2021 [cit. 3] 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prediktivni-udrzba-se-vyplaci>
- [2] Predictive maintenance Deloitte's approach. *Https://www2.deloitte.com/* [online]. 4] 2022 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/process-and-operations/us-predictive-maintenance.pdf>
- [2] PAPEŽ, Karel. Jak fungují bioplynové stanice. *EnviWeb.cz* [online]. [2015] [cit. 2024-5] 02-18]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/103210>
- [2] Jak funguje kogenerační jednotka. *ČEZ Energo* [online]. [2023] [cit. 2024-02-18]. 6] Dostupné z: <http://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/jak-funguje-kogeneracni-jednotka>
- [2] Gas Generator Sets CG170-12 K. *Https://www.cat.com/en\_MX/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/15969838.html* [online]. [2024] [cit. 2024-7] 03-09]. Dostupné z: [https://www.cat.com/en\\_MX/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/15969838.html](https://www.cat.com/en_MX/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/15969838.html)

- [2] KOGENERACE KOMBINOVANÁ VÝROBA TEPLA A ELEKTRICKÉ ENERGIE.  
8] <https://www.zeppelin.cz/> [online]. [2021] [cit. 2024-03-23]. Dostupné z:  
<https://www.zeppelin.cz/fileadmin/cs/downloads/kogenerace-brozura-2021.pdf>
- [2] Oil condition monitoring & management systems. *Tandeltasystems.com* [online]. 2015  
9] [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.tandeltasystems.com/wp-content/uploads/2015/11/Tan-Delta-Brochure-26.10.15.pdf>
- [3] OQsx-G2. *Tan Delta Systems PLC* [online]. [2023] [cit. 2024-03-16]. Dostupné z:  
0] <https://www.tandeltasystems.com/products/oqsx-g2/>
- [3] Mobil Pegasus 705 208L MOBIL 15001204. *Svět olejí* [online]. [2024] [cit. 2024-03-  
1] 24]. Dostupné z: [https://www.svet-oleju.cz/cs/katalog/detail-zbozi/mobil-pegasus-705-208l/mobil/15001204/587/?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwnv-vBhBdEiwABCYQA5WXzbL3Wvhk52Axb5l6XFHfXDKPZCCsejHGZGvuUuC327AqI7RbnRoC16kQAvD\\_BwE](https://www.svet-oleju.cz/cs/katalog/detail-zbozi/mobil-pegasus-705-208l/mobil/15001204/587/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwnv-vBhBdEiwABCYQA5WXzbL3Wvhk52Axb5l6XFHfXDKPZCCsejHGZGvuUuC327AqI7RbnRoC16kQAvD_BwE)
- [3] Energetika zblízka. *Svět energie.cz* [online]. [2020] [cit. 2024-02-18]. Dostupné z:  
2] <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/bioplynova-stanice/vyklad>



