

Hibadetektáló rendszer légtechnikai berendezések számára

Tudományos Diákköri Konferencia

Ali Dávid

Programtervező informatikus BSc., II. évfolyam

Lévai Balázs László

Programtervező informatikus MSc., II. évfolyam

*Témavezető: Dr. Bánhelyi Balázs egyetemi adjunktus
SZTE TTK Számítógépes Optimalizálás Tanszék*

2012.11.05.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
A berendezés.....	2
A szenzorok elhelyezkedése	3
Felmért hibák	4
A Fourier-transzformáció	5
Gyors Fourier-transzformáció.....	7
Eddigi méréseink	7
A detektálás alapjai.....	10
A neuronháló.....	11
Az eredmények	12
Vak tesztek.....	15
Ami még hátra van.....	17
További tesztelések.....	17
Költségcsökkentés	17
Felhasználói felület	17
Összefoglalás	18
Mellékletek	19

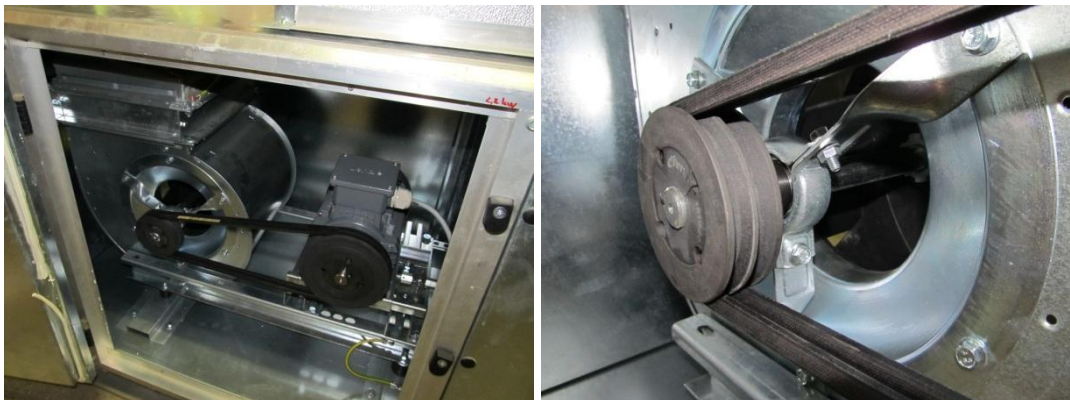
BEVEZETÉS

Egy légtechnikai berendezések üzemeltetésével foglalkozó cég bízott meg bennünket egy olyan rendszer létrehozásával, amely alkalmas a berendezéseik távoli monitorozására, a gépek esetleges hibáit felismeri és kijelezi. Új berendezések telepítése esetén a korábban beüzemelt rendszerek hibajellemzőit felhasználjuk. Mivel minden berendezés kicsit más, ezért a későbbiekben minden új berendezés hibajelenségeinek jellemzőit meg kell tanulnia. Tehát a rendszernek könnyen újrataníthatónak kell lennie.

A berendezésekben mozgást érzékelő szenzorokat helyeztünk el a gyakori és jelentős meghibásodásokhoz közeli helyeken – főként a forgástengelyek közelében. Ezzel várhatóan a forgásokban bekövetkező hibák könnyedén érzékelhetők lesznek. Ilyen típusú mozgásnál a gyors Fourier-transzformáció (FFT) által kapott sorok jól jellemzik a változásokat. Az első lépésben ezen sorok elemzésére koncentráltunk. Helyes, valamint különböző hibás működések adatsorait megvizsgálva megállapítottuk, hogy az egyes hibák esetén kapott adatsorok jellemzően különböznek a hibátlan működésű gép adatsoraitól. Így ennek felhasználásával lehetséges a meghibásodás detektálása.

A FFT vizsgálatok után, detektáló algoritmusnak a Neuron hálózatot választottuk. Teszteléshez a MATLAB rendszer Neural Network Toolbox-át használtuk. A háló tanítását a különböző hibák esetén mért adatsorok egy részével tanítottuk, majd teszteltük a többi adatsorral, melyeket a dolgozatban bemutatunk. Az eredmények biztatóak, új ismeretlen hibák esetén is körülbelül 80 százalékos pontossággal detektáltuk a hibákat. Rosszul azonosított hibák főként a nem jól megkülönböztethető hibáknál jelentkeznek.

