

# A karbantartási stratégia hatása a megújuló energia rendszerek életciklus költségére

## Maintenance strategies and life cycle costs of renewable energy systems

I. KOCSIS, J. T. KISS, K. DEÁK

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Műszaki Alaptárgyi Tanszék, kocsisi@eng.unideb.hu

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Műszaki Menedzsment és Vállalkozási Tanszék, tkiss@eng.unideb.hu

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, deak.krisztian@eng.unideb.hu

*Absztrakt. Az életciklus költségnek fontos szerepe van a beruházási döntésekben a megújuló energia hasznosítására alapozott rendszerek esetén. Mivel a gépészeti rendszerek karbantartási költsége általában jelentős részét teszi ki az életciklus költségnek, a karbantartási stratégia nagy hatással van a megtérülésre. Az ipari termelésben alkalmazott karbantartási technikákat (diagnosztika, állapotfelügyelet, adatfeldolgozás, integrált informatikai rendszerek, gépi tanulás, automatizált döntéshozatal) célszerű bevonni a megújuló energia rendszerek tervezésébe, alkalmazásuk esetén elérhetőek azok az előnyök, melyek a termelő szférában mindennaposak. Ebben a cikkben azt vizsgáljuk, hogy a karbantartási stratégiának milyen hatása van az életciklus költségre, és bemutatjuk a korszerű állapotfelügyeleti rendszerek alkalmazásából adódó előnyöket.*

*Abstract. Life cycle costs are important factors in decisions on renewable energy investments. Since maintenance costs generally constitute a high portion of the life cycle costs, the maintenance strategy applied in a project can affect the bottom line significantly. The effective maintenance tools used in the production industry (e.g., diagnostics, condition monitoring, data management, integrated information systems, machine learning, and automated decision making) can be involved in planning and maintenance of renewable energy systems to gain the benefits of these approaches. In this paper the effects of maintenance strategies on life cycle costs are investigated and the benefits of up-to-date condition monitoring techniques are presented through case studies.*

## Bevezetés

Amióta az ipari termelő vállalatok az 1970-es években felismerték az előrejelzésekre épülő karbantartás fontosságát (a profitra való jelentős kihatása miatt) a műszaki diagnosztika gyors ütemben, töretlenül fejlődött. Mivel a kifinomult mérési, adatgyűjtési, jelfeldolgozási eszközök és módszerek jelentős üzleti előnyt biztosítanak a felhasználók számára, az ipar folyamatosan finanszírozza a fejlesztést.

A hatékony adatmenedzsment ma már a gazdaság minden területén hasznot eredményez. A digitizáció világában (kapcsolódva az Ipar 4.0 okos gyár koncepcióhoz) az üzemeltetett műszaki

rendszerekből, folyamatokból származó információk fontossága egyértelmű. Az üzleti versenyben előny a korszerű technikai eszközök és szakértői rendszerek alkalmazása, melyekkel a beruházások profitalibilitása növelhető az életciklus költségek csökkenése által.

A megújuló energia rendszerek tervezésében célszerű figyelembe venni a karbantartás értékét. Egyszerű, de nem hatékony megoldás a karbantartási költségeket a megszokás alapján tervezni. Az állapotfüggő karbantartás koncepciója szerint a karbantartási költségek jelentős része olyan váratlan leállások következménye, melyek jól kialakított és működtetett adatgyűjtési és -feldolgozási módszerekkel elkerülhető. Így a megtakarítás végül sokkal (akár nagyságrenddel) nagyobb lehet, mint a diagnosztikai fejlesztés költsége.

Könnyű belátni, hogy minél többet tudunk az eszközeinkről, annál ésszerűbben tudjuk a karbantartási döntéseket meghozni akár műszaki, akár gazdasági szempontból. A megújuló energia projektek műszaki rendszerébe számos drága és kulcsfontosságú gépészeti elemet építenek be, melyek elvárt élettartama több évtized is lehet. A felhasználói elvárásokban megjelenik a rendszerek rendelkezésre állásának és megbízhatóságának magas szintje, az alacsony szintű kockázat. Ezek a követelmények nem teljesíthetők (vagy csak nagyon drágán teljesíthetők) a korszerű eszközök és módszerek szisztematikus alkalmazása nélkül.

A cikkben három vizsgálatot ismertetünk, melyek jól mutatják, hogy a hatékonyan alkalmazott diagnosztika jelentős megtakarítást eredményezhet a szervezet számára a nem tervezett leállások következményeinek elkerülése által.

## 1. A karbantartás értéke

A piaci verseny a hatékonyság folyamatos növelését kényszeríti ki. Ennek elengedhetetlen eleme a magas színvonalú karbantartás, mely biztosítja az üzembiztonságot, a gazdaságosságot és a termelékenységet. Így a karbantartás optimalizálása a versenyképesség fenntartásának fontos eleme. Felvetődik a kérdés, miként lehet a karbantartás értékét meghatározni.

