

Karbantartási műveletek tervezése Monte Carlo szimulációval

Planning maintenance events with Monte Carlo simulation

*Dr. NÉMETH István¹ egyetemi docens, KOCSIS Ádám² megbízott szakértő,
TAKÁCS Donát³ tanszéki mérnök, MERLO Angelo⁴ műszaki igazgató*

^{1,2,3} Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és -technológia Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., T épület 4. emelet, Tel.: +36 (1) 463-2512, Fax: +36 (1) 463-3176

⁴ CeSI, 20093 Cologno Monzese (MI) Italy - via Tintoretto, 10

e-mail: ¹ inemeth@manuf.bme.hu, ² akocsis@manuf.bme.hu, ³ takacs@manuf.bme.hu, ⁴ merlo@cesi.net
web: <http://www.manuf.bme.hu>, <https://www.programs-project.eu/>, <http://www.cesi.net/>

Kivonat

A kiélezett piaci verseny miatt a termelő vállalatok nem csupán berendezések életciklusköltségének csökkentésére, de megbízhatósági és karbantarthatósági jellemzőinek javítására is kényszerülnek, ami miatt e berendezések karbantartásának helyes megtervezése kiemelt jelentőségű feladat. A különböző karbantartási stratégiák és ütemezések hatékony értékelésére kizárólag szimuláció segítségével van mód. E cikkben a karbantartás tervezésének egy módszertana kerül bemutatására, érintve az alkatrészfa létrehozását, az élettartam analízist, a szimulációt és az életciklusköltség számítását.

Kulcsszavak: életciklusköltség, karbantartás, megbízhatóság analízis, Monte Carlo szimuláció

Abstract

The competitive marketplace in the manufacturing industry forces companies not only to reduce life cycle cost but also to increase the reliability and maintainability performance of their production system. The maintenance of production equipment, therefore, has an increasing importance. The evaluation of different maintenance scenarios can only be performed effectively by simulation methods. In this paper, a methodology for maintenance evaluation is presented, including the machine decomposition, life data analysis, simulation process and life cycle cost calculation.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a gyártóberendezések és gyártócellák automatizálásával és az ipari digitalizáció térnyerésével a termelésben mind inkább háttérbe szorul az emberi munkaerő, és felértékelődik a tőke jellegű javak, az üzemek és gyártóeszközök szerepe. A termelővállalatoknak ezért versenyképességük megőrzése vagy versenyelőny szerzése érdekében nem elég csupán a költségeiket alacsonyan tartaniuk, de a termelő berendezések (szerszámgépek, ipari robotok) kihasználtságát is maximálizálniuk kell. Ehhez elengedhetetlen a karbantartási folyamatok előrelátó tervezése, a nem várt gépleállások számának csökkentése, a megelőző karbantartások idejének helyes megválasztása.

Bár a karbantartás széleskörűen kutatott terület, a vállalatok által használt karbantartási stratégiák csak lassan követik az újonnan kidolgozott módszereket, pedig azokkal jelentős megtakarítások érhetők el: a korrektív stratégiához képest már a preventív program alkalmazása is 12-18%-os megtakarítást eredményez, a prediktív stratégia pedig további 20%-kal csökkentheti a költségeket [2]. A jól megválasztott karbantartási tervnek így hangsúlyos szerepe van egy vállalat sikerességében, és a negyedik ipari forradalom vívmányainak széleskörű elterjedésével és a rendelkezésre álló számítási teljesítmény dinamikus növekedésével nem csak a legmodernebb karbantartási módszerek váltak már a kis és közepes vállalatok számára is elérhetővé, hanem a karbantartás tervezése is hatékonyan elvégezhetővé vált.

A cikkben egy olyan módszertan kerül bemutatásra, amely alkalmas gyártóberendezések különböző karbantartási terveinek kiértékelésére. Ez magába foglalja a komponensfa létrehozását, a megbízhatósági modellparaméterek becslését múltbéli karbantartási adatokból, egy szimulációs algoritmust, valamint egy életciklusköltség kalkulátort, ami a karbantartás anyagi vonzatát adja meg a szimuláció eredményei alapján.