A BERENDEZÉS



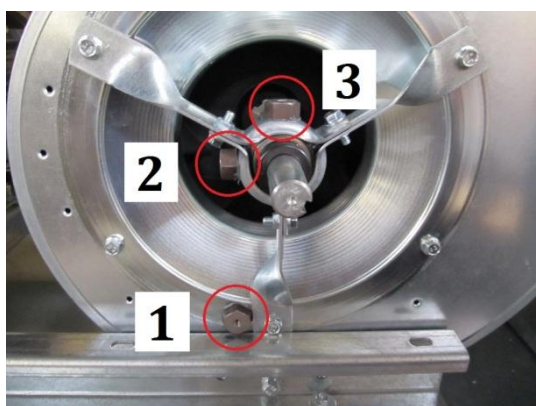
A SZENZOROK ELHELYEZKEDÉSE

A berendezés ékszíjas részén 10 szenzort helyeztünk el az 1. táblázat feltüntetett elrendezésben. A szenzorok foglalatait ragasztással helyeztük fel a gépekre, ezekre látható példa az 1. ábra a 2. ábraán

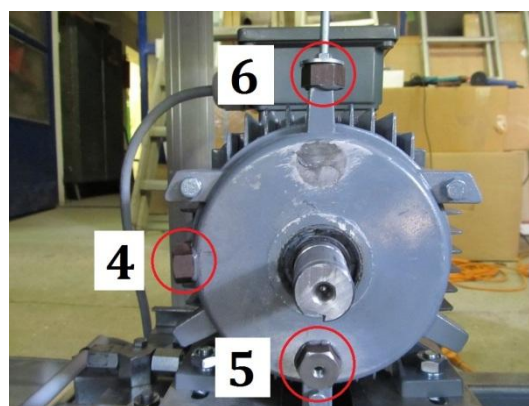
1. TÁBLÁZAT - SZENZOROK A LÉGTECHNIKA ÉKSZÍJAS RÉSZÉN

Sorszám	Pozíció
1	a ventilátor nem meghajtott oldalán a tengellyel párhuzamosan (1. ábra)
2	a ventilátor nem meghajtott oldalán vízszintesen (1. ábra)
3	a ventilátor nem meghajtott oldalán függőlegesen (1. ábra)
4	a motor nem hajtó oldalán vízszintesen (2. ábra)
5	a motor nem hajtó oldalán a tengellyel párhuzamosan (2. ábra)
6	a motor nem hajtó oldalán függőlegesen (2. ábra)
7	a motor hajtó oldalán függőlegesen (3. ábra)
8	a motor hajtó oldalán vízszintesen (4. ábra)
9	a ventilátor meghajtott oldalán vízszintesen (5. ábra)
10	a ventilátor meghajtott oldalán függőlegesen (5. ábra)

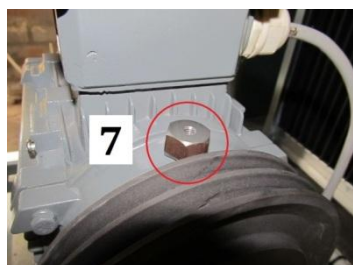
1. ÁBRA - SZENZOROK FOGLALATAI A VENTILÁTOR NEM MEGHAJTOTT OLDALÁN



2. ÁBRA - SZENZOROK FOGLALATAI A MOTOR NEM HAJTÓ OLDALÁN



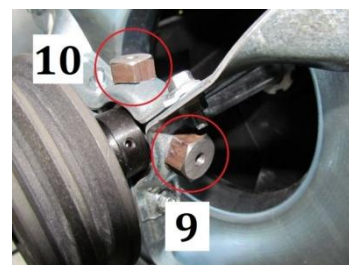
3. ÁBRA – SZENZORFOGLALAT A MOTOR HAJTÓ OLDALÁN FÜGGŐLEGESEN



4. ÁBRA – SZENZORFOGLALAT A MOTOR HAJTÓ OLDALÁN VÍZSZINTESEN



5. ÁBRA – SZENZOROK FOGLALATAI A VENTILÁTOR MEGHAJTOTT OLDALÁN



A berendezés direktmeghajtásos részén 5 szenzort helyeztünk el a 2. táblázat felsorolt pozíciókban.