A beruházások előzetes elemzésekor alapvető kérdés, hogy a tervezett rendszer gazdaságosan üzemeltethető-e. Ehhez általában meghatározzuk a jövőbeli pénzáramlás elvárt kamatlábbal diszkontált értékét. A nettó jelenérték számítása:

$$NPV = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i / (1 + r)^i$$

ahol  $C_0$  a kezdeti beruházás,  $C_i$  az éves cash flow az  $i$ -edik évben,  $r$  a diszkontráta,  $n$  az évek vagy hónapok száma a beruházásban. A beruházás tartama befolyásolja a megvalósíthatóságot. Ha a nettó jelenérték pozitív, akkor a vállalkozás értéket hoz létre a projekttel.

A vállalat tulajdonosa, vagy a vállalat menedzsere határoz a diszkontálás során alkalmazott rátáról, azaz a tőke alternatíva költségéről, ami tükrözi, hogy a beruházó mekkora hozamot realizálhat az adott iparágban, hasonló kockázatú beruházások esetén. A beruházás megvalósítását követően a beruházás

megtérülése, jövedelmezősége a rendelkezésre álló költség és bevételi adatok tükrében könnyen vizsgálható, azonban a beruházás előtt a költségek és bevételek nagysága még nem ismert. A műszaki termelési és szolgáltatási folyamatokban számos gazdasági és technikai kockázati tényező azonosítható, mint például a beszerzési és az értékesítési árak, a piaci kereslet, eszközök meghibásodása, nem tervezett leállások.

A karbantartás általában fix költséggel van betervezve a beruházások pénzügyi értékelésekor, ebben a megelőző tevékenységek következtében elkerült veszteségekből adódó haszon nem jelenik meg. Abban az esetben, ha a karbantartási tevékenységekhez társuló, nehezen számszerűsíthető hozamoktól eltekintünk, akkor az eltérő karbantartási módok összehasonlítására alkalmazhatjuk a költség-egyenértékes mutató meghatározását.

$$EAC = \frac{C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i}}{\frac{1}{r} \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+r)^t}\right)}$$

ahol  $C_0$  a kezdeti beruházás,  $C_i$  az éves cash flow az  $i$ -edik évben,  $r$  a tőke alternatíva költsége,  $n$  az évek vagy hónapok száma a beruházásban.

Az EN 13306:2001 szabvány szerint a karbantartás (maintenance) műszaki, adminisztratív és vezetési tevékenységek együttese az életciklus alatt annak érdekében, hogy megtartsák vagy visszaállítsák az eszközök olyan állapotát, mellyel az képes az elvárt funkció ellátására [1].

A karbantartási költségek függenek az alkalmazott módszertől. A főbb megközelítési módok a meghibásodásig való használat, a tervszerű megelőző karbantartás és az állapotfüggő karbantartás. További kategóriák fogalmazhatók meg az alkalmazott menedzsment elvek szerint, például beszélhetünk megbízhatóság alapú és kockázatalapú megközelítésről.

Az állapotfüggő karbantartás lényege, hogy a gépek állapotát diagnosztikai módszerekkel rendszeresen felméri, és minden esetben döntést hoznak arról, hogy szükséges-e azonnali beavatkozás (ha igen, akkor pontosan mi), vagy még biztosított a zavarmentes működés meghatározott ideig.

Pénzügyi megközelítés alapján, a megelőző karbantartást opcióként is értelmezhetjük. Az opció egy olyan speciális szerződés, amely egy adott jószág, adott áron történő eladási vagy vételi jogával ruházza fel az opció tulajdonosát, amit az opció lejárat napján, vagy azt megelőzően gyakorolhat az opció tulajdonosa, az opció típusától függően. A vételi opció esetében, az opció tulajdonosa akkor gyakorolja vételi jogát, ha az opció tárgyát képező jószág aktuális piaci árfolyama a kötési árfolyam fölé emelkedik, ellenkező esetben nem hívja le az opciót, azaz nem él opciós jogával. A nyereség megegyezik a piaci árfolyam és a kötési árfolyam között különbséggel csökkentve az opciós díjjal. A megelőző karbantartás esetében is az eszköz állapotjellemzőinek a függvényében dönthet a szakember az opció, mint karbantartás lehívásáról, megvalósításáról.

Az állapotfüggő karbantartási rendszerben akkor történik beavatkozás, amikor azt a körülmények indokolják, így elkerülhetők a fölösleges intézkedések okozta költségek (termelés kiesés, alkatrész csere, technológiai anyagok cseréje, stb.). Ezek jelentősek lehetnek az életciklus alatt, eldönthetik, hogy egy beruházás nettó jelenértéke átbillen-e pozitívba, így ezen is múlhat egy beruházásról szóló döntés.

A jelentős társadalmi és környezeti hatással bíró megújuló energia beruházásokra általában jellemző, hogy a nettó jelenérték a nulla közelében van, így az ezekkel kapcsolatos döntések érzékenyek néhány százalékos elmozdulásokra is.

