



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

Proaktív felügyeleti és karbantartási módszerek támogatása kiberfizikai rendszerekkel

TDK DOLGOZAT

Készítette

Frankó Attila Ernő

Konzulens

Dr. Varga Pál

Moldován István

2016. október 28.

Tartalomjegyzék

Kivonat	3
Abstract	4
Bevezető	5
1. Proaktív karbantartás – múlt, jelen és jövő	6
1.1. Paradigmaváltozások a karbantartási és fenntarthatósági szemléletben	6
1.1.1. A proaktív szemléletmód és stratégia	6
1.1.2. Preventív karbantartás	7
1.1.3. Prediktív karbantartás	7
1.2. A proaktív karbantartás megvalósításának kihívásai	7
1.2.1. A pozitív szemlélet térnyerése, a fejlesztések megindulása	7
1.2.2. A megvalósíthatóság technológia feltételei	9
1.2.3. Az együttműködés szerepe a karbantartásban	10
1.2.4. Távlati célkitűzések – a szemléletváltás előnyei	10
1.2.5. Megvalósítási törekvések kulcs technológiái	10
2. Prediktív diagnosztikai és prognosztikai eljárások	13
2.1. RCA - Root Cause Analysis	13
2.1.1. RCA algoritmusok	13
2.1.2. A Petri-hálók diagnosztikai alkalmazása	15
2.2. Prognosztikai eljárások	16
2.2.1. RUL - Remaining Useful Life	16
2.2.2. Prognosztikai modellek	18
2.3. Túlélési és elhasználódási modellek	19
2.3.1. Kumulált kockázati ráta	19
2.3.2. Cox-regresszió	20
3. Stratégiák megalkotása a proaktív karbantartáshoz	22
3.1. A lehetőségek felmérése – Kiindulási helyzet	22
3.1.1. Együttműködés ipari résztvevőkkel	22
3.1.2. Korábbi gyűjtött adatok felhasználhatósága	22
3.1.3. Paramétermérésekkel kapcsolatos alapvetések	23

3.2.	A mérendő mennyiségek meghatározása	24
3.2.1.	A rendelkezésre álló információk összegzése	24
3.2.2.	További mérendő mennyiségek felvétele	25
3.2.3.	Modellalkotáshoz szükséges mérések	27
4.	Hardverfejlesztés és megvalósítás	29
4.1.	Validációs mérések	29
4.1.1.	Hardver összeállítás	29
4.1.2.	Vibrációs mérés és az eredmények	31
4.1.3.	További fejlesztések	34
5.	Összefoglalás	35
	Köszönetnyilvánítás	36
	Irodalomjegyzék	38
	Függelék	39
F.1.	A gyakorlati megvalósítás Petri-hálója	39

Kivonat

A nagyüzemi termelésben mindig is kritikus volt bizonyos – a gyártás, termelés gerincét alkotó – eszközök és azok alkatrészeinek elhasználódása. Ezek kiesése a munkafolyamatból a meghibásodás és az ezt követő felújítás, karbantartás miatt jelentős bevételkiesést okozhat, így időszerűvé vált, hogy ezeket a problémákat kezeljük. E célból kapnak egyre nagyobb hangsúlyt a megelőző karbantartások, melyeket úgy ütemeznek, hogy a lehető legkisebb mértékben befolyásolják a munkafolyamat menetét.

Annak érdekében, hogy a fenti cél megvalósítható legyen, hozták létre az úgynevezett proaktív karbantartás jelenti, melynek alapja hogy kiberfizikai rendszerek nagymennyiségű szenzoradatot gyűjtenek - melyek alkalmasak az eszközök, alkatrészek elhasználódásának reprezentálására, majd azokat feldolgozzák. A feldolgozott adatokból és egyéb forrásokból (például eszköz adatbázisok) a rendszer következtet az elhasználódás mértékére és ez alapján megelőző karbantartást javasolhat.

Abstract

Industrial equipment wears out in much less time than our ones in home that are used in our daily life, due to the bigger and more diverse strain. If these tools are out of order, it can cause loss in the production. That's why the manufacturers and the users of the equipment place great emphasis on the prevention of the failures and decrease renewal costs. The most efficient and obvious strategy to reach this goal is to do the necessary maintenances and renewals before it leads to failure.

The philosophy of proactive maintenance offers a solution for this task. Proactivity has two essential parts, predictive maintenance and preventive maintenance. We can predict the duration of the safe usability by means of monitoring the environment and the mechanical parts and using an equipment database. By using these predictions, preemptive maintenances could be scheduled.

However, making a good prediction is not easy; we need a huge amount of data, which describes certain parameters of the mechanical parts. After processing the data, the wear-out of these parts could be analyzed and characterized. To gather data, we need a lot of sensors with great diversity, moreover, we need to read out the values of sensors, process and analyze them. Using cyber-physical systems could be a complex solution to cover these tasks.

MANTIS is a project supported by an international consortium of the European Union. The main objective is to develop a cyber-physical system based proactive maintenance service platform architecture enabling collaborative maintenance ecosystems. The key technologies are: to define the overall service platform architecture; to develop the next generation framework for highly distributed sensing to conceive a distributed machine learning for data validation and decision-making; provide intuitive, context aware human-machine interface. It can be used in a wide range of industries, since it does not only gathers and processes data, but also uses the information to make forecasts, suggestions and collaborate with other systems.

In this paper, I show my design and implementation of a basic cyber-physical system, that uses proactive maintenance methods; meanwhile I follow the main objectives of the MANTIS project. In the planning phase I present how I chose the right sensors and hardware, what requirements were taken into account in what priorities. After that, I present the board, and show its functions. Finally, I provide some measurement results with the physically available board, then analyze the results, and show if it is able to represent the wear-out of certain equipment.

Bevezető

Az ipari eszközök sokkal nagyobb és változatosabb fizikai igénybevételnek vannak kitéve, mint a mindennapi eszközeink - és használatból való kiesésük is nagyobb kárt okozhat a termelésben. Emiatt az ipari eszközök gyártói és használói egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek arra, hogy az esetleges eszköz-meghibásodásokból és azok felújításából adódó közvetlen és járulékos költségeket minimalizálni tudják. A leghatékonyabb és legkézenfekvőbb stratégia, hogy a szükséges karbantartást illetve felújítást még az előtt elvégezzük, hogy az meghibásodáshoz vezetne.

Erre a feladatra kínál megoldást a proaktív felügyelet és karbantartás. A proaktivitás alapvetően két szegmensből tevődik össze: predikció és megelőzés, de ezek szorosan össze is fonódnak. Az alkatrészek és alkotóelemek korábbi vizsgálatán és valós idejű megfigyelésén, illetve egy eszköz adatbázis és az eszköz felhasználási környezetének adottságai alapján igen jól becsülhető az elhasználódás időpontja, avagy a biztonságos használhatóság időtartama. Ezen adatok ismeretében pedig megelőző jellegű karbantartásokat és alkatrész-cseréket lehet beütemezni.

A megfelelő pontosságú predikcióhoz azonban nagy adathalmazra van szükség. Ezek az adatok adott típusú eszközök alkatrészeinek bizonyos paramétereit írják le. Az adathalmaz feldolgozása után könnyen vizsgálható és jellemezhető az alkatrészek elhasználódása. Ezen adatok gyűjtéséhez nagy mennyiségű és diverzitású szenzorok szükségeltetnek. A mérési eredmények felhasználásához ki kell olvasni a szenzorok tartalmát, illetve a kapott értékeket feldolgozni, elemezni kell. Ennek megoldására is szolgálnak az úgynevezett kiberfizikai rendszerek, melyek elvégzik a szenzorok kezelését illetve a kapott adatok feldolgozását és elemzését.

A proaktív karbantartással kapcsolatos aktuális kutatások fő célkitűzése egy kiberfizikai platform alapú, együttműködő, proaktív felügyeleti és karbantartási rendszer kidolgozása. Ennek a komplex rendszernek a megvalósításához szükséges egy átfogó szolgáltatás-platform architektúra definiálása, új-generációs keretrendszer kidolgozása, kollaboratív felügyeleti és döntéshozatali rendszer tervezése és egy intuitív kontextus-érzékeny ember-gép interakció kialakítása. A fenti célt olyan formában kell megvalósítani, hogy a proaktív karbantartási és felügyeleti módszerek egy strukturált keretrendszerbe tömörüljenek melyet az ipar számos területén alkalmazni lehetne.

A végső célkitűzés: villástargoncák proaktív karbantartásának, menedzsmentjének megvalósítása. A továbbiakban az előbbi célt szem előtt tartva, a proaktív karbantartást és az ehhez köthető fejlesztéseket ismertetem. Majd a kapcsolódó diagnosztikai és prognosztikai eljárások alkalmazásával fogok mérési stratégiákat felállítani. Ezek a stratégiák nyújtják az alapot a proaktív karbantartás magját képező elhasználódási modell paramétereinek meghatározásához. Végül, pedig szó lesz egy tesztmérésről, illetve arról a mérőeszközzel amit a későbbiek során felhasználunk ipari környezetben, villástargoncák proaktív karbantartásánál.

1. fejezet

Proaktív karbantartás – múlt, jelen és jövő

1.1. Paradigmaváltozások a karbantartási és fenntarthatósági szemléletben

A proaktív karbantartás és az alább taglalt diagnosztikai és prognosztikai eljárások nem újkeletűek de, az ezekkel kapcsolatos komolyabb kutatások és fejlesztések az elmúlt években indultak. A legfőbb oka annak, hogy ezek az eljárások és szemléletmódok eddig a perifériára kényszerültek, hogy:

- Egyfelől hiányzott a megfelelő technológiai háttér a megvalósításhoz – vagy az effektív gyakorlati felhasználáshoz
- Másrészt azokon a helyeken, ahol a műszaki gyakorlatban ténylegesen is alkalmazhatóak lettek volna, egyszerűen nem tartottak ezekre igényt, ugyanis nem járt a használatuk számottevő előnnyel – az előző pont miatt

Az elmúlt években tapasztalható fejlődés bizonyos technológiákban, mint például a Big Data, szenzorika és az ehhez kapcsolódó CPS¹-ek, cloud-rendszerek és az ezekhez sorosan kapcsolódó Internet of Things területén lehetővé tette, hogy komolyabb fejlesztések és kutatások induljanak a proaktív karbantartás irányába is [1][2][3].

1.1.1. A proaktív szemléletmód és stratégia

A proaktív karbantartási stratégia alap gondolata az eszközök, alkatrészek használhatóságának megőrzésére való törekvés. Annak érdekében, hogy egy eszköz élettartamát megnöveljük, változtatni kellett azon a korábbi – természetesnek nevezhető² – hozzáálláson, hogy elegendő az alkatrészek cseréjét és az eszközök karbantartását elvégezni, egy esetleges meghibásodás után. Adott esetben, ha a kár javíthatatlan, felmerül a kérdés, hogy elkerülhető lett volna-e a meghibásodás, ha korábban elvégezték volna az eszközön vagy alkatrészen a szükséges karbantartásokat. Másrésztől, ha a hiba vagy az eszköz – jelen esetben kifejezetten mechanikai alkatrészek – elhasználódása

¹ Kiberfizikai rendszer

² Ezt a szemlélet módot, mely a hiba bekövetkezte után deríti fel, izolálja és hárítja el a problémát nevezzük *reactive maintenance*-nek.

olyan jellegű, egy fel nem derített vagy észlelt, de nem javított hiba további károkat okozhat a többi alkatrészben, más eszközökben vagy akár a munkakörnyezetben is. Emellett fontos szempont, hogy jelentős anyagi kárt illetve bevétel-csökkenést okozhat a termelésből, gyártásból kiesett eszközök hiánya és azok pótlása. Annak érdekében, hogy az ilyen jellegű végzetes meghibásodások számát csökkenteni lehessen, definiálták a proaktív karbantartást, mint szemléletmódot [11].

A probléma – megfogalmazásából adódóan – két jól elhatárolható területet foglal magába. Először is az eszköz élettartamának meghosszabbítása érdekében szükséges megelőző karbantartásokat végezni, melyekkel az esetleges jövőbeli problémák megelőzhetőek. Másodszor, hogy ezeket a karbantartásokat elvégezhessük, tudnunk kell, hogy azokat mikorra ütemezzük, lehetőleg még bőven azelőtt, hogy az elhasználódás mértéke kritikussá válna. Ennek eléréséhez a proaktív karbantartás felhasznál és egyesít más korábbi karbantartási technikákat, nevezetesen a preventív és prediktív karbantartást.

1.1.2. Preventív karbantartás

Preventív karbantartás alatt értjük a megelőző karbantartásokat és az ehhez tartozó szemléletmódot, amelyek célja egy esetleges meghibásodást elkerülni. Korábban számos próbálkozás volt a preventív karbantartási módszerek alkalmazására, de az esetek többségében nem volt gazdaságos az üzemeltetése, a megfelelő technológiai színvonal hiányában[11].³ Korábban szinte kizárólag olyan matematikai modelleket használtak fel, amelyben a környezeti tényezőket nem vették figyelembe, így prediktív karbantartás megjelenésével egyre inkább háttérbe szorult.