2. SZIMULÁCIÓS KERETRENDSZER

Végso célunk különböző karbantartási tervek kiértékelése, így legelőször meg kell határoznunk a számításba vett karbantartási stratégiák és munkaerőpolitikák körét. Ezek alkatrészenként értelmezettek, így egy teljes berendezés/gyártósor vizsgálatakor ezek kombinációja is elképzelhető.

Az alkalmazható stratégia lehet:

- Javító (korrektív): az alkatrészt a meghibásodásig használjuk, majd vagy cserét követően kerül ismét üzemképes állapotba.
- Tervezett megelőző (preventív): az alkatrészt tervezett időközönként, valós állapotától függetlenül kicseréljük, még mielőtt meghibásodhatna.
- Állapotfüggő megelőző (vagy előrejelző; prediktív): az alkatrész állapotát valós időben, szenzorokkal követjük nyomon, és múltbeli trendek alapján a meghibásodás várható időpontját előrejelezzük, így még a tényleges meghibásodást előtt megelőző lépéseket tehetünk.

A lehetséges munkaerőpolitikák az alábbiak:

- Belső karbantartók: a karbantartást a vállalat saját munkatársai végzik, jellemzően rövidebb késedelmekkel, mint egy külső vállalat karbantartói.
- Külső karbantartók: a karbantartást egy külső vállalat karbantartói végzik. Minden alkalommal, mikor a szolgáltatást igénybe veszik, egy állandó kiszállási díj kerül felszámításra.
- Külső karbantartók keretszerződéssel: a karbantartási műveletek elvégzését egy külső szolgáltató végzi, keretszerződés keretében, ami magában foglalja mind a kiszállási, mind a munkadíjat.

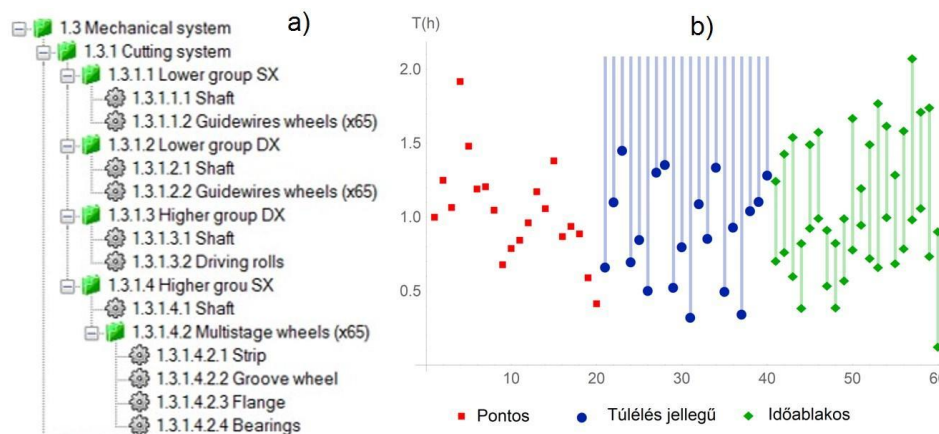
2.1 Alkatrészfa létrehozása

A kiértékelés legelső lépéseként az alkatrészek hierarchikus rendszerét kell leírni egy komponensfa formájában. A komponensfa alapján az egyes alkatrészek szintjén kiszámított megbízhatósági és karbantarthatósági jellemzők ezek fölfelé történő kiterjesztésével az alkatrészcsoporthoz és gép szinten is számíthatók. A fa létrehozása célszerűen épp fordítva történik: a teljes berendezésből kiindulva kell meghatározni az egyes ellátott funkciókat, majd ezek alapján az ezekért felelős alkatrészcsoporthoz (1. ábra/a). Fontos, hogy a részekre bontást csak a szükséges mélységig végezzük el, felesleges egy olyan egységet tovább bontani, amelynek karbantartása egyben történik, vagy az adatgyűjtés során az egyes alkotóelemeiről külön nem keletkezik adat. A fa létrehozásakor tekintettel kell lennünk a berendezés megbízhatósági láncára is. Gyártóberendezések esetén az esetek többségében feltételezhető a soros megbízhatóság, azaz egy berendezés egésze működésképtelen mindaddig, amíg akár csak egyetlen alkatrésze meg van hibásodva.