A karbantartás produktivitása akkor optimális, ha a karbantartási költség minimális értéke mellett a tevékenység maximális teljesítményt ér el [2]. A produktivitás fontos jellemző a menedzsment számára. Ezek meghatározása kritikus az olyan idő- és erőforrásigényes folyamatok esetén, mint a karbantartás. Mivel a karbantartási tevékenységekhez elkülönülten nehezen rendelhető termelési eredmény növekedés, ezeket a termelési folyamatokkal együtt célszerű vizsgálni.

A karbantartás produktivitását mérő indikátorok az erőforrás-felhasználást (munkaerő, alapanyag, eszközök) jellemzik [2]. Az irodalomban számos indikátort leírtak a karbantartás produktivitására vonatkozóan, például karbantartási költség index, karbantartási célú/okú leállások mértéke (pl. időtartama), egységnyi időre vonatkoztatott karbantartási kiadások.

Pénzügyi szempontból az állapotfüggő karbantartás költségei beruházásnak tekinthetők, mivel hatásukra – a költségek csökkenése által – megtakarítás, haszon keletkezik. A különböző karbantartás-menedzsment módszerek értékelésekor meghatározzuk a nyereség-egyenértékes mutatót a költség egyenértékes mutató helyett:

$$EAB = \frac{C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{(1+r)^i}}{\frac{1}{r} \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+r)^t}\right)}$$

ahol  $C_0$  a kezdeti beruházás,  $S_i$  a költségcsökkenésből adódó éves megtakarítás az  $i$ -edik évben,  $r$  a diszkont ráta,  $n$  az évek vagy hónapok száma a beruházásban.

A veszteségek elkerüléséből származó megtakarításokon túl egyéb haszon is származik abból, hogy nem következnek be váratlan események: elkerülhetők a sérülések, a balesetek, a környezet szennyezése, melyeket számításba véve a megbízható működésből származó teljes haszon jóval nagyobb annál, ami közvetlenül megjelenik az üzleti folyamatban.

## 2. A karbantartás, mint az üzleti folyamat értékteremtő eleme

### 2.1. A műszaki diagnosztika szerepe

A modern vállalatok a karbantartást az üzleti folyamat integrált részének tekintik, mely részt vesz az értékteremtésben. A rendelkezésre állás és a megbízhatóság igénye teszi kulcsfontosságúvá az adatmenedzsmentet az eszközökkel való gazdálkodásban és az üzemeltetésben. A valós, jó minőségű adatokra épülő karbantartási döntések jelentős költségmegtakarítást eredményezhetnek.

A karbantartás produktivitásának növelése (költség és erőforrás optimalizálás) érhető el a jól tervezett és megvalósított adatgyűjtéssel és -elemzéssel. A műszaki diagnosztika fő eszközei a rezgéselemzés, a műszaki akusztika, a termográfia, a tribológia. Ezek közül a rezgésdiagnosztikát használják a legszélesebb körben, mert az adatgyűjtés viszonylag könnyen kivitelezhető, online rezgésdiagnosztikai rendszerek és automatikus mérőrendszerek rendelkezésre állnak, a mechanikai

problémák többsége és az elektromos (pl. motor) problémák egy része detektálható a rezgésjel elemzésével, a támogató szoftverek és fejlett szakértői rendszerek elérhetők.

A gépészeti berendezések rendszeres és megfelelő módon elvégzett állapotfelmérése biztosítja a javítások közti maximális hasznos időtartamot, illetve minimalizálja a váratlan leállások számát és növeli az rendelkezésre állás mértékét.

A rezgésdiagnosztika területén elérhetők a nagy tudású, hatékony rendszerek, illetve szolgáltatásként is igénybe vehető az állapotfelügyelet. A korszerű mérőrendszerek, a digitális adattárolás és adatfeldolgozás világában a szükséges adatok összegyűjtése nem okoz gondot. A diagnosztika terén azonban folyamatosan tárgya a műszaki fejlesztésnek és a tudományos kutatásoknak is az adatelemzési módszerek, jelfeldolgozási algoritmusok tökéletesítése annak érdekében, hogy a nagy mennyiségű adatból a legtöbb információt lehessen kinyerni.