1.1.3. Prediktív karbantartás

A prediktív karbantartás mint szemléletmód változásokon ment át az elmúlt két évtizedben. Korábban, mint önálló stratégiát kezelték majd, mint a proaktív karbantartást segítő ügynevezett második védelmi vonalat. Napjainkban egyre inkább úgy tekintik, hogy a proaktivitás gerincét alkotja a preventív karbantartással együtt, annak ellenére, hogy korábban többnyire kizárólag vagy az egyiket vagy a másikat valósították meg[16]. A prediktív karbantartási stratégiák megjelenésekor az előrejelzéseket a maihoz hasonló mérések alapján – *condition monitoring* – végezték. Ezek az előrejelzések igen rövid intervallumot fedtek le, csak pár nappal vagy akár órával a hiba lehetséges bekövetkezése előtt tudták azt jelezni, emiatt – a preventív karbantartással együtt – jelentős kritikákkal illeték, többek között a proaktív karbantartást megfogalmazó Fitch is.

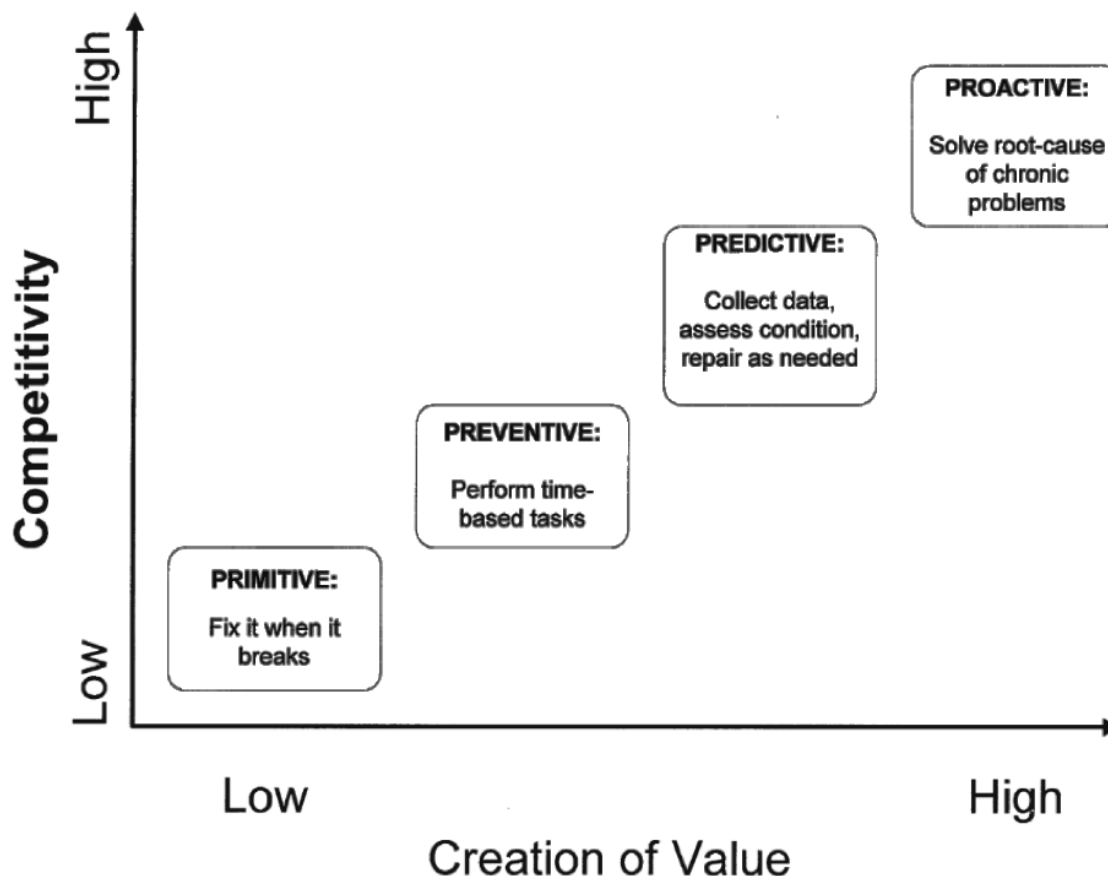
1.2. A proaktív karbantartás megvalósításának kihívásai

1.2.1. A pozitív szemlélet térnyerése, a fejlesztések megindulása

Az utóbbi két karbantartási stratégia esetén az alapvető szemléletmódot már az 1960-as évek környékén megfogalmazták, de a technológiai fejlődés csak az 1990-es években biztosított lehetőséget az ipari körülmények között történő felhasználásra – kevés sikerrel. Egészen az elmúlt évekig

³Születtek olyan jelentések, miszerint az eszközökön megelőző jellegű felújítást végeztek, de mint kiderült az eszközök legalább 60%-ának erre nem volt szüksége

konkurens stratégiáknak tekintették ezeket a karbantartási paradigmákat, bár a proaktív szemléletmód már megalkotása pillanatában is egyfajta hibrid megoldás volt, mégis élesen szembement mind a preventív mind a prediktív szemlélettel. Ennek oka abban rejlik, hogy a proaktivitás már a kezdetektől fogva egy pozitív szemléletmódot képviselt, ellentétben a többi stratégiával, tehát míg a proaktivitás célja a hasznos élettartam növelése volt, a korábbiaknak inkább a meghibásodás elhárítása. Fitch a proaktív karbantartás esetében a *machine wellness*, míg a preventív esetben a *machine sickness* szókapcsolat használatával kívánta érzékeltetni az alapvető szemléletmódbeli különbséget.



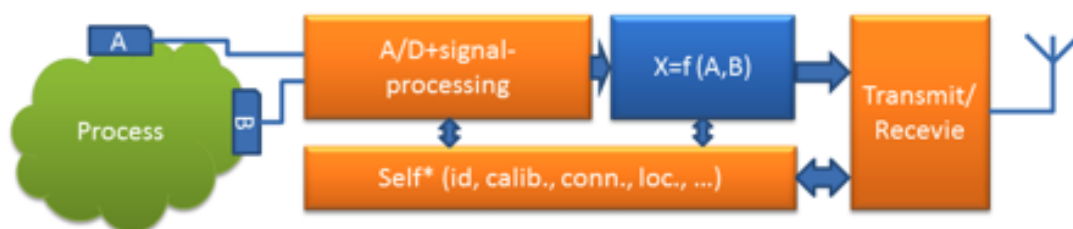
1.1. ábra. Különböző karbantartási stratégiák, a hatékonyság és a komplexitás függvényében [4]

A változást az ezt megelőző néhány év technológiai fejlődése hozta el, amelyek lehetővé tették a proaktív karbantartás hatékony felhasználását a műszaki gyakorlatban, ezzel elvégezve a prediktív és preventív karbantartások integrációját a proaktív szemlélet módba. A proaktív karbantartást már akkor is hatékonynak találták – többek közt orvosi műszerek meghibásodásának csökkentésében –, amikor a széleskörben elfogadott álláspont az volt, hogy annak szerepe kimerül a monitorozásban és a hiba fellépése utáni hibahelyi analízisben, és nem tartalmazott semmilyen szintű beavatkozó mechanizmust [12]. Az 1.1-es ábrán jól látható, hogy a proaktív karbantartás a többi mechanizmusnál jóval hatékonyabb, de ahhoz, hogy megfelelően működjön több feltételnek is teljesülnie kell – úgy, mint a már említett megfelelő technológiai színvonal, szaktudás az eredményes használathoz és természetesen elegendő tőke a fejlesztések megvalósításához.

Az elmúlt évek során jelentősen megnőtt a proaktív karbantartással kapcsolatos kutatások és ezen túlmenően a fejlesztések száma. Miután egyre világosabbá válik, hogy egy olyan karbantartási szemléletmódról van szó, amely széleskörű ipari felhasználás esetén jelentősen javítaná az eszközök és alkatrészek hasznos élettartamát, így több olyan projekt is létrejött az utóbbi időben melynek célja a proaktív karbantartás alkalmazása és az ehhez szükséges technológiai feltételek megteremtése. Általánosan elmondható, hogy ezeknek a fejlesztéseknek a célkitűzése egy proaktív karbantartást nyújtó platform architektúra létrehozása melynek alapját kiberfizikai rendszerek – azaz a szenzoros adatgyűjtés és feldolgozás – szolgáltatják. Manapság több nagyszabású projekt fut, melyek a proaktív karbantartási technológiával kapcsolatos kutatásokat és fejlesztéseket végzik, többek között az ECSEL MANTIS projektje.⁴

1.2.2. A megvalósíthatóság technológia feltételei

Ahhoz, hogy a fenti cékitűzés megvalósítható legyen, számos, alapvető kihívással kell szembenéznünk. Elsőként szükséges, hogy a fizikai rendszereket (úgy mint: ipari eszközök és alkatrészek, járművek, megújuló energiaforrások) és működési környezetüket folyamatosan megfigyeljük, nagyszámú-, és diverzitású intelligens szenzorokkal, amelyek a lehető legtöbb – mind fajtájú, mind szárosságú – adatot gyűjtik a rendszerek előéletéről, működési paramétereiről, helyzetéről, mozgásáról és egyéb fizikai tulajdonságaikról. Másrészt, ezek a rendszerek egy nagyobb heterogén, együttműködő hálózathoz (például járműflotta vagy szélerőmű park)⁵ legyenek csatlakoztatva valamely robusztus összeköttetéssel, mely megállja a helyét nagyobb kihívást jelentő, zord környezetben is.



1.2. ábra. Érzékelés és előfeldolgozás [4]

Lényeges a kifinomult, elosztott érzékelők és a döntéshozási funkciók különböző szinteken való megvalósítása: a helyi csomópontok, melyek előfeldolgozzák a nyers szenzoradatokat és tömörítik a releváns információkat küldés előtt – ahogy látható a 1.2 ábrán –, hogy így csökkentsék a kommunikációhoz szükséges sávszélességet, a közbülső csomópontokon át, melyek elvégzik az eszköz-specifikus elemzéseket, hogy helylieg optimalizálják a teljesítményét és a karbantartást, egészen a cloud-alapú platformokig melyek egyesítik az egyes ERP⁶, CRM⁷ és CMMS⁸ rendszerek információit és elvégzik az elosztott feldolgozást és az elemző algoritmusokat a teljes döntés-

⁴Nemzetközi konzorcium és az Európai Unió által támogatott nagyszabású projekt, melynek keretein belül végezzük a fejlesztéseket.

⁵A proaktív karbantartás legelső gyakorlati alkalmazását szélerőmű parkokra fejlesztették ki

⁶Vállalatirányítási információs rendszer

⁷Ügyfélkapcsolat-kezelés

⁸Számítógépes karbantartás-menedzsment rendszerek

hozáshoz [4].

1.2.3. Az együttműködés szerepe a karbantartásban

Együttműködő folyamatnak tekinthetünk valamit, ha a folyamat résztvevői megosztják egymással az információt, erőforrásaikat és a felelősséget, a kockázatot és az eredményeket, hogy közösen tervezzék és valósítsák meg, illetve értékeljék a kitűzött feladatokat⁹ egy közös cél eléréséhez. Az együttműködés során a felek kölcsönösen elkötelezik magukat a közös problémamegoldás mellett – nem csak közös problémákra értendő – bizalommal fordulva a másik irányába. A vázolt koncepcióban közös cél a karbantartás optimalizálása illetve, a különböző rendszerek és érintettek akik részt vesznek a karbantartási folyamatokban megosztják egymással az információt, az erőforrásaikat és a felelősséget.

1.2.4. Távlati célkitűzések – a szemléletváltás előnyei

Egy – a fent leírthoz hasonló – együttműködő rendszer képes lesz:

- Csökkenti a karbantartások és felújítások a termelékenységre és a kiadásokra gyakorolt kedvezőtlen hatását
- Növeli az eszközök elérhetőségét
- A karbantartási feladatokhoz szükséges időtartamok csökkentése
- Javítja a karbantartás szolgáltatásainak és az eszköz minőségét
- Növeli a karbantartás teljesítményét és javítja a karbantartók munkafeltételeit
- Növeli a fenntarthatóságot megelőzve az anyagi veszteségeket

A cél egy olyan proaktív karbantartást nyújtó platform architektúra létrehozása mely lehetővé teszi a szolgáltatás alapú üzleti modell használatát és növeli az eszközök elérhetőségét alacsony költségek árán is, az ipari eszközök és folyamatok állandó megfigyelésnek illetve az adatok elemzésének köszönhetően. Mindemellett a törekednünk kell arra, hogy meghatározza és integrálja a különböző forrásokból – mint a gyártók, karbantartók, ipari eszközök gyártóinak és egyéb szolgáltatók – származó kritikus információkat. Ez a szolgáltatás platform architektúra tekintetbe fogja venni az ipar szükségleteit, elsősorban a szolgáltatás alapú vállalatokat és működésüket, legalább annyira, mint a termékeket forgalmazó üzletágakat, így fokozatos és állandó fejlődés érhető el a fenntarthatóságban.