2. TÁBLÁZAT - SZENZOROK A LÉGTECHNIKA DIREKTMEGHAJTÁSOS RÉSZÉN

Sorszám	Pozíció
11	a motor nem lapátos oldalán függőlegesen
12	a motor nem lapátos oldalán vízszintesen
13	a motor nem lapátos oldalán tengellyel párhuzamosan
14	a motor lapátos oldalán függőlegesen
15	a motor lapátos oldalán vízszintesen

FELMÉRT HIBÁK

A légtechnika ékszíjas részén összesen 13 hibát, illetve referencia gyanánt a hibátlan működést mértünk fel, ezeket az 3. táblázat foglalja össze.

3. TÁBLÁZAT – FELMÉRT HIBÁK A LÉGTECHNIKA ÉKSZÍJAS RÉSZÉN

Sorszám	Hiba neve	Mérések száma
1	a befűvő ventilátor ékszíja laza	1
2	a befűvő ventilátor ékszija fellazulási hiba	2
3	a befűvő ventilátor ékszija szakadása, 1 szíjjon	1
4	a befűvő ventilátor ékszija szakadása, 2 szíjjon	1
5	a befűvő ventilátor hajtása rögzítése fellazulása	1
6	a befűvő ventilátor talpazata fellazulási hibája	2
7	a befűvő ventilátor kiegyensúlyozási hibája	3
8	a befűvő ventilátornál félig zárva van a zsalu	1
9	a befűvő ventilátornál a zsalu teljesen zárva	1
10	a befűvő ventilátor légáramlási hiba, a külső rács, vagy a kalorifer eltömődött	2
11	a befűvő ventilátor légáramlási hiba, a szerkezeti elem lelazult	1
12	a befűvő ventilátor légáramlási hiba, a zsalu nem nyit ki	2
13	a befűvő ventilátor motorjának csapágy hibája	2
(14)	(referencia)	(4)

Külön vettük a különböző laza ékszíjak okozta hibákat, különösen amiatt, hogy a korábbi tapasztalatok alapján az első laza ékszíjas mérés szinte megkülönböztethetetlen volt a referenciától. Gyakorlatilag teljesen hibátlanak tűnik a rendszer működése, mely abból ered, hogy a meglazítás mértéke nem befolyásolta azt. Hasonlóan jártunk el a zsalu zártsági állapotainál is.

Így 10 szenzoros mérésnél 7 hibára végeztünk 1 mérést (1, 3, 4, 5, 8, 9, 11), 5 hibafajtánál 2 mérést (2, 6, 10, 12, 13) és 1 hibánál 3 mérést (7). Itt referencia céljából 4 mérés történt, melyet a későbbiekben 14-essel jelölünk. Mivel egy hibafajtából kevés mérés történt, így a többszörösen felmért hibák minden mérését felhasználtuk a tanuláshoz.

A légtechnika direktmeghajtásos részén összesen 9 hiba (plusz a hibátlan működés) volt felmérve, melyeket a 4. táblázatban foglaltunk össze

4. TÁBLÁZAT - HIBÁK A LÉGTECHNIKA DIREKTMEGHAJTÁSOS RÉSZÉN

Sorszám	Hiba neve	Mérések száma
1	az elszívó ventilátor hajtása rögzítése fellazult	1
2	az elszívó ventilátor zsaluja félig zárva van	1
3	az elszívó ventilátor zsaluja teljesen zárva	1
4	elszívó ventilátor talapzat fellazulási hiba	1
5	elszívó ventilátor kiegyensúlyozási hiba	3
6	elszívó ventilátor légáramlási hiba, zsalu nem nyit ki	2
7	elszívó ventilátor légáramlási hiba, a szerkezeti elem lelazult, zörög, rezeg	1
8	elszívó ventilátor légáramlási hiba, a külső rács vagy a kalorifer eltömődött	2
9	elszívó ventilátor motorjának csapágy hibája	2
(10)	(referencia)	(4)

A berendezés ezen részén 5 hibánál végeztünk 1 mérést (1, 2, 3, 4, 7), 3 hibánál 2 mérést (6, 8, 9), és 1 hibánál 3 mérést (5). Itt is referencia céljából 4 mérés történt, melyet a későbbiekben 10-essel jelölünk.