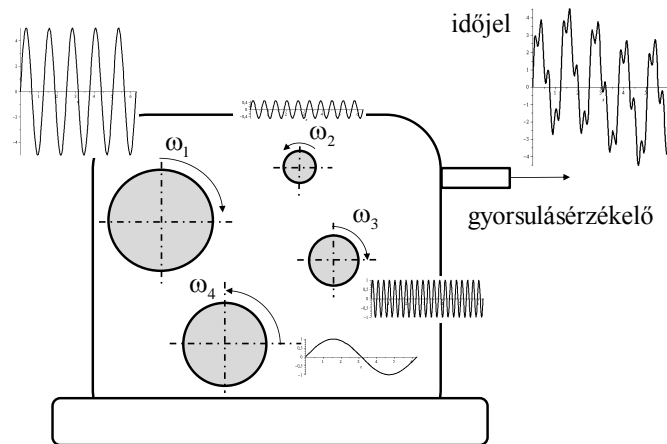
## 2.2. A rezgéselemzés szintjei

Az irodalom szerint (lásd pl. [5]) a különböző rezgésforrások energiaeloszlása: forgó mozgás 99%; lökésimpulzusok 0.9%; súrlódás 0.1 %. A mérés technikával szembeni követelményeket az határozza meg, hogy diagnosztikai szempontból éppen az alacsony energiaszinten jelentkező rezgések detektálása a fontosabb, például a csapágyak vagy a fogaskerekek állapotának felmérésekor. Több rendszert fejlesztettek ki arra, hogy az erősen zajos környezetben képesek legyenek kimutatni ezeket a rövid idejű, gyorsan lecsengő jelrészleteket.

A legegyszerűbb eljárás az (átlagos) rezgéssebesség mérése és a kapcsolódó ISO szabványokban található értékkel való összehasonlítása. Ez az általános módszer csupán arra jó, hogy felhívja a figyelmet a rezgés olyan súlyos szintjére, mely már károsítja a berendezést. Nyilvánvaló, hogy ez a fajta értékelés semmit sem ér azoknál a berendezéseknél, melyek a funkciójukat tekintve érzékenyek a rezgésekre (pl. megmunkáló gépek), mivel a gép hamarabb elveszti a funkcióját (nem képes a termék elvárt minőségét biztosítani), mint ahogy a rezgéssebesség meghaladja a kritikus szintet. Ezen túl az is nyilvánvaló, hogy az egyszerű átlagos rezgéssebesség (RMS) értéke semmit sem mond a magas rezgésszint kiváltó okáról, így állapotfelmérésre nem alkalmas.

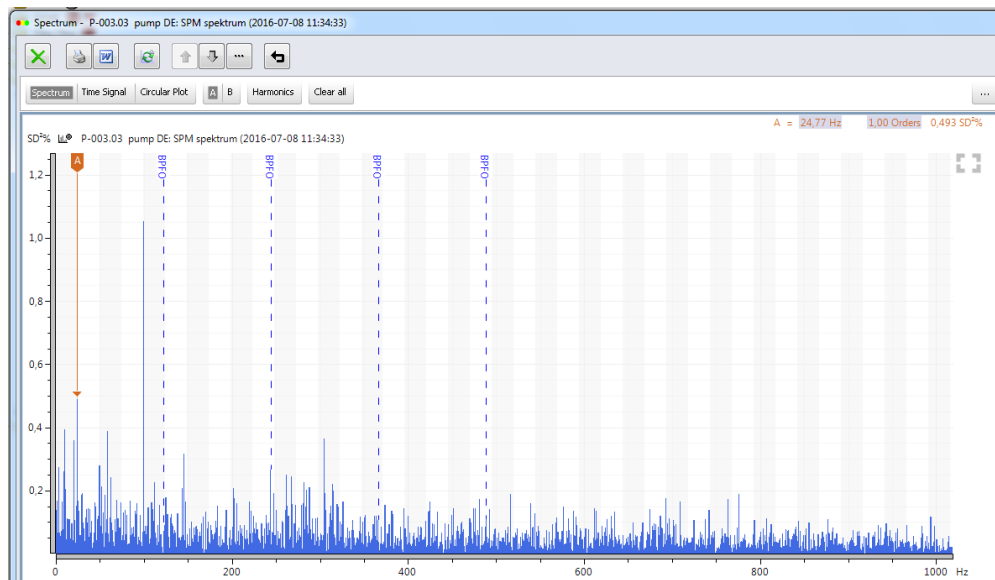
Ha a rendszer (mérőeszköz és szoftver) alkalmas a mért rezgésjel tárolására és feldolgozására, akkor lehetőség van a különféle meghibásodások okozta szimptómák felismerésére az időjelben (1. ábra) vagy a spektrumban (2. ábra).

Az egyszerű gyorsulásérzékelővel kapott adatokból származó Fourier spektrumban detektálhatók a nagy energiaszintű rezgéseket generáló mechanikai meghibásodások, például kiegyensúlyozatlanság, tengelybeállítási problémák, görbült tengely, lazaság.



1. ábra. Nagy energiájú gerjesztő hatások összegződése, időjel

A spektrumban a szimptóma egy vagy több jellegzetes frekvencia megjelenését jelenti. A korszerű szakértői rendszerek képesek a szimptóma vonalakat megjeleníteni (szaggatott vonalak a 2. ábrán), így az elemzőnek csak össze kell vetni ezeket a szoftver által előállított spektrumvonalakkal.