1.2.5. Megvalósítási törekvések kulcs technológiai

A fejlesztés végső célja egy olyan proaktív karbantartást nyújtó szolgáltatás platform architektúra megteremtése, mely képes kiszámítani egy eszköz – avagy rendszer – jövőbeli teljesítményét, hogy megbecsülhessük és megelőzhessük a közelgő meghibásodásokat és beütemezhessünk karbantartásokat és felújításokat. A proaktív szolgáltatást nyújtó platform tartalmazni fogja az elosztott

⁹Program of Activities – PoA



1.3. ábra. A kulcstechnológiák együttműködése és az adatfeldolgozás helyszíne a felvázolt koncepcióban [4]

feldolgozási láncot, amely a nyers adatot feldolgozott információvá alakítja, miközben a lehető legalacsonyabb sávszélességre törekszik. Ahhoz, hogy ez elérhetővé váljon, szükséges egy okos, integrált információs rendszer, fejlett adatmonitorozással, kommunikációval illetve öntanuló analízáló képességgel, amely megbízható és biztonságos. Az említett feldolgozási lánchoz szükséges kulcs technológiák, melyek az 1.3-es ábrán is láthatóak:

- Okos szenzorok és azt működtető rendszerek, kiberfizikai rendszerek melyek képesek az előfeldolgozásra
- Robusztus kommunikációs rendszerek a kihívást jelentő, zord környezetek számára
- Elosztott feldolgozó algoritmusok az adatok validálásához és a döntéshozáshoz
- Felhő alapú feldolgozás, elemzés és adat elérhetőség
- Ember-gép interakció¹⁰ a szükséges információk megfelelő módon történő közléséhez

Az eddig felsorolt eszközök, technológiák, szemléletmódok alapvető részét képezik egy proaktív karbantartást megvalósító komplex rendszernek. Ezen technológiák legtöbbje valamilyen

¹⁰HMI – Human-machine interface

formában már rendelkezésre áll, azonban a hatékony felhasználáshoz, további fejlesztések szükségesek, így a proaktív karbantartással foglalkozó projekt és kutatások szerves részét képezik, az említett technológiákkal kapcsolatos kutatásokban való részvétel, illetve a legújabb innovációk műszaki gyakorlatban való implementálása.

Azonban a megfelelő hardver-platform biztosítása nem elegendő a proaktív karbantartás kiszolgálásához, ugyanis szükségesek bizonyos – a hardveren futó – algoritmusok, melyek a feldolgozást és az adatok kiértékelését végzik, illetve kiszámítják a szükséges karbantartás idejét. Ezek az algoritmusok többnyire a diagnosztika és a prognosztika eszköztárába tartoznak, így ezek szerves részeit fogják képezni a feldolgozási mechanizmusnak. A karbantartási szemlélet legsarkalatosabb kérdését, hogy mennyi hasznos ideje van hátra még egy eszköznek vagy alkatrésznek, azaz mikorra kell ütemezni a karbantartást, az eszközök/alkatrészek elhasználódási modelljével fogjuk megbecsülni.

2. fejezet

Prediktív diagnosztikai és prognosztikai eljárások

2.1. RCA - Root Cause Analysis

A túlélési, avagy elhasználódási modellek alkotásakor nagyban támaszkodunk a prognosztikára. Minél megbízhatóbb egy prognózis, annál realisztikusabb modellt tudunk alkotni, így nagyobb eséllyel tudjuk megelőzni a meghibásodásokat. Azonban a prognózis felállításánál nem elégséges az adott eszköz vagy alkatrész beható ismerete – a gyakorlati tapasztalatok és a gyűjtött adatok felhasználása döntő jelentésű lehet, ezért ilyen esetekben¹, a prognózist túlnyomó részt diagnosztikai eredmények alapján szükséges felállítani. Esetünkben a diagnosztika legfőbb célja az egyes meghibásodások forrásainak meghatározása, ehhez az RCA (*Root Cause Analysis*) eljárást használjuk.

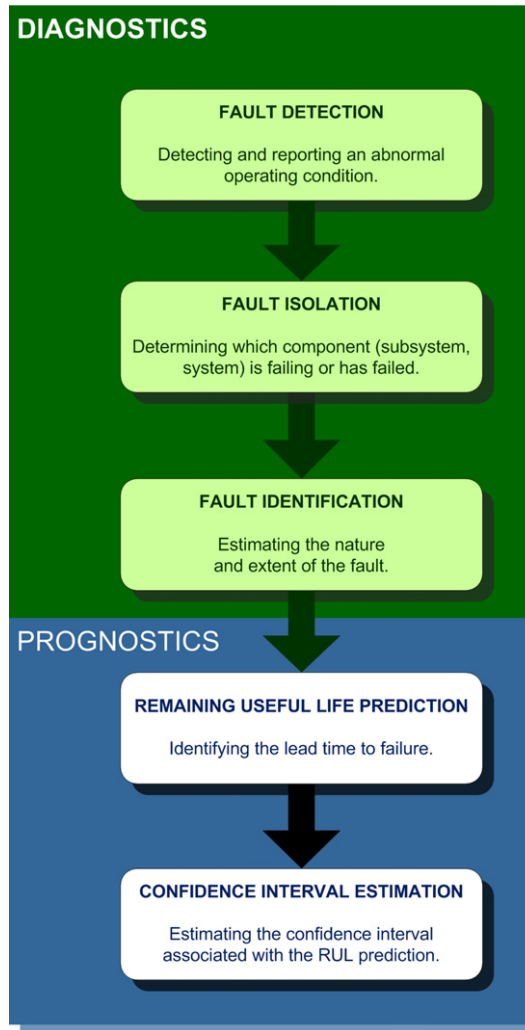
2.1.1. RCA algoritmusok

Az RCA több paramétert is figyelembe vevő komplex algoritmusok, korábbi – gyűjtött – adatok, illetve más, opcionális kiegészítő mérések segítségével képes megállapítani a hiba gyökerét. Gyakorta hibaizolációként hivatkoznak az RCA metódusra, ami bár nem mindig helytálló, a jelen esetet jól fedi, ugyanis az RCA-t annak érdekében használjuk, hogy meghatározzuk az eredeti – hibát kiváltó – abnormális viselkedés helyét.

Számos módszert és algoritmust, esemény korrelációs metódust lehet használni RCA céljából, ezek közül a leggyakoribbak, röviden [15]:

- Modell alapú megközelítés
- Kálmán szűrő
- Fuzzy logika
- Neurális hálózatok
- Bayes-hálók

¹Ahol nagyszámú különböző tényező befolyásolhatja a működést



2.1. ábra. Az alapvető lépések láncolata, a diagnosztikától a prognózisig [10]

- Az események közti korrelációk és a rendszer normális viselkedésének vizsgálata
- Elosztott döntéshozás
- Szabály alapú megközelítés

Jelen esetben az úgynevezett szabály alapú (*rule-based*) megközelítést célszerű alkalmazni, ugyanis könnyen skálázható és a többi módszernél jóval gyorsabb és könnyebben implementálható. A módszer működése bizonyos korrelációs szabályokon alapszik, melyek események közti összefüggéseket határoznak meg, ha ezek közül egy fennáll, az újabb eseményt generál. Ezen összefüggések eredményei az esetek többségében meghatározzák a hiba helyét.

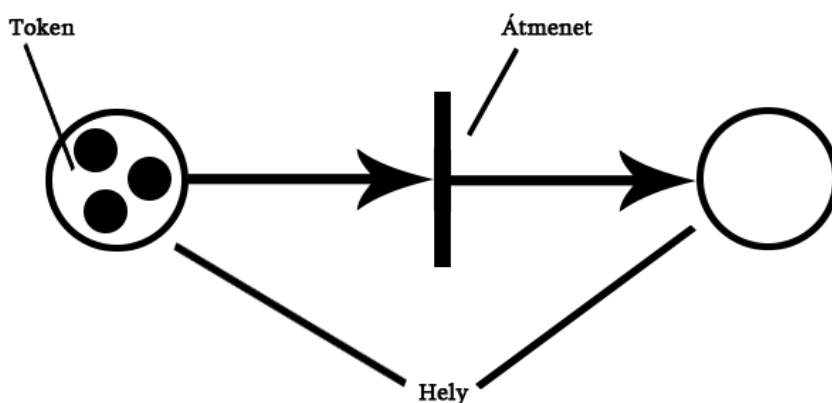
Ebben az RCA mechanizmusban a bejövő riasztásokból indulunk ki, amelyek – felhasználva a korrelációs szabályokat és szűréseket – különböző eseményeket választanak ki, a korrelációk alapján. Az algoritmus lépései tulajdonképpen egy emberi szakértő főlépéseit szimulálják:

- A kulcs paraméterek megállapítása a riasztás alapján
- Elsődleges vizsgálatok, korrelációk és rutinok feltárására

- Függelenségek ellenőrzése, a rutinok és folyamatok egyidejűségének vizsgálata
- Ha egy vizsgálat folyamán valamely eredményre jutottunk, az új információk alapján végignézzük egy új rutint
- Ezeket a lépéseket ismétljük, ameddig a hiba helyet meg nem határozzuk vagy nem végezhető további vizsgálat

A fenti algoritmus hatékony megvalósításához ki kell választani egy megfelelő programozási paradigmát. Ehhez a legalkalmasabb az adatfolyam-vezérelt (*dataflow-driven*) programozás, ahol a programot egy irányított gráfként modellezzük és a csúcsok az egyes műveletek. Ennek implementálásához a legalkalmasabb eszköz a Petri-háló, mivel képes az egy időben lezajló események megjelenítésére [17].

2.1.2. A Petri-hálók diagnosztikai alkalmazása



2.2. ábra. A Petri-hálókat reprezentáló, egyszerű ábra

A Petri-hálóban a csúcsokat két csoportra osztjuk, helyekre és átmenetekre és a két csoportot irányított élek kötik össze – ez látható a 2.3-es ábrán.² Ha az egyes helyekbe futó élek mindegyikén teljesül egy adott feltétel – az úgynevezett tüzelési feltétel, akkor a csúcsból kiinduló élek is tüzelnek, ezeket a reprezentálják az úgynevezett *tokenek*. Ezek alapján a Petri-net könnyen felhasználható az RCA során, ha a riasztásokat – avagy riasztási mintázatokat – tekintjük a helyeknek, amelyeket egy korábban megfigyelt eseménysorozat készített tüzelésre, így a gráf éleinek az egyes vizsgálatok tekinthetők [18]. RCA esetén tokeneket helyezünk a kiinduló csúcsra, jelezvén, hogy a kezdeti feltételek – jelen esetben az, hogy rendelkezünk a megfelelő adatokkal – teljesülnek, így az átmenet tüzelni tud. A fenti ábrán látható, hogy ha a kezdeti átmenet tüzel, akkor az élek által meghatározott vizsgálatokat és elemzéseket kell elvégeznünk és ezeket az adatokat felhasználni

²A projekthez kapcsolódó, Petri-hálót tartalmazó ábra a függelék F.1-es pontjában található.

a következő átmenet bemeneteként. Ez ismételten alkalmazva, a megfelelő paraméterek fennállásának következményeként meghatározható a hiba gyökere. Ez fontos diagnosztikai eredmény, amelyet a prognosztika során felhasználhatunk [14].

2.2. Prognosztikai eljárások

A prognosztika pontos meghatározása nem egyszerű feladat, mivel több különböző definíciót állítottak fel a téma különböző kutatói[8][13][19]. Ezek összevetése alapján megfogalmazhatók a prognosztika főbb tulajdonságai, miszerint:

- A prognózis, a komponensek (*alkatrészek*) jövőbeli működésének megbecslése.
- Optimális esetben magában foglalja a különböző meghibásodási lehetőségeknek az előrejelzését – a komponens hibaforrásának meghatározását.
- Az előzőek alapján a prognosztikát vagy komponens szinten – vagy ha lehet, még alacsonyabb szinten érdemes végrehajtani.
- A prognosztikának kapcsolódnia kell a diagnosztikához.

Ebből következően a prognosztika nem csak becsléseket állít fel, hanem:

- Vizsgálja a karbantartások eredményességét – azaz milyen mértékben képes visszaszorítani bizonyos hiba típusokat.
- Olyan eseményeket felfedezni melyek közvetlenül vezetnek meghibásodáshoz.
- Törekszik feltárni a különböző hibaforrások közti kapcsolatokat – melynek a modellalkotásban nagy szerepe van, hisz a már megismert Cox-regresszió egyik alapfeltevése, hogy a magyarázó változók függetlenek.