Egy-egy mérés kb. 60 másodpercig tartott. Ezekből a mérésekből 20 másodperctől 50 másodpercig tartó intervallumból kivettünk 50 darab véletlen 5 másodperces mintát. Az 5 másodpercet elég hosszúnak tartottuk ahhoz, hogy stabil eredményt kapjunk a frekvenciákra. Ezzel a 10 szenzoros méréseknél összesen 1200 darab mintánk lett: minden hibaosztályból legalább 50, némelyikből több is, és referenciából 200.

A FOURIER-TRANSZFORMÁCIÓ

Legyen az f függvény Lebesgue-integrálható az I intervallumon. Ekkor f Fourier-transzformáltja az

$$Ff = \int_I f(t)e^{-2\pi ixt} dt$$

függvény.

A Fourier-transzformációnak diszkrét változata is van:

$$Ff = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n)e^{-2\pi ixn}$$

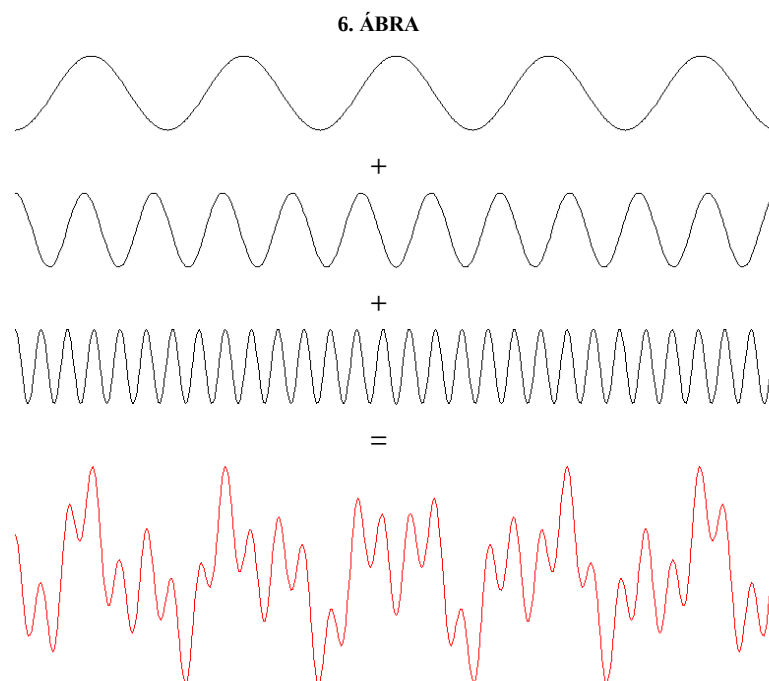
A Fourier-transzformáció egy módszer, hogy egy jelet feldaraboljunk az alkotó frekvenciáira, különböző verzióit használhatjuk mobiltelefon és Wi-Fi jelek generálására, szűrésére, hang-, kép- és videó fájlok tömörítésére, differenciálegyenletek megoldására, és még sok minden másra.

A Fourier-transzformáció három variációban érhető el: az egyszerű régi Fourier-transzformáció, a Fourier-sor, és a diszkrét Fourier-transzformáció (DFT). 1965-ben James Cooley, és John Tukey informatikusok megalkottak egy algoritmust, a gyors Fourier-transzformációt (fast Fourier-transform, FFT), ez jelentősen megkönnyítette a DFT számítását számítógépen. Hirtelen a DFT lett az általános módszer digitális jelfeldolgozásnál.

Hogy megértsük mit is csinál a DFT, gondoljunk egy MP3 lejátszóra, amit csatlakoztatunk egy hangszóróhoz. Az MP3 lejátszó hangadatot küld a hangszórónak, ez az elektromos jel feszültség-ingadozása. Ezek az ingadozások okozzák a hangszóró membránjának vibrálását, ami megmozgatja a levegő részecskéit, így hang keletkezik.

A hang jel ingadozásai az idő során ábrázolhatók grafikonként: az „x” tengely az idő, és az „y” tengely az elektromos jel feszültsége, esetleg a hangszóró membránjának, vagy a levegő részecskéinek a mozgása. Ezekben az esetekben a jel végül úgy néz ki, mint egy kiszámíthatatlan hullámszerű görbe, de amikor meghallgatjuk a hangot amit ebből az összevisszaságból készítünk, tisztán kivehetővé válnak a hangszerek egy szimfonikus zenekarból, amint különböző hangot játszanak egy időben.