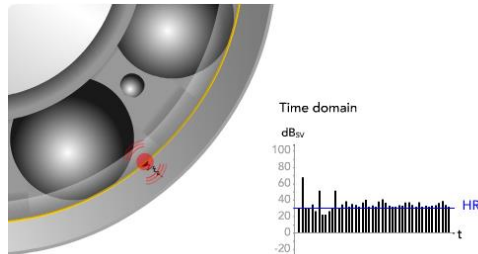


2. ábra. Szimptómák a spektrumban (SMP Condmaster Ruby szoftver által megjelenített kép)

A lökésimpulzusokat keltő hatások hatékony detektálására a közönséges gyorsulásérzékelővel mért jel elemzése nem alkalmas. Erre a célra speciális érzékelőt fejlesztett ki az SPM (3. ábra), melynek karakterisztikája úgy van meghatározva, hogy a gép anyagában (elsősorban a csapágyházban) terjedő lökeshullámokra érzékeny legyen (4. ábra). Ezen túl speciális algoritmusokat (pl. wavelet transzformáció) kellett találni arra, hogy gyorsan lecsengő jelrészletek felismerhetővé váljanak, mivel a Fourier transzformáció csak a periodikus komponensek kimutatásában hatékony.

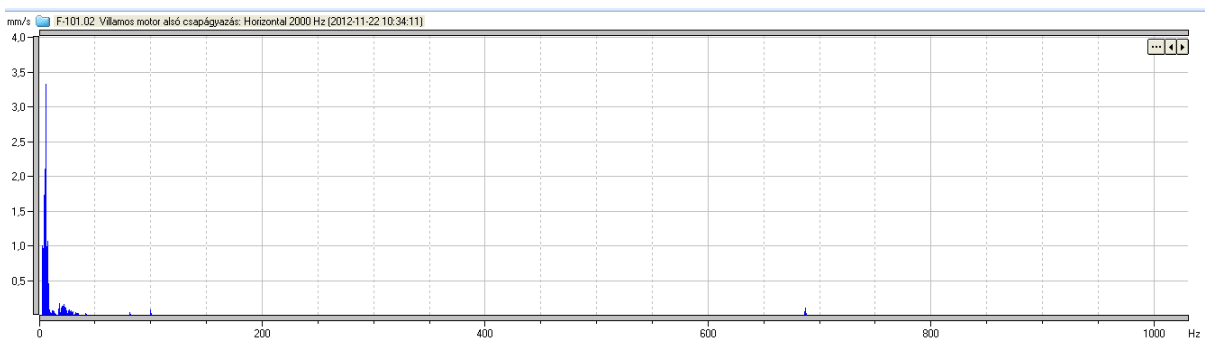


3. ábra. SPM lökésimpulzus érzékelő [5]

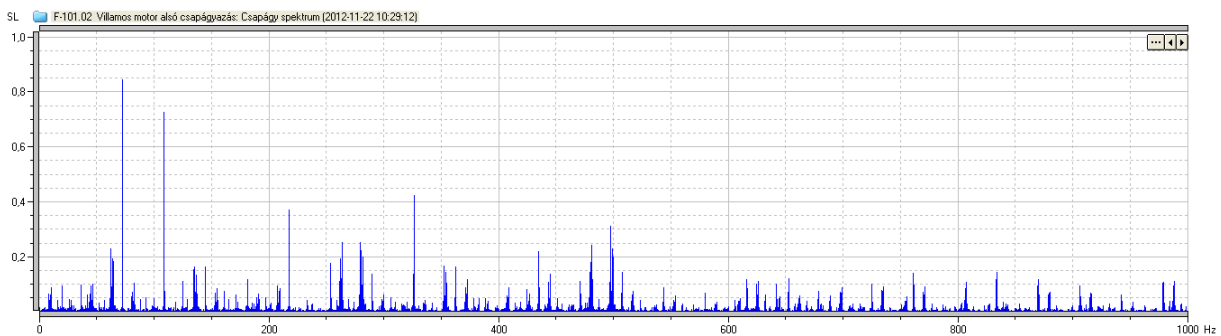


4. ábra. Csapágy külső gyűrű sérülés által generált lökeshullámok [6]

Az ún. SPM spektrumban (6. ábra) – a speciális érzékelő karakterisztikának köszönhetően – megjelennek olyan frekvenciákon is vonalak, melyek egy „normál” spektrumban (5. ábra) nem látszanak a linearitás miatt.