2.2.1. RUL - Remaining Useful Life

Egy prognózis két fő részből kell, hogy álljon:

- Egyrészt a meghibásodásig hátralévő időből, vagyis mennyi a még fennmaradó hasznos élettartam, ezt nevezzük RUL-nak (*Remaining Useful Life – hátralévő hasznos élettartam*).
- Illetve egy úgynevezett *kapcsolt konfidencia határérték*ből, amely a RUL bizonytalanságát hivatott leírni.

Mivel a gazdasági, üzleti döntések függhetnek a meghatározott RUL-tól, azonban annak pontossága nem mindig ellenőrizhető (például egy mechanikai sérülés), ezért szükséges egy mérőszám, mely a RUL megbízhatóságáról ad tájékoztatást. A proaktív karbantartással foglalkozó tudományterületeken az egyik célkitűzés, hogy az eddig bemutatott eljárásokat felhasználva, szenzorokból nyert adatok alapján, minél pontosabb becslést lehessen adni a RUL-ra [10].

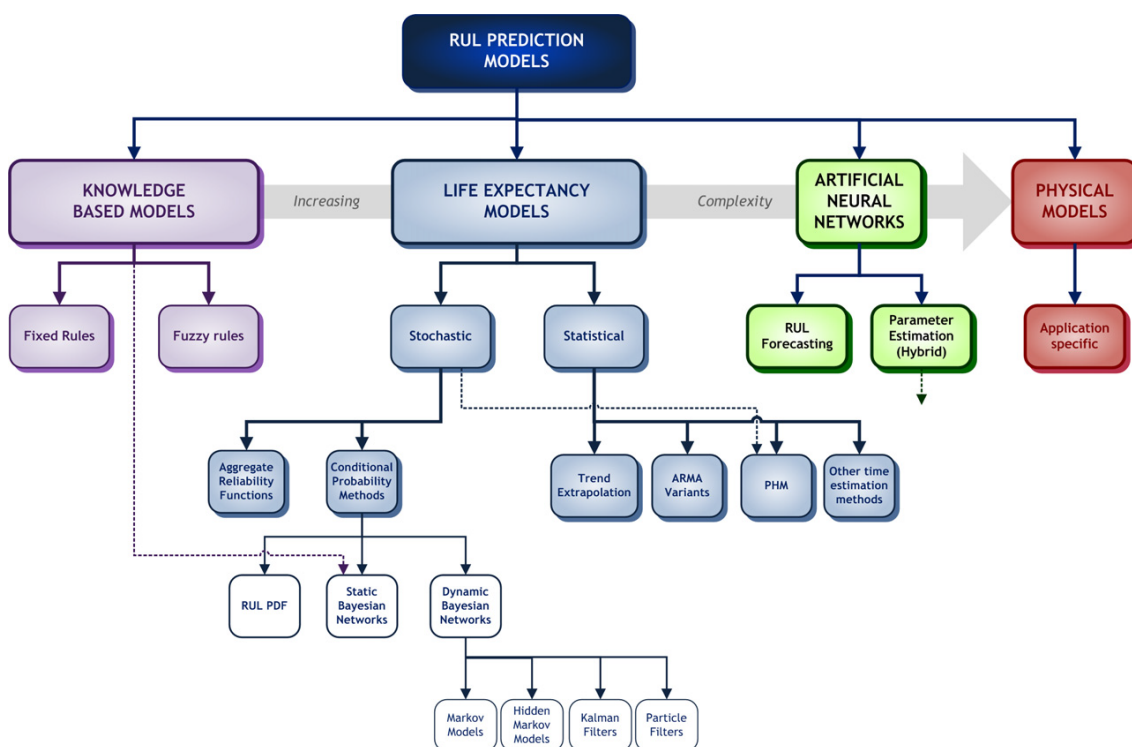
A RUL számításánál fontos szerepet játszik a diagnosztika és az, hogy megfelelően megalapozzuk a prognózist. Ahhoz, hogy megfelelő modellt állítsunk fel, illetve a RUL-ra adott becslésünk

helytálló legyen több alapvető fontosságú – a meghibásodáshoz és a rongálódási folyamathoz szorosan kapcsolódó kérdést meg kell válaszolnunk, jól lehet ezek a kérdések nem egzaktok – hanem eset-specifikusak, így itt nem is térek ki rájuk, csak a 3. fejezetben.

Azonban egy-egy prognózis felállításához szükséges feladatok, pontosabban megközelítések már igen jól körülhatárolhatóak:

- **Az adatok előfeldolgozása**, beleértve a diagnosztikát, elkülöníteni az adott hibatípusokat, megfelelő prognosztikai modell felállítása
- **Létező hibajelenségek vizsgálata**, mely magában foglalja a működésbe lépéstől az egyes meghibásodásig (hiba típusonként) eltelt idő meghatározását, tehát érdemes lehet a RUL visszamenőleges kiszámítása hibatípusonként, ahol az eredő RUL ezek közül a legalacsonyabb érték lesz.
- **Jövőbeli hibák becslése**: számba venni a különböző hibatípusokat és gyakoriság szerint rendszerezni, ebből pedig következtetni, hogy a jövőben melyik hibatípus fog a legtöbbet, illetve a legelőször bekövetkezni. A RUL kiszámítása ebben az esetben bizonytalan, itt tehát ajánlott figyelembe venni a már említett kapcsolt konfidencia határértéket.
- Az úgynevezett **Post-Action** prognózis felállítása; azon lehetséges jövőbeli események figyelembevétele, amelyek befolyásolhatják a RUL-t, akár pozitív, akár negatív irányba.

A prognosztika és diagnosztika kapcsolata illetve a prognózisig vezető lépések az 2.1-es ábrán láthatók.



2.3. ábra. Különböző prognosztikai modellek fája, melyekkel a RUL becsülhető [10]

2.2.2. Prognosztikai modellek

Fontos kihangsúlyozni azt a tényt, hogy az eddig leírtak általánosan vonatkoznak minden prognosztikai folyamatra, de a részfolyamatok már eset-specifikusak, mivel a prognosztika céljai – vagy nevezhetjük akár végtermékeknek – esetenként eltérőek, mint ahogy a rendelkezésre álló adatok mennyisége és jellege is. Éppen ezért a prognosztikai modell kiválasztása előtt meg kell vizsgálnunk az eset gyakorlati tulajdonságait. Ezek közül a legfontosabbak tételesen:

- RUL követelmények vizsgálata: mekkora becslési pontosság szükséges, illetve van-e ez kielégítő adathalmazunk?
- Megfelelő modell kiválasztása: melyik modell írja le megfelelően a modellezni kívánt alakrészt/-rendszert és ezeknek mely paramétereit tudjuk vizsgálni, illetve van-e a modellalkotáshoz megfelelő mennyiségű információnk?³
- A felállított modell valóban jól írja-e le a modellezett rendszer, validálható-, tesztelhető-e?

Ezek ismeretében választhatunk az ismert prognosztika a modellek közül, melyek a 2.3-es ábrán láthatóak. Röviden ezekről:

- Az ún. *Knowledge-based* modellek egy megfigyelt szituáció és egy a korábbi hibákról információt tároló adathalmaz közötti összefüggéseket tárják fel, ezzel megbecsülni a várható élettartamot.
- A *Life expectancy* modellek az egyes diszkrét alkatrészek élettartamát határozzák meg, figyelembe véve a működési körülményeket és ennek hatásait. Ide sorolhatjuk a sztochasztikus és a statisztikai modelleket is.
- A Mesterséges Neurális Hálózatok (ANN)⁴ kiszámítják a RUL-t közvetett vagy közvetlen módon, a rendszer egy matematikai leírásából, melyet megfigyelési adatok alapján állítottak össze. Itt kevésbé fontos a hibafolyamat fizikai értelmezése – tehát a hibát kiváltó események láncolatának ismerete.
- A Fizikai modellek az ANN-hez hasonlóan a vizsgált rendszer egy matematikai leírásából számítja ki a RUL, de ez a leírás a rendszer fizikai viselkedéséből következik, így ezek a modellek eset-specifikusak.

Ezek közül a modellek közül a 3. fejezetben ismertetett konkrét esetre, csak igen kevés használható fel. Ennek legfőbb oka az előzetes adatok hiánya, így olyan modellt célszerű választani mely meghatározható egy alacsony költségű, relatíve rövid időtartamú adatgyűjtés eredményeként. A gyakorlati alkalmazásban egy statisztikai modellt választottunk – egy elhasználódási modellt, ez az úgynevezett *Proportional Hazards Modell (PHM)* azon belül pedig a Cox-modell.

³Ennél a pontnál figyelembe kellene venni azt, hogy a megfelelő technológiai színvonallal és szaktudással rendelkezünk-e egy adott modell használatához. Ez a később ismertetett gyakorlati esetben fenn áll – a STILL céggel való közreműködés révén.

⁴Artificial Neural Networks

2.3. Túlélési és elhasználódási modellek

A túlélési modellek olyan statisztikai eljárások, melyek közös jellemzője, hogy egy meghatározott esemény bekövetkezéséig eltelt időt, illetve annak valószínűség-eloszlását modellezik. Jellemzően ezeket a túlélési modelleket szociológiai és üzleti területeken alkalmazzák, mint például:

- Valamilyen esemény bekövetkezéséig eltelt idő. Például: legközelebbi megbetegedés, gyógyulás, baleset, halálozás.
- Biztosítás megkötésétől az első káresemény bekövetkezéséig eltelt idő.
- Hitel-, biztosítási vagy egyéb pénzügyi szerződések megkötésétől a szerződés megszűnéséig eltelt idő.
- Munkanélküliek nyilvántartásba vételétől az álláshoz jutásukig eltelt idő.
- Alkalmazottak felvételétől a kilépésükig eltelt idő.

A későbbiekben használt túlélési modell alkalmazásának feltétele az időbeli stabilitás. Ez azt takarja, hogy a modell feltételezi, hogy egy adott esemény bekövetkeztéig eltelt idő valószínűség-eloszlása független a megfigyelés kezdőpontjától tehát, egy hiba bekövetkeznének valószínűsítő időpontja nem függ attól, hogy mikor kezdtük a megfigyelést[9].

A számos túlélési modell közül a legismertebb a Kaplan-Meier modell⁵ illetve a Cox-regresszió. Jelen dolgozatban az utóbbiról lesz szó, mivel ezt használjuk majd egyes alkatrészek élettartamának megbecsléséhez.

2.3.1. Kumulált kockázati ráta

A Cox-regresszió egy úgynevezett kockázati rátát (*hazard rate*) becsül a modellben szereplő változók segítségével. Legyen a t folytonos eloszlású, nem negatív valószínűségi változó. Legyen ennek az eloszlás függvénye: $F(t)$, túlélésfüggvénye⁶ pedig: $G(t) = 1 - F(t)$, illetve a sűrűségfüggvénye: $f(t) = F'(t)$. A Cox által meghatározott kockázati ráta definíciója:⁷

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} \quad (2.1)$$

A fenti definíció tovább egyszerűsödik a feltételes valószínűség definíciójának felhasználásával:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{P(T \geq t)\Delta t} \quad (2.2)$$

Felhasználva a túlélésfüggvény általános definícióját:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{P(T \geq t)\Delta t} = \frac{1}{G(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \quad (2.3)$$

⁵A Kaplan-Meier eljárás akkor alkalmazható, ha a teljes mintában vagy annak egy kategorikus változó szerinti almintáiban vizsgáljuk az esemény bekövetkezéséig eltelt időt.

⁶A túlélésfüggvény – általános alakja: $G(t) = P(T > t)$, annak a valószínűségét mutatja, hogy a halál t időpontnál később következik be.

⁷Cox eredetileg a λ jelölést használta, mivel exponenciális eloszlás esetén a kockázati ráta megegyezik az exponenciális függvény paraméterével.

Látható, hogy a szorzat második tényezője egy differenciálhányados, az eloszlás függvény deriváltja, amelyről ismerjük, hogy: $F'(t) = f(t)$. Innen:

$$\frac{1}{G(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{G(t)} = h(t) \quad (2.4)$$

Így a kockázati ráta meghatározásához elegendő a túlélésfüggvény és az eloszlásfüggvény ismerete:

$$h(t) = \frac{f(t)}{G(t)}, \text{ ahol } G(t) \neq 0 \quad (2.5)$$

A kockázati ráta mértéke azt mutatja meg, hogy mekkora a valószínűsége, hogy egy adott pillanattól kezdve, rövid intervallumon belül bekövetkezik a vizsgált esemény – feltételezve azt, hogy eddig nem következett be. Látható, hogy ha a vizsgált esemény egy adott t időpontig nem következett be, akkor annak a valószínűsége, hogy egy Δt hosszúságú intervallumon belül bekövetkezik, közelíthető a t időpontban vett kockázati ráta és a Δt intervallum szorzatával:

$$P(T < t + \Delta t \leq t) \approx \Delta t H(t) \quad (2.6)$$

Ha megvizsgáljuk a kockázati rátát, látható, hogy exponenciális eloszlás esetén - mivel $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ illetve, $G(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$ - a kockázati ráta egy időtől független, konstans.