Ez azért van, mert ez az összevisszaság valójában sok lényegesen egyszerűbb hullámszerűség összege, amik a hangnak különböző frekvenciáit reprezentálják. A 6. ábrán jól látható, hogy hogy néz ki több különböző frekvenciájú jel összege.



A DFT ugyanazt csinálja matematikailag, amit az emberi fül fizikailag: szétbontja a jelet az alkotó frekvenciákra. Az analóg jellel ellentétben a digitális jel az MP3 lejátszóból csak számok sorozata, amelyek egy-egy pontot reprezentálnak a görbéből.

Esetünkben a mozgásszenzorok a fent említett hangadathoz hasonló adatsorokat szolgáltatnak, amik ugyanúgy különböző frekvenciájú rezgések összegei.

GYORS FOURIER-TRANSZFORMÁCIÓ

A DFT számsorozatokot bont szét különböző frekvenciájú komponensekre. A definíció szerinti számítása gyakran túl lassú a gyakorlati alkalmazáshoz. Az FFT hatékony algoritmus a DFT, és ennek inverzének számítására. Sok különböző FFT algoritmus létezik, amik a matematika különböző ágait ölelik körül a komplex aritmetikától a csoportelméleten át a számelméletig.

Ha definíció szerint számítunk DFT-t N ponton, akkor ez $O(N^2)$ aritmetikai műveletet igényel, viszont egy FFT ugyanezt az eredményt adja $O(N * \log N)$ művelettel, ez kifejezetten nagy N esetén jelent látványos sebességnövekedést.

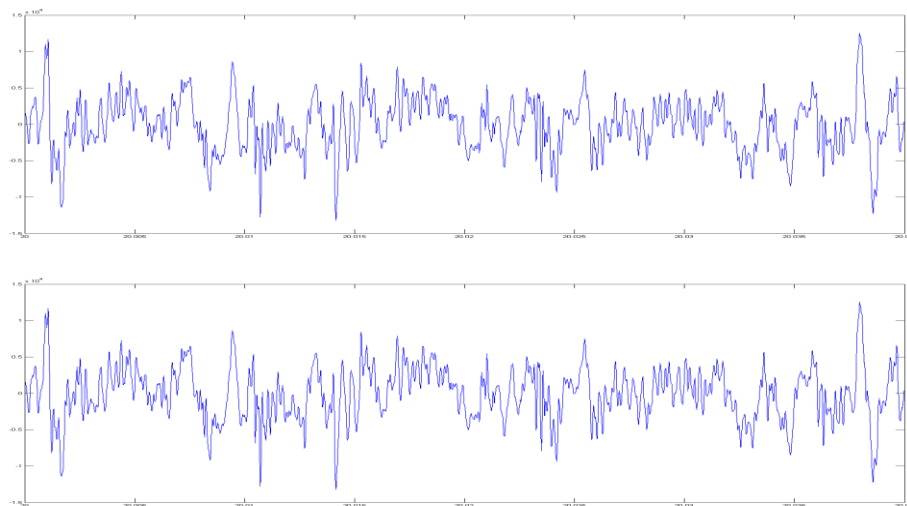
Az FFT-k közül messze a legelterjedtebb a Cooley-Tukey algoritmus. Ez az „Oszd meg és uralkodj!” elven alapul: minden lépésben két $N/2$ méretű részre osztja a feladatot. Annak ellenére, hogy az alapötlet rekurzív, a mindennapi implementációkban általában elkerülik a rekurziót, és szekvenciális ismétléssel oldják meg ugyanezt a feladatot, így is gyorsítva a működést.

EDDIGI MÉRÉSEINK

A szenzorok főként a forgástengelyek közelében lettek elhelyezve, melyekkel várhatóan a forgásokban bekövetkező hibák könnyedén érzékelhetők lesznek (főként ilyenekre koncentrálnak a hibák detektálásánál). Ilyen típusú mozgásnál a gyors Fourier-transzformáció (FFT) által kapott sorok jól jellemzik a változásokat. Így az első lépésben ezen sorok elemzésére koncentráltunk.