5. ábra. „Normál” spektrum



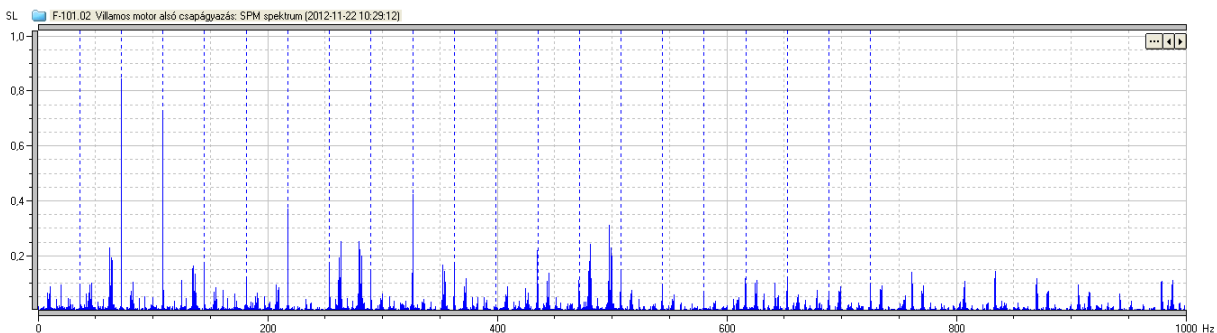
6. ábra. SPM spektrum

## 2.3. Esettanulmányok

### A. Hajtómű frekvenciaváltó probléma és csapágy kenési probléma detektálása

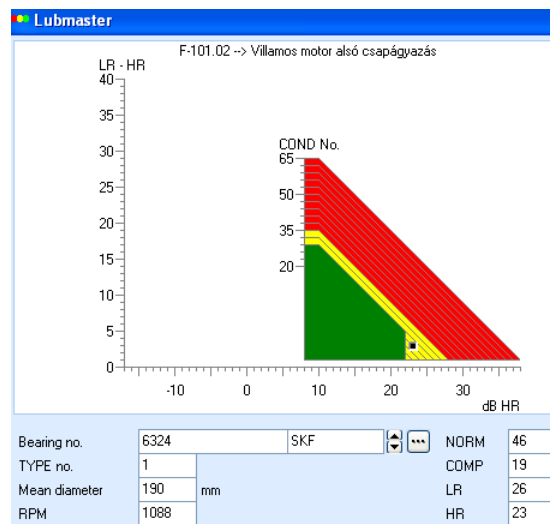
A változó fordulatszámot biztosító hajtások jellegzetessége, hogy a generált áram nem tökéletesen szinuszos, így a vezérelt motor forgása nem egyenletes. Ez a hatás nem jelentős kisebb teljesítményű motorok esetén, azonban nagy teljesítményt biztosító hajtások esetén a mechanikai rezgés olyan szintet érhet el, ami már érzékelhetően csökkenti az alkatrészek élettartamát.

A példában vizsgált (100m<sup>3</sup>-es keverőtartályt működtető) hajtás villamos motorja 400kW teljesítményű, 2400kg tömegű, az ehhez kapcsolódó három tengelyes hajtómű 1800kg tömegű.



7. ábra. „Frekvenciaváltó probléma” szimptóma megjelenése a motor hajtás oldali csapágy SPM spektrumában

A 7. ábra mutatja, hogy „frekvenciaváltó probléma” szimptóma egyértelműen jelen van a motor hajtás oldali csapágy SPM spektrumában. Megállapítható volt, hogy a hajtás megtervezésekor nem jártak el kellő gondossággal a frekvenciaváltó kiválasztásában.