2.3.2. Cox-regresszió

A kockázati ráta a Cox-regresszió segítségével adható becslés, ahol a modell alapegyenlete:

$$h(t) = h_0(t) \cdot e^{\sum_{i=0}^n x_i \cdot \beta_i} \quad (2.7)$$

ahol x_i a magyarázó változókat – az esemény bekövetkezési idejére hatással bíró paraméter – jelöli, β_i pedig a az i -edik változó együtthatója – azaz a változó mennyiben befolyásolja az esemény bekövetkeztének időpontját. Az egyenletben szereplő $h_0(t)$ az úgynevezett alap kockázati ráta, amely abban az esetben érvényes, ha egy megfigyelésre vonatkozóan minden magyarázó változó értéke nulla – a műszaki gyakorlatban például egy alkatrész elhasználódását leíró függvény, abban az esetben, ha az élettartamot nem befolyásolná az exponenciális függvény argumentumában lévő magyarázó változók [7].⁸

A β_i paramétereket célszerűen múltbéli adatok alapján érdemes meghatározni, amihez nagy adatmennyiség szükséges. Itt fontos megjegyezni azt a tény, hogy a modellalkotás során a különböző globális környezeti tényezőket csak implicit formában ajánlott figyelembe venni és az egyes környezetekhez külön modellt alkotni. A gyakorlatban ez olyan formában látható, hogy érdemes egy légszűrű, vagy olajszűrű berendezés portartalmát mérni és ezt felvenni a magyarázó változók közé. A por mértéke és így porosodás gyorsasága nyilvánvalóan más egy bányában és más egy ipartelepen vagy egy gyárban, viszont szükségtelen és nem célravezető például a környezet átlagos portartalmát mérni. Ehelyett ajánlatos inkább a különböző környezetekre különböző

⁸Ezt úgy érdemes elképzelni, hogy létezik egy paraméter amely befolyásolja az élettartamot, de ez a paraméter a megfigyelés kezdetétől fogva változatlan. $\rightarrow h_0(t)$ tartalmazza a paramétert, de az exponenciális függvény argumentumában nem jelenik meg.

modelleket definiálni prognosztikai célokra [6].

Az ebben a fejezetben tárgyalt algoritmusok és eljárások mind fontos összetevő a modellalkotásnak, így elengedhetetlenek egy proaktív karbantartási stratégia kialakításához. A következő fejezetben egy ilyen stratégia megalkotására törekszem.

3. fejezet

Stratégiák megalkotása a proaktív karbantartáshoz

3.1. A lehetőségek felmérése – Kiindulási helyzet

3.1.1. Együttműködés ipari résztvevőkkel

A proaktív karbantartás megvalósító fejlesztések végső célkitűzése már az előző fejezetben említésre került, ahol szó esett a szükséges technológiákról és fejlesztésekről, hogy egy olyan komplex könnyen adaptálható rendszert lehessen megalkotni, amely megállja a helyét az ipar bármely területén. Azonban ennek a célnak az eléréséhez még jelentős fejlesztések szükségesek, ezért a dolgozat további részében egy cél-specifikus hardver megalkotásáról lesz szó, beleértve a ebbe a modellalkotáshoz – elhasználódási és karbantartási modell – szükséges információk meghatározását és ezeknek meggyűjtését valamint az ehhez kapcsolódó fejlesztéseket. Az alábbi fejezetben az eddig ismertetett eljárásokat és algoritmusokat felhasználva dolgozunk¹ ki olyan stratégiákat és módszereket, amelyekkel mérni tudjuk a modellalkotáshoz szükséges paramétereket, vagy az azt reprezentáló fizikai mennyiségeket. A megvalósítandó kiberfizikai rendszert végül a STILL cég villástargoncáira helyezzük majd fel és a gyűjtött adatok alapján határozzuk meg azt az elhasználódási modellt, amelyet később a proaktív karbantartás során fel fogunk használni.

A STILL² vállalat a MANTIS projekt egyik ipari résztvevője, akik hozzájárulnak ahhoz, hogy eszközparkjukat - ebben az esetben több különböző típusú villástargoncákat, mérési célokra használjuk, illetve információkat szolgáltatnak az eszközök alakrészeiről és megosztják ezzel kapcsolatos saját korábbi méréseiket és tapasztalataikat.

3.1.2. Korábról gyűjtött adatok felhasználhatósága

A STILL legnagyobb számban gyártott, legnépszerűbb termékei a különböző típusú villástargoncák, így ezek nyilvántartására létezik egy úgy nevezett *flottamenedzser* program. Ebben a programban több, mint 12000 targoncának bizonyos adatai találhatóak meg úgy mint: a targonca típusa - ebből következően, hogy benzines vagy elektromos, a targonca emelővillájának típusa, a targon-

¹A szerző és munkatársai – a hardver fejlesztői

²Piacvezető, német villástargoncákat, vontatókat és raktárkezelő rendszereket forgalmazó cég

cával elért maximális sebesség, a motor maximális nyomatéka, megtett úthossz, terheléssel megtett úthossz, irányváltások száma, maximális terhelés (súly), stb. Ezen kívül különböző hibai üzeneteket is tárol, például: a motor, illetve az emelővillát működtető motor esetén egy kritikus hőmérséklet meghaladásáról[5]. Ezeknek az adatoknak egy csak része releváns a mi szempontunkból: azok amelyeket fel tudunk használni az elhasználódási modellben vagy az RCA során egyes alkatrészek paramétereiként.

A flottamenedzser adatain kívül a gyártó rendelkezésünkre bocsátotta a SAP adatbázisban elérhető karbantartási adatokat, illetve a különböző hibákhoz – és azok elhárításához kötődő feljegyzéseket, további felhasználói visszajelzéseket melyek egy része szintén hasznos a karbantartási és elhasználódási modellek megalkotásához.

3.1.3. Paramétermérésekkel kapcsolatos alapvetések

A hardver megtervezése előtt több probléma is felmerül. Az egyik igen sarkalatos pont az a kérdés, hogy pontosan mit is kívánunk mérni. Bár a gyártó nagy mennyiségű adatot hajlandó megosztani a fejlesztőkkel, ezeknek az adatoknak – ahogy fent említettem – csak egy része releváns, a többségük nem alkalmas arra, hogy bármilyen formában hozzájáruljon egy elhasználódási modell létrejöttéhez pusztán azért, mert nem lehet belőle következtetést levonni egy alkatrész elhasználódásával kapcsolatban. Ehhez kapcsolódik, hogy nem biztosított a hozzáférés a STILL villástargoncáin található CAN-Bus-hoz³, így jelentős mennyiségű hasznos adat *nem* használható fel erre a célra. Bár a villástargoncák rendelkeznek beépített szenzorokkal, melyekhez a CAN-bus megkerülésével hozzáférhetnénk, de az általános tapasztalat az, hogy ezek a szenzorok szintén nem releváns mennyiségeket mérnek. Ezek alapján a legcélszerűbb az, hogy a kívánt paraméterek mindegyikét mi magunk kell, hogy mérjük egy arra alkalmas szenzorral.

Az előbbiek fényében érdemes megfontolni azt, hogy amit csak szükségesnek gondolunk mérjük (Természetesen ez a cél-specifikus hardverre igaz. Egy kiforrott rendszer esetében már elegendő információval rendelkezünk ahhoz, hogy pontosan ismerjük a mérendő paramétereket.) - mivel általában a gyártótól kapott információk nem elégségesek egy paraméter pontos meghatározásához akkor sem, ha az esetlegesen alkalmas egy alkatrész elhasználódásának leírásához. Így bizonyos ésszerű határokon belül – például a mérés nem jelent számottevő plusz költséget, a mérés könnyen kivitelezhető –, célszerű minden adatot mérni amire csak szükségünk lehet és korrelációt keresni – amennyiben létezik – az egyes alkatrészek elhasználódása és a mért adatok közt. Adott esetben pedig a mért értékek és a korábban kapott adatok alapján egy árnyaltabb képet kaphatunk.

Azonban más perspektívából is meg kell vizsgálnunk a kérdést, hogy mit mérünk. Ebben az esetben viszont nem az a kérdés hogy vajon az $n + 1$ -edik paramétert érdemes-e mérni, mert a későbbiekben befolyásolhatja a modellalkotást, hanem hogy miként mérhetőek azok a paraméterek amelyek *biztosan* befolyásolják egy alkatrész elhasználódását és hogy mik is ezek. Az utóbbi kérdés megválaszolására a STILL munkatársai nagy segítséget nyújtanak. Mivel ők ismerik a targonca alkatrészeinek mechanikai tulajdonságait és rendelkeznek hosszútávú mérési eredményekkel, karbantartási feljegyzésekkel, ezért viszonylag nagy pontossággal meg tudják határozni, hogy az alkatrész mely tulajdonságai határozzák meg érdemben az élettartamot. Fontos hozzátenni, hogy

³ Controller Area Network - kommunikációs hálózat, mely járművek - eredetileg személygépkocsik - részegységeit köti össze

nyilvánvalóan minden paramétert nem tudunk számításba venni. Ha tisztában vagyunk azzal, hogy melyek ezek a tulajdonságok, jóval könnyebben meghatározható, hogy ezt a tulajdonságot milyen mérhető fizikai mennyiség reprezentálja.

3.2. A mérendő mennyiségek meghatározása

3.2.1. A rendelkezésre álló információk összegzése

Az 1. fejezetben említésre kerültek a proaktív karbantartás felhasználásának kritériumai, melyek a megfelelő technológiai színvonal, a tőke és a szaktudás, avagy szakismeret voltak. Az előbbiek magyarázata triviális, az utóbbi jelentése azonban bizonytalannak tűnhetett, eddig. Annak meghatározásához, hogy milyen szenzor szükségeltetik bizonyos fizikai mennyiségek mérésére, nem szükséges ismerni a környezeti feltételeket – ez alól kivételt képez a szenzorok, illetve a hordozó hardver-platform elhelyezésének és tápellátásnak lehetőségei –, illetve azt hogy ezek a mennyiségek, milyen befolyást gyakorolnak bizonyos alkatrészek elhasználódására. Azonban jelen helyzetben a mérések célja pontosan az, hogy a mért mennyiségekkel reprezentáljuk egy alkatrész bizonyos paramétereit és azt felhasználjuk a modellalkotásban. Ezekhez a feladatokhoz azonban behatóan kell ismerni a működési környezetet és az eszközök illetve alkatrészek mechanikai tulajdonságait, épp ezért általánosan is igaz, hogy az ehhez hasonló mérések esetén a paraméterek meghatározásában ajánlott segítséget kérnünk olyan egy területet behatóan ismerő szakembertől – jelen esetben a STILL munkatársaitól. A paramétereket tartalmazó táblázatokat ennek megfelelően a gyártótól kapott adatok alapján állítottunk össze, majd kértük ki a szakvéleményüket, így alakult ki ezeknek a végső formája.

3.1. táblázat. *A mért mennyiségek relevanciája alkatrészekre lebontva – 1. oldal*

	Distance	Distance with load	Distance with load time	Max lift	Max load	Max speed	Max torque
Engine air filter							
Oil filter			X		X	X	X
Hydraulic oil		X		X	X		
Transmission oil	X	X	X			X	X
Tire	X	X			X	X	X
Load chain				X	X		
Hydraulic hose			X	X	X		
Starter battery							
Starter							
Carbon filter	X						
Steering axle	X				X		X
Battery stroke							
Electronic components							

Jelen esetben a szükséges információkat – korábban mért mennyiségeket – táblázatos formában rendszereztük – ez látható a 3.1-es és a 3.2-es táblázatban –, ahol a sorok az egyes alkatrészeket jelölik, az oszlopok pedig bizonyos paramétereket, mérhető mennyiségeket. Amennyiben egy oszlop és sor keresztezésében *X* található, az adott paraméter releváns, azaz nagy befolyással bír az adott alkatrész élettartamának meghatározásában. Például egy gumi kopásában szerepet játszik:

- Megtett úthossz

3.2. táblázat. A mért mennyiségek relevanciája alkatrészekre lebontva – 2. oldal

	Number of direction changes	Drive time	Lift and drive time	Lift time	Value (lifetime)	Consumed amount
Engine air filter		X			X	
Oil filter		X	X	X		
Hydraulic oil			X	X		
Transmission oil	X	X	X			
Tire	X	?				
Load chain			X	X		
Hydraulic hose			X	X	X	
Starter battery						
Starter					X	
Carbon filter						X
Steering axle	X	X				
Battery stroke						
Electronic components						

- Terheléssel megtett úthossz
- Legnagyobb fellépő terhelés
- Legnagyobb fellépő végsebesség
- Maximális nyomaték
- Irányváltások száma

Egyedülként ebben a táblázatban, a gumikopás *összes vezetési idővel* való kapcsolata nem tisztázott, ez további forráselemzést igényel.