Először megvizsgáltuk a helyesen működő gép adatsorait. A 7. ábrán erre látunk példát. Mindkét esetben egy 4 század másodperces intervallumot vettünk az 50Hz-en működő gép jeleiből. Ez elég kicsi ahhoz, hogy például a motor frekvenciája látható legyen rajta.

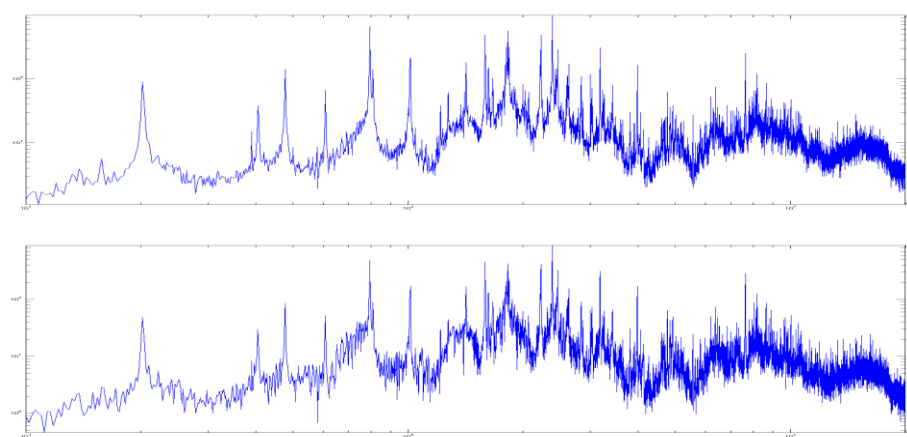
7. ÁBRA



Mint látható, mindkét jel erősen terhelt „zajjal”. De talán láthatóak rajta jellemző periodikus viselkedések is. Természetesen erről az FFT adatsorok sokkal részletesebb képet adnak. Megjegyzendő, hogy van egy olyan érdekes (egyelőre a berendezés saját tulajdonságának tulajdonított) jelenség, hogy a jelek nagysága elég erős ingadozást mutat kb. 20 másodperces periódussal – mintha a meghajtó motor nem egyenletesen 50Hz-en járna – amely a mozgás nagyságára vonatkozó elemzési lehetőségeket nehezzé teszi. Ez az ingadozás a nagyobb frekvenciákban jobban kivehető, de a kicsikben is megtalálható.

Ezek után az FFT adatsorokkal foglalkoztunk. Először megnéztük azt, hogy hogyan néz ki a referencia mérés adata. Továbbá megvizsgáltuk, hogy ezen információ milyen mértékben változik az idő folyamán. Vettünk a kb. 60 másodperces mérés közepéből 5-5 másodperces időintervallumokat és megvizsgáltuk ezen idősorok FFT adatainak a szórását. A 8. ábrán látható erre egy példa.

8. ÁBRA



Mint látható, a referenciában jól fellelhetők csúcsok. Ezeket a meghajtó motor frekvenciájával és az áttételekkel létrejött frekvenciákkal azonosítottuk. Bízunk abban, hogy a hibás működés esetén a csúcsok helyzete, illetve az általuk jelzett energia nagysága fog megváltozni.