2.2 Élettartam adatelemzés

A gyártóberendezések karbantartási eseményeinek szimulációjához szükséges a komponensek viselkedését, a hibák előfordulását és a karbantartási műveletek hosszát leíró matematikai modellek, és a modell paramétereinek meghatározása. Az élettartam adatelemzés a termékek és berendezések élettartamának tanulmányozására és modellezésére szolgáló módszer. Az adatelemzés során statisztikai módszerekkel egy eloszlást illesztünk a laboratóriumi tesztek vagy üzemi körülmények között rögzített meghibásodási adatokra, ami alapján a hibaráta és a komponens várható élettartama becsülhető. Elmondható, hogy a paraméterbecslés pontossága nagyban függ a rendelkezésre álló empirikus adathalmaz nagyságától és minőségétől. A gyártóberendezések karbantartásával kapcsolatban gyakran nem megfelelő a minta nagysága, ilyen esetekben fejlett statisztikai módszerek (pl. Weibayes modell) vagy hasonlóság alapú megközelítés (a modellparaméterek közelítésére más, hasonló komponensek adatait is felhasználjuk) alkalmazható. A rendelkezésre álló adatok minőségét alapvetően meghatározza az adatrögzítés módszere (manuális, automatizált) és a gyűjtés módja (egyedi, időablakos). A paraméterbecslés szempontjából a pontos (egyedi) adatgyűjtés tekinthető ideálisnak. Ekkor a meghibásodások között eltelt hasznos üzemidő pontosan ismert. Sokszor azonban az ilyen fajta adatgyűjtés nem megoldott, helyett egy adott időintervallumban bekövetkező összes meghibásodás száma ismert csak, így sem a meghibásodás pontos ideje, sem az érintett berendezés nem ismert, ami bizonytalansággal terheli a becslést. Bármilyen módszerrel is történjen az adatgyűjtés, a meghibásodási

adatok mellett a túlélés jellegű adatok is felhasználhatók, ami alatt az adatgyűjtés végén a legutóbbi karbantartás óta eltelt üzemidőket értjük (1. ábra / b).



1. ábra a) Szerszámgép alkatrészfájának része
b) Különböző módon rendelkezésre álló meghibásodási adatok