3.2.2. További mérendő mennyiségek felvétele

A fenti táblázatok korábbi statisztikai adatok és diagnosztikai folyamatok eredményei, melyek főként a CAN bus naplóbejegyzéseiből, évekre visszanyúló karbantartási tapasztalatokból és felhasználó visszajelzésekből, illetve nem e célból készített mérésekből származnak. Ha tehát csupán ezek alapján határoznánk meg a mérendő mennyiségeket, akkor egy kapott adathalmazra támaszkodunk. Bár tudjuk hogy ezeknek a táblázatoknak a létrejöttét komoly szakmai előkészületek, feldolgozási és kiértékelési procedúrák előzték meg, az esetek többségében ennek használata nem elégséges, egy megfelelő – akár kezdetleges szintű – modell felállításához. Ennek oka abban rejlik, hogy mivel korábban nem volt törekvés a proaktív karbantartás megvalósítására, ezért a kapott adatok forrásai szűkösek – tehát, egyes paraméterek adott esetben relevánsak, de nem minden releváns paramétert vettünk számításba, ugyanis nem mérték mindegyiket.

Ebben a helyzetben a legkézenfekvőbb megoldás további szakértői segítség kérése, feltételezett – esetenként ugyan triviális, de nem mért – korrelációk feltárásához. Példának okáért egy munkakörnyezet portartalma nyilvánvalóan befolyásolja bizonyos alkatrészek működését, némely esetben meghibásodáshoz is vezethet a magas portartalom, de a fenti táblázatok egyikében sem látunk olyan paramétert hogy *portartalom*, ugyanis eddig ennek mérése semmilyen jelentőséggel nem bírt, karbantartási vagy egyéb műveletek esetében.

3.3. táblázat. További mérhető mennyiségek hozzájárulása az elhasználódáshoz – 1. oldal

	Ambient dust level	Ambient humidity level	Ambient temperature	Engine RPM	Starter duration	Engine restart counter
Engine air filter	X	X	X	X		
Oil filter	X	X	X			
Hydraulic oil						
Transmission oil		?	X	X		
Tire		?	X			
Load chain	X	X				
Hydraulic hose						
Starter battery		?	X		X	X
Starter					X	X
Carbon filter					?	
Steering axle	?	?	?			
Battery stroke						
Electronic components						

3.4. táblázat. További mérhető mennyiségek hozzájárulása az elhasználódáshoz – 2. oldal

	Gear shift change rate / frequency	IMU data: axial and acceleration changes	Vibration	Oil pressure and temperature	Charging /discharging cycle counter	Direct wearout level measurement
Engine air filter						
Oil filter				X		X
Hydraulic oil				X		X
Transmission oil	X					X
Tire		X				X
Load chain			X			X
Hydraulic hose			X	X		
Starter battery						?
Starter						
Carbon filter						?
Steering axle		X	X			?
Battery stroke					X	?
Electronic components						

Az eddig nem mért mennyiségekből, ajánlott ugyancsak egy a fentiekhez hasonló táblázatot felvenni, ezek láthatóak a 3.3-as és 3.4-es táblázatokban. A táblázatok olyan szempontból nem teljesen konzisztensek, hogy némely mennyiség a 3.1-es és a 3.2-es táblázatokban meghatározott, de közvetlenül nem mérhető paramétert hivatott reprezentálni. A táblázat legutolsó oszlopa a *Direct wearout level measurement* kiemelten fontos, ugyanis ez mutatja meg hogy egy adott mennyiség közvetlenül mérhető-e.⁴ Amennyiben mérhető, a dolog egyszerű, meg kell találnunk a megfelelő szenzort a méréshez. Amennyiben nem mérhető közvetlenül egy paraméter komoly problémákat – és fejtörést – okoz, hogy találjunk egy olyan fizikai mennyiséget ami mérhető és kapcsolatban áll az adott paraméterrel.

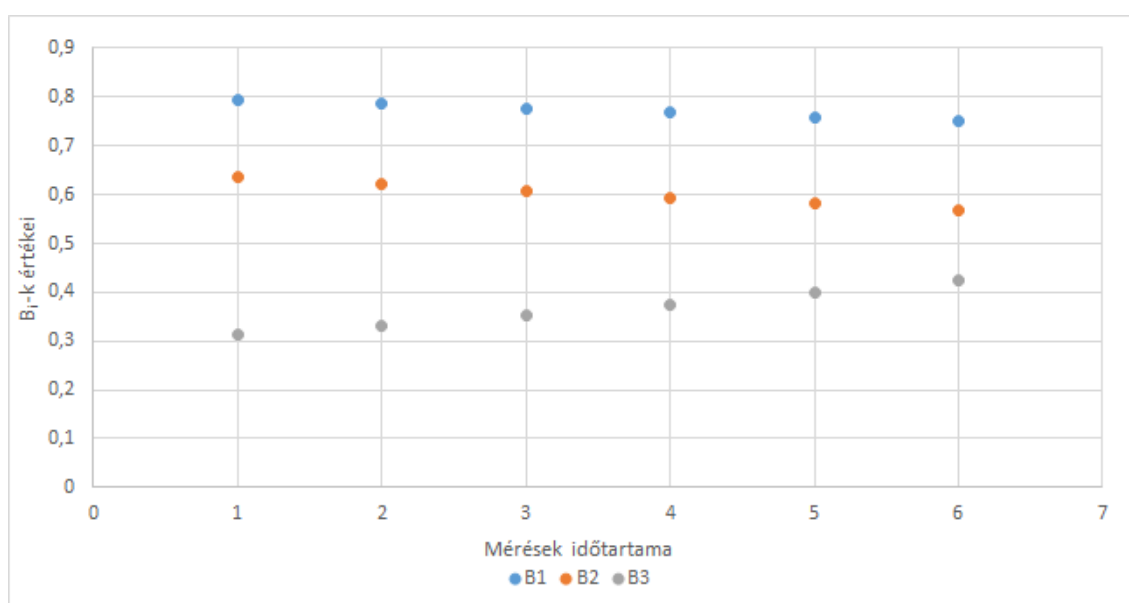
Kiemelten fontos, hogy míg a kapott értékek korábbi mérések és feldolgozás eredményei, a jelen táblázatokban feltüntetett mennyiségek csupán **javaslatok** – függetlenül attól, hogy a felkért szakemberek egyetértenek-e ennek helyességével vagy sem. Nyilvánvalóan az utóbbi eset akkor áll fenn, ha a triviálisnak gondolt összefüggések nem igazolhatóak, vagy egyszerűen csak hibásak,

⁴Az adatok a Vehicle control unit (VCU)-ból származnak

így ismételten fontos kihangsúlyozni a megfelelő szaktudás és együttműködés szerepét a proaktív karbantartás minden szintjén. Azonban ha helyesnek bizonyulnak az összefüggések, az ehhez hasonló javaslatokat méréssel mindenképp alá kell támasztani, validálni kell, csak ezek után érdemes számításba venni a modellalkotás során.

3.2.3. Modellalkotáshoz szükséges mérések

Miután tisztában vagyunk vele, hogy pontosan mely mennyiségeket is szeretnénk mérni, még szembesülnünk kell egy komoly problémával: egy eszköz vagy alkatrész élettartamát nem egyformán befolyásolják a paraméterei. A Cox féle regressziós modellben ezt az eltérést volt hivatott leírni a β_i együttható. A fenti probléma a modellalkotás során a β_i együtthatók meghatározásában érhető tetten.



3.1. ábra. β_i különböző értékei, más-más hosszúságú mérések esetén – egy stratégia a β_i együtthatók meghatározására

Az első kérdés ami felmerül, hogy milyen hosszban kell végeznünk a méréseket. Ha, túl rövid méréseket végzünk, nem csak pontatlan eredményeket fogunk kapni, hanem jelentős eltéréseket is, ennek oka nyilvánvaló: a β_i -t egy eszköz vagy alkatrész átlagos élettartamára kell vonatkoztatunk, amik évek vagy akár évtizedek is lehetnek és feltehetőleg a β_i , tehát egy paraméter hozzájárulása az elhasználódáshoz nem állandó. Ezt ábrázolja a 3.1-es ábra, ahol β_1 , β_2 és β_3 különböző együtthatók értékei láthatók, annak függvényében, hogy milyen hosszú volt a mérés hossza. A mérést jellemző szám jelzi, hogy hány hónapig tartott a mérés. Ahhoz, hogy a regressziós modellben állandónak tekinthessük, hosszú időtartamra véve pontosnak kell lennie a közelítésnek, így a méréseknek mindenképp egy hosszabb időintervallumot kell lefednie. Természetesen az adná a legpontosabb közelítést, ha egészen a teljes elhasználódás bekövetkeztéig végeznénk a mérést, amit akár meg is lehetne tenni, de semmiképpen sem gazdaságos és a projekt rövidtávú előrehaladásához sem járulna hozzá. Mivel minél hamarabb szeretnénk eredményeket kapni, ezért a túl hosszú mérések problémájával nem kell foglalkoznunk, inkább egy minimális mérési intervallum – amelyre a β_i már állandónak tekinthető – meghatározása lenne a cél. Erre vonatkozó korábbi ada-

tok viszont nincsenek, így csupán egy lehetőségünk marad: próbálkozni. Célravezető lehet több különböző időtartamú méréseket végezni, egészen rövideket – néhány nap – és hosszabbakat – egy vagy több hónap, ezek alapján pedig megvizsgálni, hogy mekkora időtartamtól kezdve tekinthető a β_i állandónak. Ennek a problémának egy másik megközelítése, hogy diszkrét időpontokban – pl.: két hetente vagy havonta – mérjük rövid időre a paramétert és a mérési eredmények alapján becsüljük meg a β_i paramétert.

A második kérdés már a 2. fejezetben említésre került, nevezetesen: a β_i értéke adott alkatrész esetén, különböző környezetekben. Egy eszköz állapotára, elhasználódására egy adott paraméternek teljesen más befolyása lehet egy adott környezetben, egy másik környezethez képest, épp ezért egy konkrét eszköz esetében a β_i értékek környezetről környezetre változhatnak.

Az előzőeket figyelembe véve célszerű különböző környezetekben, több eltérő hosszúságú validációs mérést is végrehajtani, a β_i értékek hosszú időtartamra vett pontos közelítéséhez, illetve környezetenként eltérő modelleket definiálni az egyes alkatrészek elhasználódására.

Mérendő mennyiségek

A fenti mérések elvégzéséhez szükségünk van egy mérőeszközre, azonban nem tisztázott hogy pontosan mely mennyiségeket szükség merni és melyeket nem – mert, azokat bizonyos okok miatt már mérik. Alapvető követhető az a gondolatmenet hogy a 3.1 és 3.2 táblázatokban szereplő mennyiségeket nem szükséges mérnünk, mert a gyártó azt megteszi, ellenben a 3.3 és 3.4 táblázatokba foglalt mennyiségeket szükséges, tételesen:⁵

- Környezeti páratartalom
- Környezeti portartalom
- Környezeti hőmérséklet
- Olajnyomás és hőmérséklet
- IMU⁶ adatok: irány és sebesség váltások
- Indítási idő
- Motor percenkénti fordulatszáma
- Motor újraindításának száma
- Sebesség váltás gyakorisága
- Töltési/merülési ciklusok száma
- Vibráció

A méréshez be kell szerezni a megfelelő szenzorokat és ezekből megalkotni egy mérőeszközt, a továbbiakban erről lesz szó.

⁵Természetesen a két táblázat között vannak átfedések, de a redundancia növelése ez esetben is jótékony.

⁶Inertial measurement unit

4. fejezet

Hardverfejlesztés és megvalósítás

4.1. Validációs mérések

A következő lépés egy olyan mérészköz összeállítása melyet a későbbiekben felhasználunk ipari környezetben való mérésre, a villástargoncák karbantartási stratégiáinak meghatározásakor.

Jelen pillanatban a fejlesztések az előző fejezetben ismertetett validációs méréseknél tartanak, illetve az említett mérőberendezés összeállításánál. A mérések célja minden esetben az, hogy igazoljuk: a mérés tárgya valamit reprezentál. Itt két eset lehetséges:

- A javasolt mérendő mennyiségek valóban befolyásolják-e az alkatrész elhasználódását és ha igen, milyen mértékben
- A mérendő mennyiség reprezentálja-e a korábbi adatokban – szakértők által – meghatározott releváns paramétereket¹

A később bemutatott mérés az előbbi kategóriába sorolandó, ugyanis a mérés tárgya a vibráció lesz. Azért ezt a mérést választottam, mert viszonylag könnyen elvégezhető és elég csupán cirka fél perces méréseket végeznünk. A további mérésekhez, mind a később bemutatott mérőeszköz mind a szenzorok készenállnak, de egy környezeti mérés, nagyobb időintervallumot igényel, akár hónapokat is, ezért látványos eredményekkel rövidtávon nem szolgál. Ezzel szemben a vibrációs mérés jól bemutatja az eszközök és a módszerek helytállóságát, hosszabb várakozás nélkül.