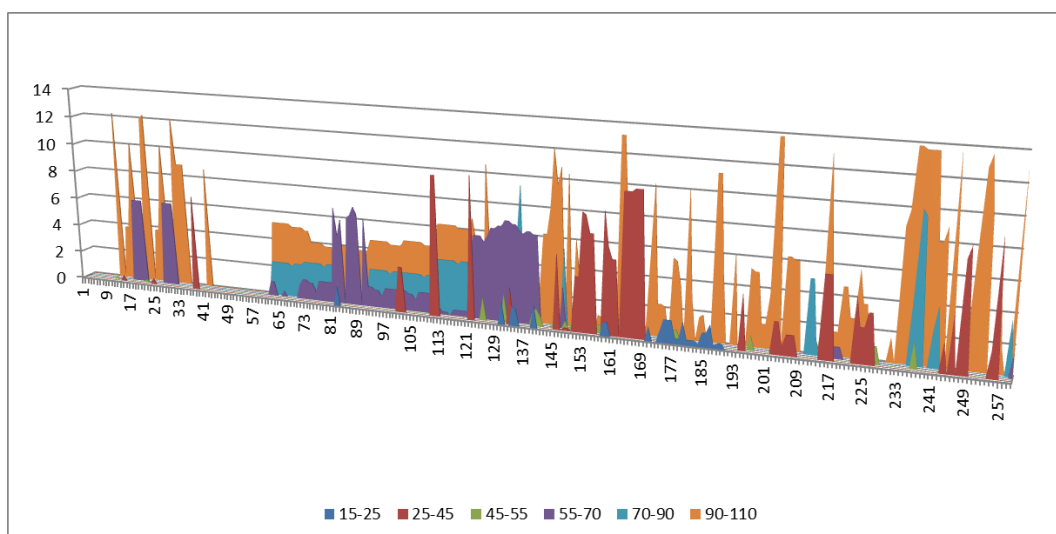
Ennek igazolására az alábbi számításokat végeztük el. Vettük az összes 10 szenzoros mérést. Ezek a befűvő ventilátor környékén létrejövő hibák esetén voltak alkalmazva. Ezen 10 szenzor mindegyike a motor és a ventilátor környékén volt elhelyezve. Kivettünk egy referencia adatot, illetve vettük az FFT-ben az alábbi frekvencia tartományokat:

- 15-25 Hz.
- 25-45 Hz.
- 45-55 Hz. (motor)
- 55-70 Hz.
- 70-90 Hz. (lapát)
- 90-110 Hz.

Ezen tartományokban megkerestük a maximális energiával rendelkező frekvenciát, és megvizsgáltuk, hogy mekkora eltérést mutat a kiválasztott referenciához képest. Mindegyik tartományban 5-8 Hz eltérést még elfogadhatónak vettük, csak az e fölötti eltérés nagyságát vettük figyelembe.

A 9. ábra mutatja a kapott tűréshatár feletti eltérést a légtechnika ékszíjas részében.

9. ÁBRA



A 6 adatsor mutatja a különböző tartományokban a frekvencia eltérést Hertzben. A függőleges tengelyen a tűrés feletti eltérés nagysága látható. A vízszintes tengelyen a fenti 26 adat (6 referencia és 20 hiba a fenti sorrendben) 10-10 szenzorja látható.

Mint látható a referenciához képest a többi adat többsége a tűréshatáron belül volt. A kivételes 2. és 3. referencia is főként csak a 90-110 Hz-es tartományon mutatott eltérést. Míg a hibák többségénél már a kisebb frekvenciák esetén is látható eltérés. Érzésünk szerint ez az eljárás több hiba detektálására is alkalmas lesz.

Az elemzések előtt érdemes megnézni, hogy van-e lehetőség esetleg az adatok tisztítására. Pl. a visszhangok szűrésére, melyre a mérnökök csináltak méréseket, de sajnos egyelőre nem bízhatóak. Ezek után a feladatunk az lesz, hogy meghatározzuk a lényeges frekvencia tartományokat, majd meghatározzuk a tűréshatár nagyságát. Majd ezen információk ismeretében meghatározni azon szenzorok halmazát, ahol ezen eltérések a leginkább mutatkoznak. Ezek ellenőrzésében sokat segíthet még az áthallásos mérések vizsgálata is. Mivel csak az 50 Hz-es frekvenciaváltós adatokat vizsgáltuk, így a többit is meg kell még vizsgálni. Hátra van még az elszívó direktajtásos hasonló vizsgálata is rész (ezek általában 5 szenzoros mérések voltak).

A DETEKTÁLÁS ALAPJAI

Az előzetes tapasztalatok alapján látható, hogy a domináns frekvencia értékek jelentős mértékben változnak a hibák esetén, így főként ezekre fogunk koncentrálni. A 20 Hz alatti tartomány – a mérőműszer tulajdonságai miatt is – teljes egészében használhatatlannak tűnt, így ezt nem vettük figyelembe. Azaz kézenfekvő ötletnek bizonyult, hogy a Fourier transzformált adatsorát tekintsük a jelsornak. Ez gyakorlatilag megmutatja azt, hogy milyen frekvenciában mekkora energia rejlik.