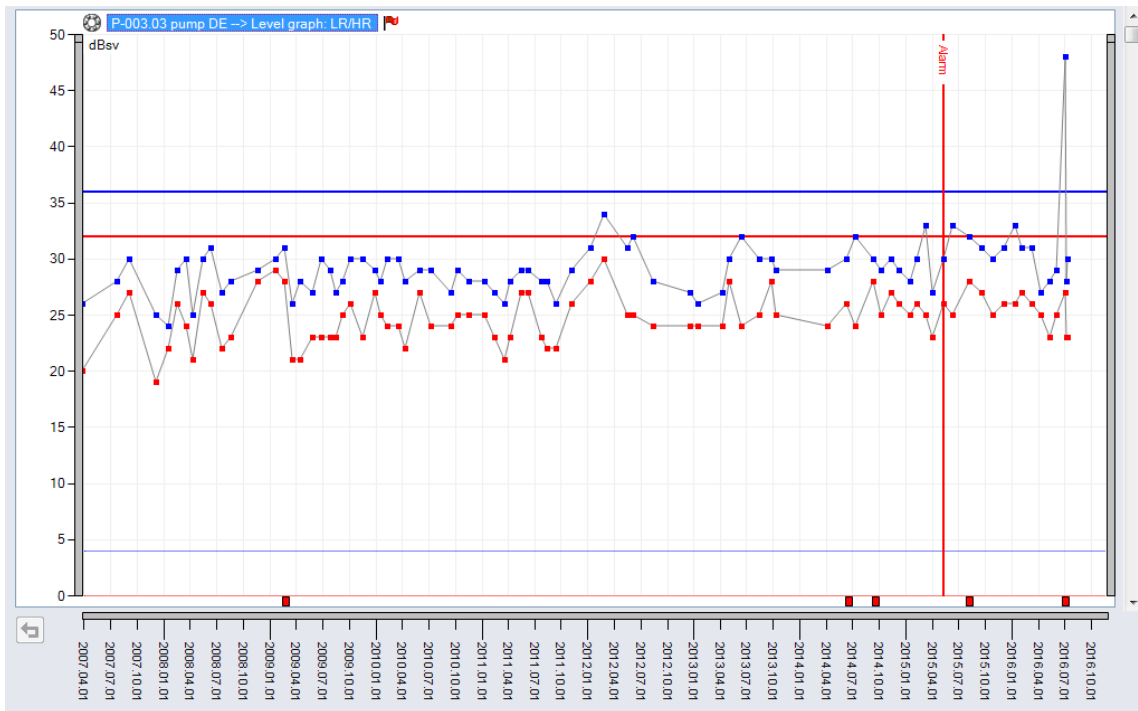


8. ábra. Az SPM Condmaster Ruby szoftver Lubmaster modulja által mutatott kép a villamos motor hajtás oldali csapágyánál

Ugyanannál a csapágyánál kenési probléma is kimutatható volt. A 8. ábrán, az SPM Condmaster Ruby szoftver Lubmaster modulja által előállított képen látható, hogy az aktuális állapotot jellemző pont



jobbra eltolódott a sárga (figyelmeztető) zónába, ami a kenés elégtelenségére utal. Ez után megvizsgálva az automata kenési rendszert, kiderült, hogy nem működött dugulás miatt, ami azonnali beavatkozást igényelt.

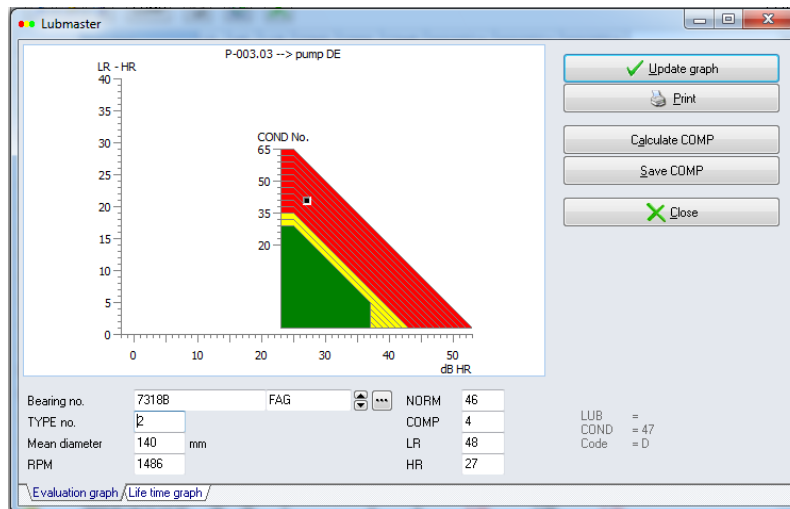


9. ábra. Az LR/HR adatok időszora (szivattyú hajtás oldali csapággy)

#### B. Szivattyú csapággy állapotának felmérése

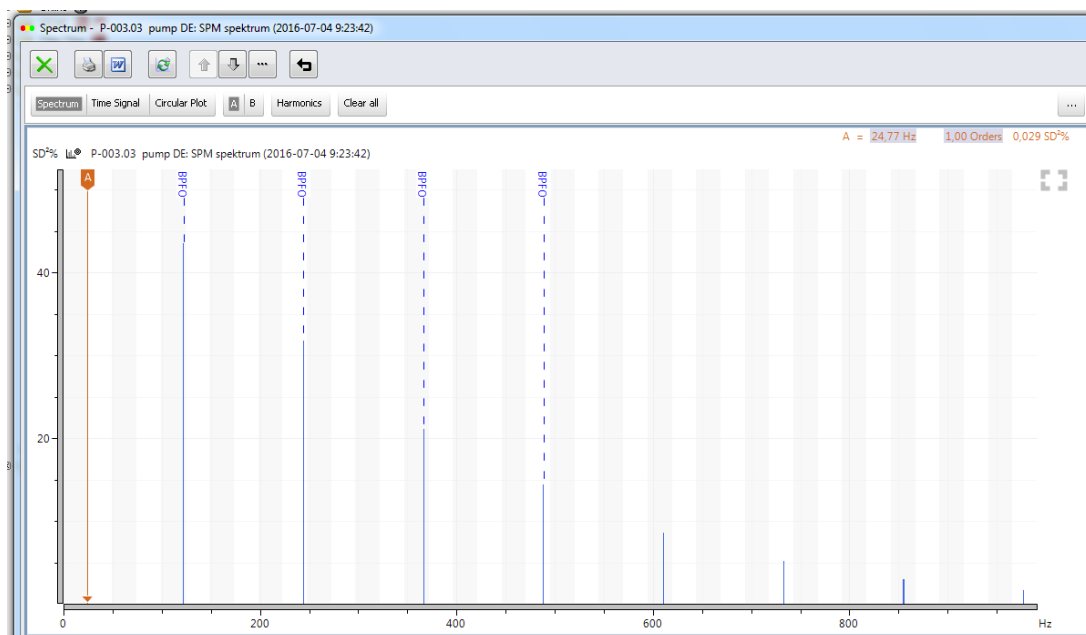
A szivattyúk fontos szerepet töltenek be a megújuló energia rendszerekben, ahogy a legtöbb ipari termelési folyamatban is. Ebben a vizsgálatban egy zagyszivattyú csapággyát vizsgáltuk lökésimpulzus elemzéssel. A HR (high rate) érték a lökésimpulzusok „szőnyeg” szintjét mutatja, mely a kenés megfelelőségével függ össze: ha vékonyodik a kenőfilm réteg, mert csökken a kenőanyag mennyisége, vagy mert nem megfelelő viszkozitású kenőanyagot alkalmaztak, akkor emelkedik a HR szint (4. ábra). Az LR (low rate) érték a szőnyegszinttől jóval kiemelkedő a lökésimpulzus értékeket jellemzi, melyek akkor jelennek meg, ha sérül a csapággy valamely alkatrészének felülete. Az LR-HR érték mutatja a sérülés súlyosságát (8. ábra).