A mérés céljához tudni kell, hogy a mérendő targonca kerekén lévő gumi eltér egy személygépkocsi abroncsától, ugyanis nem üreges, hanem tömör gumi. Éppen ezért az abroncs meghibásodása során – korábbi megfigyelések alapján – a meghibásodások fő oka, hogy a gumi egyes részeiből letrönek darabok, így a targonca nem tud simán gurulni. Ebben az esetben pedig mérhető lesz bizonyos szintű vibráció a targoncán², amelyet az elhasználódási modell megalkotásakor felhasználhatunk.

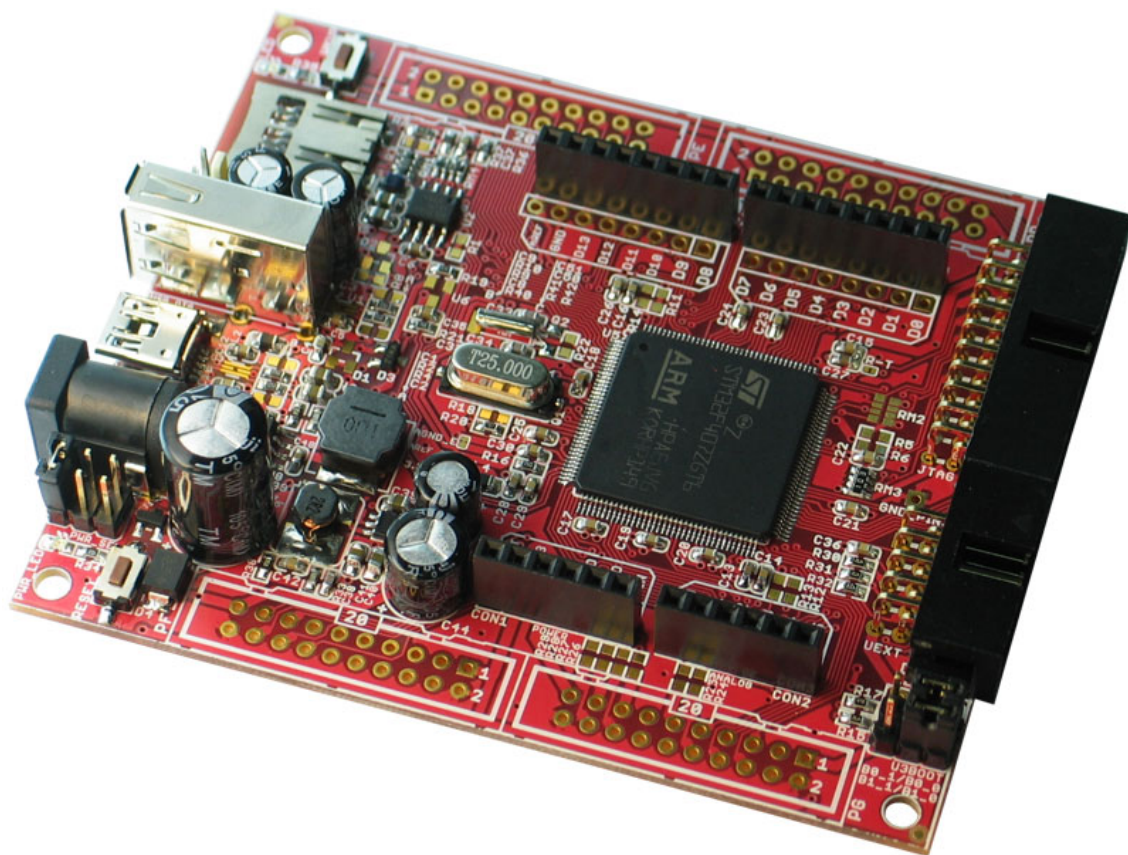
4.1.1. Hardver összeállítás

Ilyen esetben célszerű egy olyan eszközt összeállítani, amelyet fel tudunk használni későbbi mérések során, vagy szimultán tudunk vele több dolgot is mérni vagy akár tovább fejleszthető egy

¹Gyakorlatilag ez egy újramérést jelent, a korábbi adatok bizonytalansága miatt

²Természetesen abban az esetben is mérhető vibráció, ha a gumi jó állapotban van, de ebben az esetben a fellépő vibráció mértéke elenyésző

a célkitűzésben vizionált komplex kiberfizikai rendszerré. Először is szükségeltetik egy komplex funkciókkal ellátott hardver-platform, amelyet a lehető legkisebb mértékben szükséges a későbbiekben módosítani, illetve stabil fejlesztő környezet biztosított hozzá.



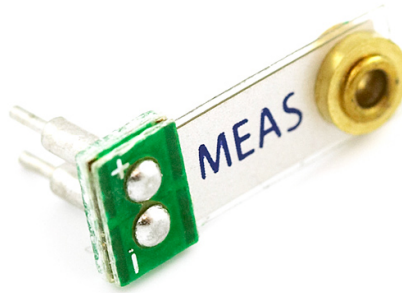
4.1. ábra. Az STM32-H407-es panel amely a mérőeszköz alapját képezi

A kiválasztott eszköz végül az STM32-H407-es board lett, amelynek legfőbb – a mérés szempontjából nézve – tulajdonságai:

- ARM Cortex-M4 processzorral rendelkezik, amely 32 bites és plusz számítási fogyasztása³ nem jelentős
- Három darab 12 bites AD konverterrel rendelkezik, illetve tartalmaz három darab SPI-t és három darab I²C-t, így gyakorlatilag bármilyen szenzor adatait képes fogadni
- Rendlekezik egy belső – max. 16 voltig – Buck konverterrel, így 6-tól 16 voltig bármilyen tápforrást használhatunk, amely mozgó tárgyak esetén sarkalatos kérdés
- SD kártya olvasóval rendelkezik, így megoldható az adatok tárolása, szükség esetén mobilitása

Ezen kívül még szükségünk lesz a szenzorokra. A vibrációs méréshez egy a 4.2-es ábrán látható piezoelektromos vibrációs szenzort szereztünk be, mely úgy működik, hogy ha a fémnehezékkal

³az alapfogyasztáson kívül



4.2. ábra. A SEN-09198 piezo vibrációs szenzor

ellátott fólia elkezd rezegni, akkor a szenzor kapcsain feszültség jelenik meg ami arányos a fólia kitérésével. Mivel a kimenő jel analóg így a H407 analóg-digitális átalakítóját használjuk a digitalizáláshoz.

4.1.2. Vibrációs mérés és az eredmények

A mérés célja és várakozásaink

A mérés célja tehát a vibrációs szenzor által mért adatok alapján meghatározni, hogy a kerék simán tud-e gurulni. A megfogalmazás egyelőre azért áll ilyen formában, mert a bemutatandó mérés egy teszt mérés, nem pedig validációs mérés, azaz nem targoncán végezzük hanem egy könnyen hozzáférhető teszt eszközön. Ennek a legfőbb oka hogy mire ezt a mérést éles körülmények között lefuttatjuk, már kiforrott legyen, hogy minél pontosabb eredményt adjon.⁴ Éppen ezért a teszt eszközünk egy távirányítású játékautó lesz, amelynek az egyik kerekébe egy csavart helyeztem a deformitás modellezésére, az autó tetejére pedig a felprogramozott⁵ mérőeszközt, rajta a vibrációs szenzorral. A méréshez felhasználtam még az MPU-6050-es szenzort, ami egy giroszkóppal ellátott gyorsulásmérő. Ezt a szenzort egy másik méréshez szereztük be, de *mindent mérjük* szellemiségében, rajta hagytam a panelon így egyfajta kiegészítő adatot fog szolgáltatni – bár nincsen kalibrálva ezért nem erre fogunk hagyatkozni.

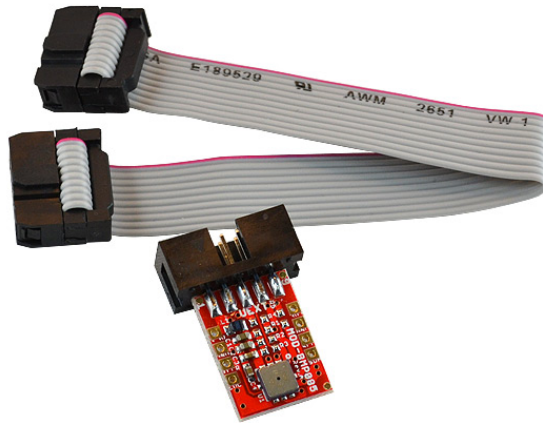
A várakozásaink alapján, olyan eredmény várható, hogy periodikusan megjelennek valamilyen nagyságú tüskék a vibrációs szenzor által kibocsátott jelben amelyek jelzik, hogy minden fordulatnak a kerék a behelyezett deformizás miatt megemelkedik, majd "*földetérés*kor" megrázkódik az autó és rajta a mérőpanel.

A mérési eredmények és értékelésük

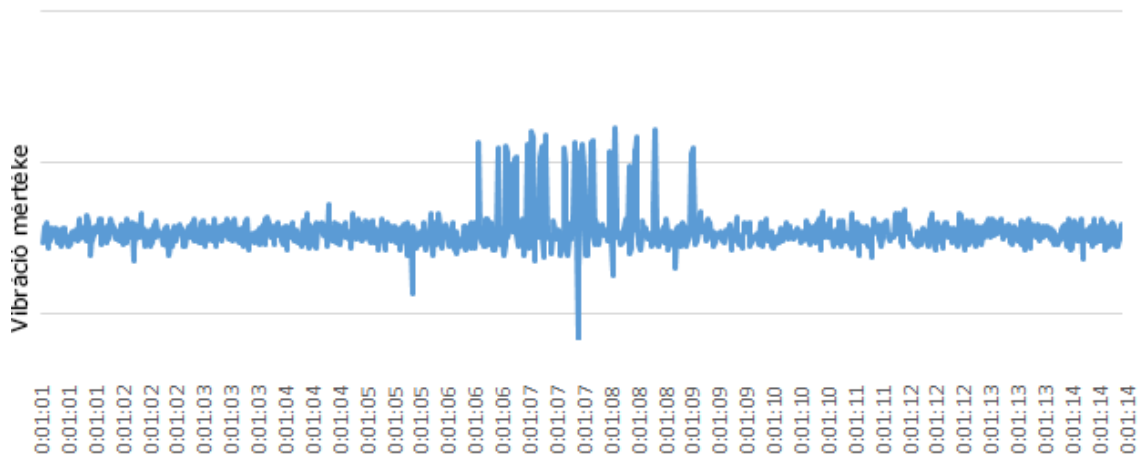
A mellékelt 4.4 és 4.5 ábrán látható, hogy a szenzor működésbe lép, egy bizonyos idő után megkezdődik a mérés, majd végül a megállt autót magára hagytam körülbelül ugyanannyi időre mint

⁴A másik ok, hogy nem egyszerű dolog targoncához hozzájutni

⁵A H407 JTAG-en interfészen programozható az STM által készített debugeren keresztül



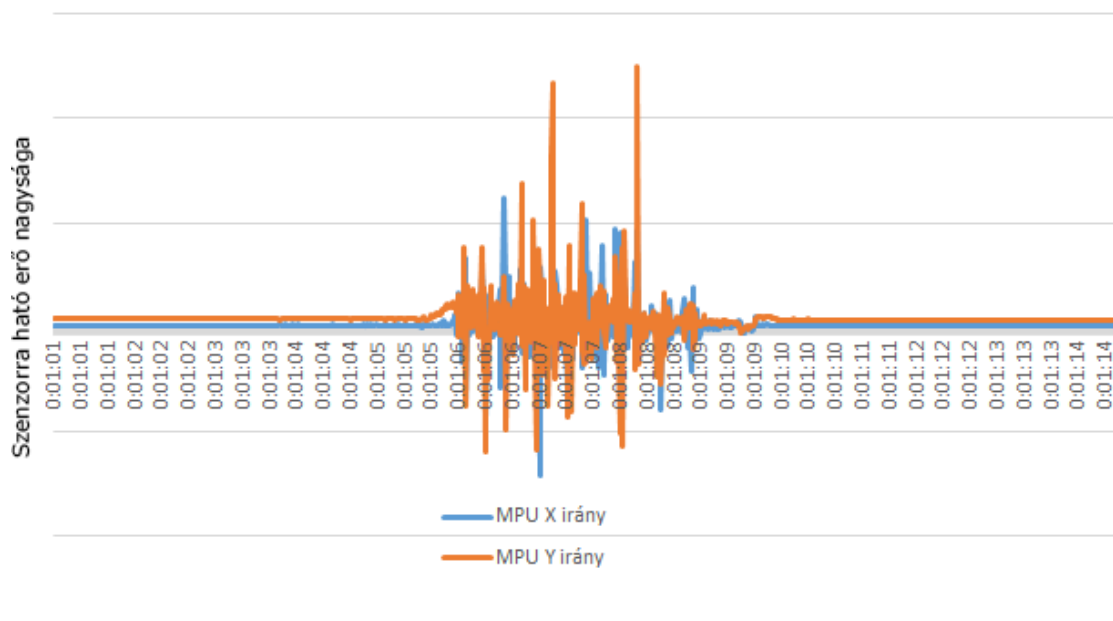
4.3. ábra. Az MPU-6050 es szenzor UEXT csatlakozóval ellátott változata, így könnyen illeszthető az UEXT-tel szintén rendelkező H407-hez



4.4. ábra. A vibráció nagysága a mérés során. Vízszintes tengelyen az idő múlása, függőleges tengelyen a vibráció mértéke látható. A tengelyek azért nincsenek megszámozva, mert jelen pillanatban csak az eredmény jellege a fontos a pontos értékek nem.