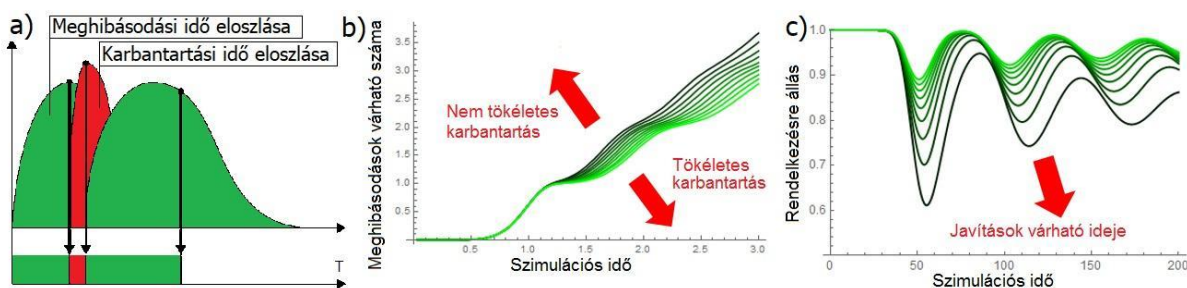
Az adatgyűjtést követően meg kell határozni azt az eloszlást, ami az alkatrész élettartamának matematikai modellezésére alkalmas. Gyártóberendezések esetén a leggyakoribb a Weibull eloszlás használata, ez ugyanis a β alakparamétertől függően növekvő ($\beta > 1$), csökkenő ($\beta < 1$) és konstans ($\beta = 1$) hibarata modellezésére is használható. Emellett számos más eloszlás is alkalmazható, úgy mint exponenciális, lognormális, loglogisztikus, Gumbell, Erlang stb. A paraméterbecslés során figyelembe lehet venni a karbantartás minőségének különböző szintjeit (tökéletes, minimális, és számos nem tökéletes karbantartás modell), ahogy a hasznos élettartam terhelésfüggését is. A paraméterbecslésre több módszer használható, többek között a legkisebb négyzetek módszere, a momentumok módszere, a Bayes becslés és a Maximum Likelihood becslés. Utóbbi számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik (aszimptotikusan konzisztens, torzítatlan és hatásos), és a becslés eredményeképp kapott Likelihood érték (amely azt adja meg, hogy adott paraméterkombináció esetén mekkora a valószínűsége annak, hogy az adott eloszlás a becslés alapjául szolgáló mintát létrehozta) alkalmas különböző modellek összehasonlítására, így automatikus modellválasztás alapját képezheti. [3].

2.3 Monte Carlo szimuláció

A valóságos, komplex gyártórendszerek sztochasztikus jellege és bonyolultsága miatt az azokat leíró egyenletek automatikus létrehozása nem megoldható. Még ha az egyenletek rendelkezésre is állnak, azok analitikus megoldása nem létezik, az eredmények numerikus közelítése pedig lassú és számításgényes. Ezen problémák Monte Carlo szimuláció alkalmazásával kiküszöbölhetők [4].

Szimuláció alatt a rendszer egy matematikai reprezentációján végzett kísérleteket értünk. Természetesen minél jobban közelíti a használt modell a valóságot, a vizsgálat eredményei annál pontosabbak, de a modell komplexitásával a kiértékelés számítási igénye is nő. A szimuláció előnye, hogy összetett rendszerek is viszonylag egyszerűen vizsgálhatók, a tesztek akár a valós időnél gyorsabban, a fizikai rendszertől elkülönítve (nem a gépidő rovására) lehet elvégezni. Ezen okokból a szimuláció karbantartás tervezésre is széles körben alkalmazott módszer [1].

Mivel a meghibásodási és karbantartási események sztochasztikus folyamatként írhatók le, így a szimulációt adott eloszlás szerinti véletlen számok generálásával kell elvégezni (2. ábra / a). A kísérletet elegendően sokszor megismételve, a vizsgált mennyiség átlagát véve kapjuk a keresett mennyiség közelítését. Mivel a rendszer különböző állapotai diszkrét értékekkel írhatók le, így diszkrét esemény vezérelt Monte Carlo szimulációról beszélhetünk. A szimuláció bemenetei az egyes gépkomponensek megbízhatósági modelljei (az élettartam adatelemzés kimenete), a kiértékelni kívánt stratégiák és munkaerőpolitikák, a tervezett karbantartások ütemezése, illetve a karbantartó személyzet összetétele és átlagos késedelmei. Ezekon felül meg kell még adni az iterációs számot és azt az időtartamot, amelyre a szimulációt el kívánjuk végezni. Ez tetszőlegesen hosszú lehet, így a szimulációs módszer alkalmas mind az állandósult állapot, mind a tranziens viselkedés kiértékelésére.