## 7 Přílohy

Příloha 1: Ukázka naměřených hodnot – teploty válců

Date	Spalovací prostor A1 (°C)	Spalovací prostor A2 (°C)	Spalovací prostor A3 (°C)	Spalovací prostor A4 (°C)	Spalovací prostor A5 (°C)	Spalovací prostor A6 (°C)	Spalovací prostor B1 (°C)	Spalovací prostor B2 (°C)	Spalovací prostor B3 (°C)	Spalovací prostor B4 (°C)	Spalovací prostor B5 (°C)	Spalovací prostor B6 (°C)
08.01. 23:40:00	366	373	383	373	380	371	375	372	378	379	386	385
08.01. 23:45:00	366	373	383	373	380	371	375	372	378	379	386	385
08.01. 23:50:00	373	365	368	383	378	381	389	375	378	385	387	376
08.01. 23:55:00	373	365	368	383	378	381	389	375	378	385	387	376
09.01. 00:00:00	379	372	378	375	381	392	371	390	382	392	384	382
09.01. 00:05:00	379	372	378	375	381	392	371	390	382	392	384	382
09.01. 00:10:00	378	386	387	394	386	379	378	376	382	384	391	382
09.01. 00:15:00	378	386	387	394	386	379	378	376	382	384	391	382
09.01. 00:20:00	383	390	376	380	379	382	375	381	382	377	387	377
09.01. 00:25:00	383	390	376	380	379	382	375	381	382	377	387	377
09.01. 00:30:00	383	383	376	386	378	383	396	383	383	373	378	378
09.01. 00:35:00	383	383	376	386	378	383	396	383	383	373	378	378
09.01. 00:40:00	380	384	375	367	383	366	384	381	383	376	375	381
09.01. 00:45:00	380	384	375	367	383	366	384	381	383	376	375	381
09.01. 00:50:00	381	376	382	375	374	373	378	378	376	382	388	377
09.01. 00:55:00	381	376	382	375	374	373	378	378	376	382	388	377
09.01. 01:00:00	375	383	384	391	380	364	378	372	380	384	378	387
09.01. 01:05:00	375	383	384	391	380	364	378	372	380	384	378	387
09.01. 01:10:00	379	378	379	391	376	383	377	377	378	380	374	384
09.01. 01:15:00	379	378	379	391	376	383	377	377	378	380	374	384
09.01. 01:20:00	380	381	379	379	382	370	381	376	376	373	368	374
09.01. 01:25:00	380	381	379	379	382	370	381	376	376	373	368	374
09.01. 01:30:00	384	382	383	391	377	375	381	384	379	381	386	376
09.01. 01:35:00	384	382	383	391	377	375	381	384	379	381	386	376
09.01. 01:40:00	380	378	389	385	381	392	380	383	378	389	372	390
09.01. 01:45:00	380	378	389	385	381	392	380	383	378	389	372	390
09.01. 01:50:00	397	388	389	388	382	379	383	383	380	384	385	376
09.01. 01:55:00	397	388	389	388	382	379	383	383	380	384	385	376
09.01. 02:00:00	383	377	389	377	387	380	389	377	383	378	367	382
09.01. 02:05:00	383	377	389	377	387	380	389	377	383	378	367	382
09.01. 02:10:00	380	375	380	372	376	374	372	378	371	372	371	377
09.01. 02:15:00	380	375	380	372	376	374	372	378	371	372	371	377
09.01. 02:20:00	390	381	389	391	385	388	390	392	377	384	381	386
09.01. 02:25:00	390	381	389	391	385	388	390	392	377	384	381	386
09.01. 02:30:00	376	371	378	374	379	384	384	376	380	379	381	386
09.01. 02:35:00	376	371	378	374	379	384	384	376	380	379	381	386
09.01. 02:40:00	378	382	375	368	375	376	376	374	374	374	378	374
09.01. 02:45:00	378	382	375	368	375	376	376	374	374	374	378	374
09.01. 02:50:00	379	384	390	377	380	382	378	379	382	379	380	381

Příloha 2: Ukázka naměřených hodnot – kvalita a teplota oleje

Date	Kvalita oleje/Teplota oleje (°C)	Kvalita oleje/TDN - TanDelta Number
06.06.2023	93,08	950,2
07.06.2023	92,88	930,59
08.06.2023	92,88	918,82
09.06.2023	93,27	883,53
10.06.2023	93,66	867,84
11.06.2023	92,88	838,42
12.06.2023	93,08	797,24
13.06.2023	93,66	787,44
14.06.2023	93,27	746,26
15.06.2023	92,88	707,17
16.06.2023	94,06	713,05
17.06.2023	92,88	677,75
18.06.2023	93,27	642,46
19.06.2023	93,66	660,11
20.06.2023	93,66	622,85
21.06.2023	93,66	644,42
22.06.2023	93,08	622,85
23.06.2023	92,29	595,39
24.06.2023	93,08	565,98
25.06.2023	93,08	595,39
26.06.2023	90,11	560,1
27.06.2023	93,63	546,37
28.06.2023	92,85	579,71
29.06.2023	92,85	542,45
30.06.2023	93,05	930,72
01.07.2023	93,44	919,29
02.07.2023	93,24	891,84
03.07.2023	93,05	864,39
04.07.2023	93,83	850,66
05.07.2023	93,44	817,32
06.07.2023	93,44	807,52
07.07.2023	94,03	764,38
08.07.2023	93,63	721,24
09.07.2023	93,63	729,08
10.07.2023	93,44	685,94
11.07.2023	92,85	689,86
12.07.2023	93,24	652,6
13.07.2023	93,24	613,38
14.07.2023	93,05	632,99
15.07.2023	92,85	593,77
16.07.2023	93,24	566,32
17.07.2023	92,85	589,85