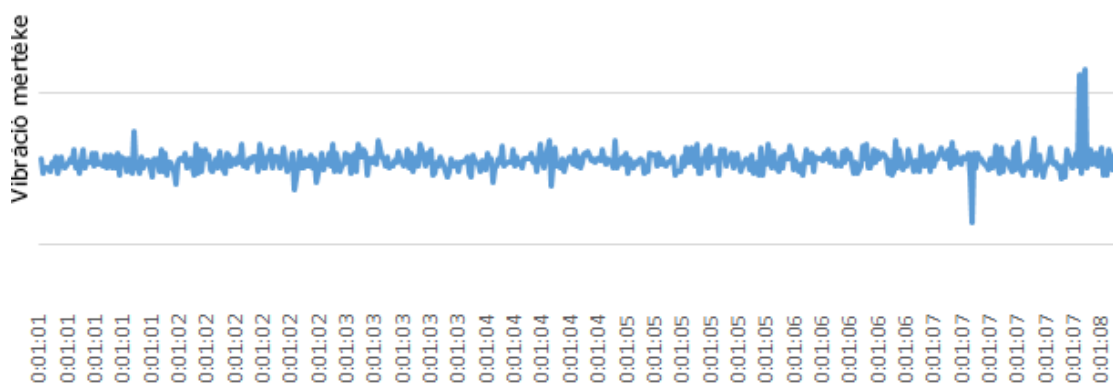
az elején. A gyorsulás érzékelő esetén az Y irány a függőleges, mivel feltételeztem hogy az autó nem vált irányt a mérés során.

Láthatóak az általunk várt tüskék, melyek egy alapzajra – a mozgás által létrejött alapvibráció – szuperponálódnak, amelyek a deformitás kerékre helyezése miatt jelentek meg, ám közel sem periodikusak, mint amilyenek vártuk. Ennek a jelenségnek az oka nem kézenfekvő. Azt érdemes tudni, hogy a mérés abból állt, hogy erősen meglöktem az autót, így az nagy sebességről indult és folyamatosan lassult – mindezt másodpercek leforgása alatt. Ennek jelei láthatóak a vibrációs szenzor eredményein, ahol a tüskék a mérés elején sűrűn követik egymást, a vége felé pedig jóval egyenletesebben, míg végül a megállás előtti tüske már 1 periódussal később jelenik meg, kisebb



4.5. ábra. A gyorsulásmérőn X és Y irányba ható erők nagysága látható a függőleges tengelyen, a vízszintesen továbbra is az idő

amplitúdóval.



4.6. ábra. Vibráció a deformitás megszüntetése után

Miután elvégeztem a mérést, végeztem utána egy másikat, de előtte az autó kerekén lévő deformitást megszüntettem – a hibát elhárítottam. Jól látható a különbség 4.4 és 4.6 ábrákon, az utóbbin csak a jármű alapvető vibrálása látható.⁶ Ezek alapján a mérési eredmény jellegében megegyezik a várt eredménnyel.

⁶Ílve a végén egy tüske, ugyanis neki löttem a falnak az autót.

4.1.3. További fejlesztések

A fentiek alapján elmondható, hogy a validációs méréshez még pontosítani kell a mérés menetét, felmérni a tesztkörnyezetet, illetve megvizsgálni a szenzor érzékenységet, de a mérés elvi menete bizonyítottan működik és ennek továbbfejlesztésével valóban detektálhatóak lesznek a gumiabroncs ilyen jellegű hibái, targoncák esetén is.

A továbbiakban a modellalkotás felé a következő lépés, az ehhez hasonló egyszerű tesztmérések elvégzése. Ezekhez a méréshez az eszköz lényegében készen áll, ugyanis elhelyeztünk rajta:

- Páratartalom mérő szenzort
- Hőmérséklet mérő szenzort
- Portartalom mérő szenzort
- Giroszkóppal ellátott gyorsulás mérőt
- Illetve az előbb bemutatott vibrációs szenzort

Ezek a szenzorok működnek, próbaméréseket végeztünk velük, legfeljebb csak a tesztmérések eredményeinek függvényében fogunk a használatukon módosítani. A tesztméréseket követően pedig nem marad más hátra mint elvégezni a validációs méréseket targoncákon a tényleges működési környezetükben, amelyekből később felállítható a karbantartási stratégia és megvalósítható a vil-lástargoncák proaktív karbantartása és menedzsmentje.

5. fejezet

Összefoglalás

Dolgozatomban a villástargoncák proaktív karbantartásával és menedzsmentjével foglalkoztam, mely napjainkban fontos tématerület, a negyedik ipari forradalom küszöbén fontos szerepet kap.

Áttekintettem a proaktív karbantartás sarkalatos pontjait és a jelenlegi fejlesztések által kitűzött cél megvalósításához szükséges technológiai hátteret. Ezután a karbantartási és menedzsment stratégiák felállításához szükséges diagnosztikai és prognosztikai módszereket tekintettem át, a hiba hely meghatározástól (*RCA*), a hátralévő hasznos élettartam becslésén át (*RUL*), egy alkatrész vagy eszköz elhasználódásának leírására alkalmas túlélési modellekig (*Cox-regresszió*). A partnerekkel való együttműködés során felmértük a különböző, fontosabb komponensek diagnosztizálására illetve proaktív prognosztikára használható paramétereket. Ezek alapján egy stratégiát dolgoztam ki a modell megalkotására, paramétereinek becslésére mérések segítségével. A mérésekhez szükség van egy környezeti és mozgást érzékelő valamint gyűjtő eszköz kifejlesztésére. A munkám során elkészült a szenzorok adatait gyűjtő eszköz, amely SD kártyára menti a szenzorok által mért adatokat. A környezeti szenzorok mellett egy gyorsulásmérő és vibrációs szenzor is helyet kapott az eszközön, amelynek működését bemutattam, egy gumiabroncs elhasználódását modellező mérésen, végül a módszer helyességét igazoltam.

A továbbiakban a kidolgozott mérési stratégia alapján méréseket fogunk végezni a modellek finomítására illetve azok validálásának céljából.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulenseimnek Moldován Istvánnak és Dr. Varga Pálnak segítségüket, munkájukat és a sok hasznos beszélgetést melynek eredményeképpen megszülethetett ez a dolgozat. Ezúton köszönöm Hegedűs Csabának a szakmai tanácsokat, amelyekkel a nehéz pillanatokban kíségtett.

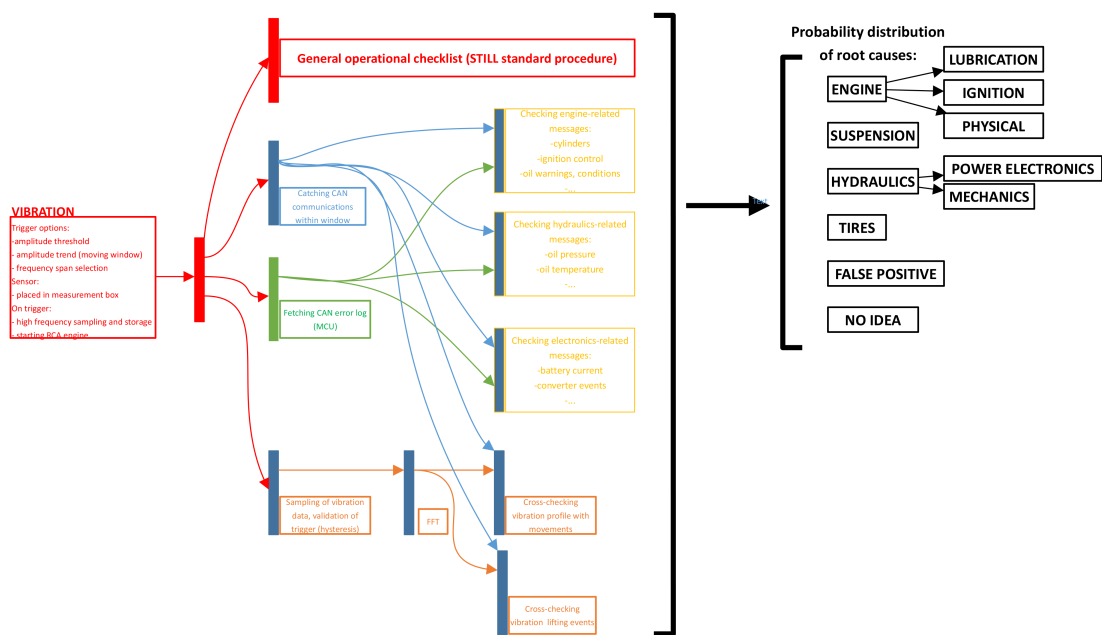
Irodalomjegyzék

- [1] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/browsePopular.jsp>.
- [2] <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918>.
- [3] <http://www.gartner.com/newsroom/id/3412017>.
- [4] Various Authors. *MANTIS – Full Project Proposal*. MANTIS – ECSEL-2014, 2014.
- [5] Ansgar Bergmann and Michael Hackner. *Validation of MANTIS solutions in relevant scenarios*. MANTIS – ECSEL-2014, 2016.
- [6] Armin Bruning, Thomas A. Mazzuchi, and William G. Linzey. A paired comparison experiment for gathering expert judgment for an aircraft wiring risk assessment. Technical report, Department of Engineering Management and Systems Engineering, The George Washington University and Department of Mathematics, Delft University of Technology and Lectromechanical Design Company, 2007.
- [7] D. R. Cox. Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society*, 6(2):187–220, 2000.
- [8] S.J. Engel, B.J. Gilmartin, K. Bongort, and A. Hess. Prognostics, the real issues involved with predicting life remaining. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 6(1):457–469, 2000.
- [9] Kovács Erzsébet. *Pénzügyi adatok statisztikai elemzése*. Egyetemi Tankönyv, 4. bővített kiadás edition, 2001.
- [10] Melinda Hodkiewicz, Lin Ma, and Joanna Sikorska. Prognostic modeling options for remaining useful life estimation by industry. *Mechanical Systems and Signal Processing*, December 2011.
- [11] Fitch C. James. Proactive maintenance can yield more than a 10-fold savings over conventional predictive/preventive maintenance programs. <http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/oilanalysis/oa-pm.htm>.
- [12] Ali Jezzini, Mohammad Ayache, Lina Elkhansa, Bassem Makki, and Maya Zein. Effects of predictive maintenance(pdm), proactive maintenace(pom) & preventive maintenance(pm) on minimizing the faults in medical instruments. In *IEEE 2nd Internation Conference on Advances In Biomedical Engineering*, 2013.

- [13] S.A. Lewis and T.G. Edwards. Smart sensors and system health management tools for avionics and mechanical systems. In *Digital Avionics Systems Conference*, 1997.
- [14] István Moldován, Hugo Ferreira, et al. *Pattern recognition techniques for RCA algorithms*. MANTIS – ECSEL-2014, 2016.
- [15] István Moldován and Pál Varga. Integration of service-level monitoring with fault management for end-to-end multi-provider ethernet services. *IEEE TRANSACTIONS ON NETWORK AND SERVICE MANAGEMENT*, 2007.
- [16] Rao B. K. N. *Profitable Condition Monitoring*. Springer Netherlands, 1993.
- [17] Carl Adam Petri. *Fundamentals of a theory of asynchronous information flow*. 1962.
- [18] Pál Varga. *Service Assurance Methods and Metrics for Packet Switched Network*. PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, 2010.
- [19] W. Wu, J.Hu, and J. Zhang. Prognostics of machine health condition using an improved arima-based prediction methods. *IEEE*, pages 1062–1067, 2007.

Függelék

F.1. A gyakorlati megvalósítás Petri-hálója



F.1.1. ábra. A 3. fejezetben tárgyalt gyakorlati megvalósításhoz tartozó Petri-háló