A 9. ábra a szivattyú hajtás oldali csapággy LR/HR adatait mutatja időszorként (a mérések három hónaponként ismétlődtek). Az ábrán jól látható, hogy egy hosszú periódus után, melyben a LR/HR értékek megfelelő szinten voltak egy méréskor nagy LR érték adódott, mely a szivattyú azonnali leállítását eredményezte. A 10. ábra a Lubmaster analízis eredménye mutatja ugyanannál a mérésnél, a probléma jelenléte egyértelműen látszik a pont elhelyezkedéséből.



10. ábra. A Lubmaster analízis eredménye (szivattyú hajtás oldali csapágy)

A hiba azonosításához az adott mérésből származtatott SPM spektrumot kell elemezni. A 11. ábrán az SPM spektrum részlete, valamint a „külső gyűrű sérülés” (BPFO) szimptóma vonalai láthatók. A szimptóma vonalak és a spektrum vonalak egybeesése a külső gyűrű sérülésére utalt. A csapágyat megvizsgálva igazolódott a megállapítás (12. ábra).



11. ábra. Az SPM spektrum részlete, a „külső gyűrű sérülés” (BPFO) szimptómával



12. ábra. Sérülés a csapágy külső gyűrűjén

### 3. Következtetések

A műszaki folyamatok monitorozására számos műszaki diagnosztikai eszköz áll rendelkezésre. A korszerű gépészeti rendszerek elemei fel vannak szerelve telepített érzékelőkkel, melyek folyamatosan szolgáltatnak adatokat a mérőpontokról a számítógépes karbantartási rendszernek, ami manapság már sok esetben a vállalati információs rendszer integrált eleme (pl. SAP).

A mérőrendszerek technikai színvonala mára azt eredményezte, hogy adatok gyakorlatilag korlátlan mennyiségben állnak rendelkezésre, így a kinyert hasznos információ elsősorban az adatelemzési módszereken múlik. A hatékony diagnosztika a mérések megtervezésével kezdődik (mit, hol, mikor hogyan mérjünk), ezt követi az adataelemzés és a döntés a szükséges beavatkozásokról.

Ebben a cikkben azt elemeztük, hogy a karbantartás tervezése (a rendelkezésre álló eszközök, módszerek alkalmazása) milyen szerepet törthet be az üzleti tervezés folyamatában, miként hathat a beruházási döntésekre, különös tekintettel a megújuló energia hasznosítása területén. Mivel a karbantartási tevékenység költsége az életciklus költségek jelentős részét teszik ki, az itt elért megtakarítások jelentősen befolyásolhatják a beruházás megtérülését, így a beruházásról való döntést is.

### Hivatkozások

- [1] N. D. Gupta, Sushil K. Sharma (2014) *Intelligent Enterprises of the 21st Century*, Idea Group Inc (IGI) pp. 322, ISBN 1591401607, 9781591401605.
- [2] A. Parida, U. Kumar, (2009) *Maintenance Productivity and Performance Measurement*, in. Handbook of Maintenance Management and Engineering, Eds. M. Ben-Daya, S. O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic, D. Ait-Kadi, Springer Science & Business Media. pp. 21-22, ISBN 1848824726, 9781848824720.
- [3] H. Czychos (ed.) (2013) *Handbook of Technical Diagnostics*, Springer-Verlag.
- [4] A. G. Piersol, T. L. Paez (2010) *Harris' Shock and Vibration Handbook*, McGraw Hill.
- [5] *Evaluated Vibration Analysis*, SPM 1997-12. 71536.B.
- [6] *SPM Measuring Techniques*, [www.spminstrument.com/Measuring-techniques](http://www.spminstrument.com/Measuring-techniques). Letöltési idő: 2017.07.02.