2. ábra a) Karbantartás szimulációja sztochasztikus folyamatként b) A karbantartás minőségének hatása a meghibásodások számára c) A karbantartások hosszának hatása a rendelkezésre állásra

A szimuláció során először a kezdeti állapot inicializálása történik meg. Ezt követően minden alkatrésznek létrehozuk az első kiértékelendő eseményét. Ezen események alapvetően kétfélek lehetnek: vagy a karbantartási művelet kezdetét, vagy annak végét jelölik. Előbbi esetben a gép leállításra kerül, egy karbantartót rendel a javításhoz, figyelembe véve a különböző logisztikai késedelmeket, majd egy karbantartási művelet kerül létrehozásra. Amennyiben nincs szabad karbantartó, úgy a berendezés tétlen marad és javításra vár mindaddig, míg egy munkás fel nem szabadul. Karbantartási esemény végén a rendszer szabaddá teszi a dolgozót, a gép visszatér üzemképes állapotba, és létrehozásra kerül az adott komponens soron következő eseménye. A ciklus folytatódik, az algoritmus újra megkeresi a legkorábban esedékes eseményt, és addig végzi az iterációkat, amíg az előre kitűzött szimulációs időhorizontot el nem éri. Ekkor a szimuláció leáll, az eredményeket kiértékeljük (meghibásodások számának meghatározása, rendelkezésre állás, állásidő kiszámítása), majd a szimulációt magát is többször megismételjük, hogy az eredményeket kiátlagolva kapjuk meg a keresett mennyiségek közelítését, amiket a költségszámítás során felhasználhatunk.

2.4 Életciklusköltség számítás

Bár egy karbantartási terv különböző szempontokból értékelhető, mivel a termelés területén működő szereplők döntően profitérdekelt vállalatok, egy karbantartási terv jósága annak költségvonatával írható le legjobban. Ahhoz, hogy a különböző karbantartási tervek ténylegesen összehasonlíthatók legyenek, nélkülözhetetlen egy valóságos költségmodell létrehozása, mely minél több költségösszetevőt figyelembe vesz. A cikkben javasolt összefüggés a karbantartással kapcsolatos életciklusköltséget egy időfüggő költségkomponens, egy stratégiafüggő költség és egy fix kiszállási díj (igény szerint igénybe vett külső karbantartás esetén) összegeként határozza meg. Az időfüggő költségen belül figyelembe vesszük a kieső termelés költségét, valamint a karbantartó személyzet munkadíját (az alkalmazott munkaerőpolitikának megfelelően). A stratégiafüggő költségek az alkalmazott stratégiától függően lehetnek a korrektív, a preventív vagy prediktív stratégia költségei. Mivel meghibásodások preventív és prediktív stratégia alkalmazásakor is előfordulhatnak, a javító karbantartások költségét ekkor is figyelembe kell venni. A stratégiafüggő költségek közé tartozik a cserealkatrészek költsége, a járulékos sérülések költsége, a karbantartások fix költsége, valamint a folytonos állapotfelügyeletet megvalósító szenzorrendszer kiépítésének és üzemeltetésének költsége.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az előadók részvételét az OGÉT 2020 konferencián az NTP-HHTDK-19-0068 azonosítójú, „A hazai Tudományos Diákköri műhelyek és rendezvények támogatása” pályázat támogatta. A kutatási-fejlesztési munka a „PROGRAMS – PROgnostics based Reliability Analysis for Maintenance Scheduling” című H2020 pályázaton keresztül az Európai Bizottság támogatásával valósult meg (támogatási szerződés száma 767287).

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Alabdulkarim, A., Ball, P. and & Tiwari, A., *Applications of Simulation in Maintenance Research*, World Journal of Modelling and Simulation. 9, 2013. pp. 14-37
- [2] Bonfietti, A., *Predictive and Prescriptive Maintenance*, 2018, http://www.remenergy.it/admin/wp-content/uploads/08-REM2018_Bonfietti_MindIT.pdf
- [3] Nelson, W., *Applied Life Data Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 1982.
- [4] Rubinstein, R.Y., Kroese, D.P., *Simulation and the Monte Carlo Method*, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, 2016