Mivel fix hibákat kell detektálni a jelsorban így olyan algoritmust választottunk, mely hatékonyan tudja a jelsorokat osztályozni. Egy új készülék esetén nem várható az, hogy azonnal rendelkezni fogunk hibás adatsorokkal, ezért korábbi tapasztalatok alapján fogunk kezdetben osztályozást végezni. De jogos igény az, hogy a később bejött rosszul detektált hibákra könnyedén újra lehessen tanítani a rendszert. Ezért esett a választásunk a neuronhálókkal való osztályozásra.

Arra, hogy mely frekvenciatartományokat vizsgáljuk, két alapvető ötlet vázolódott fel bennünk.

Az első az, hogy nézzük meg a *jellemző értékek körüli tartományokat*. Ekkor minden új rendszernél fel kellene mérni (vagy kiszámolni), hogy melyek ezek az értékek. Továbbá ebben az esetben egy új rendszernél, pl. csak egy kis ékszíj kerék cserénél is teljesen használhatatlanná válna egy korábbi ismeret. Továbbá az új megjelenő frekvenciák miatt teljesen át kellene állítani a rendszert. Ez kicsit nehézkesnek tűnik, de nem lehetetlen, így első sorban nem erre koncentrálnunk.

Sokkal kezelhetőbbnek tűnik az, amikor veszünk *elég sűrű tartományokat*, melyek teljes egészében lefedik a vizsgálni kívánt frekvenciákat. A választott detektáló algoritmus eleve képes lesz megtalálni a lényeges tartományokat, és figyelmen kívül hagyni a lényegteleneket.

Egyeztetések alapján lehetséges változatok lehetnének még az alábbiak:

- a magasabb tartományokat is bevenni nagyobb beosztásban;
- nem csak a legmagasabb csúcs helyét, hanem a környezetének a tulajdonságát;
- a vizsgált frekvenciában rejlő energia értéke;
- a gyorsulás abszolút értékének maximuma/összege/szórása.

Mivel látni fogjuk, hogy a fenti egyszerű módszer is elég hatékonynak mondható, így egyelőre ez utóbbi változatokat nem vizsgáltuk.

A NEURONHÁLÓ

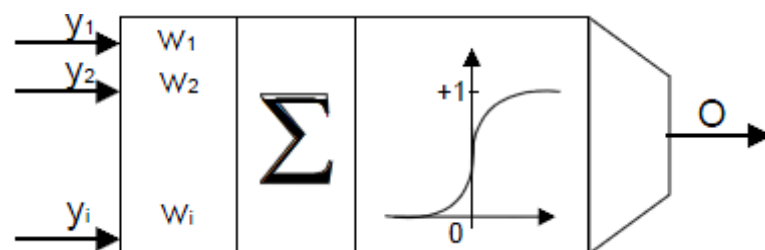
A mesterséges neurális hálózatok párhuzamos feldolgozást végző adaptív dinamikus rendszerek, melyek eredete a biológiai rendszerektől származik és hatékonynak bizonyultak komplex feladatok megoldásánál. Az alapgondolat még a 40-es évekből származik (Hebb, 1949). 1958-ban Rosenblatt feltalálja a Perceptront, majd Widrow és munkatársai kifejlesztik a Adaline (1960), majd 1982-ben Hopfield publikálja az ún. Hopfield hálózatot. Rumelhart (és társai) nevéhez fűződik az 1986-ban publikált és a későbbiek folyamán széleskörben elterjedt ún. backpropagation algoritmus.

Bizonyos alkalmazási területeken, ahol más megoldás nem vezetett eredményre, a neurális hálózatok alkalmazásának komoly előnyei vannak. A neurális hálózatokat sikerrel alkalmazták a felismerési- és optimalizálási feladatoknál, valamint a nemlineáris rendszerek modellezése-, irányítása- és identifikációja esetében (mivel képesek tetszőleges nemlineáris leképezések approximációjára).

A neurális hálózatok tanulási algoritmussal rendelkeznek (learning algorithm), intelligens, valós idejű (real-time) algoritmusok. A neurális hálózatok egyfajta adaptív működést valósítanak meg és nincs szükség sem a rendszer matematikai modelljének sem a paramétereinek ismeretére, mivel a neurális hálózat, a tanítási fázisban, a bemeneti és a kimeneti megkívánt minták alapján a hálózat paramétereit módosítja a kívánt leképezés megvalósítása érdekében.

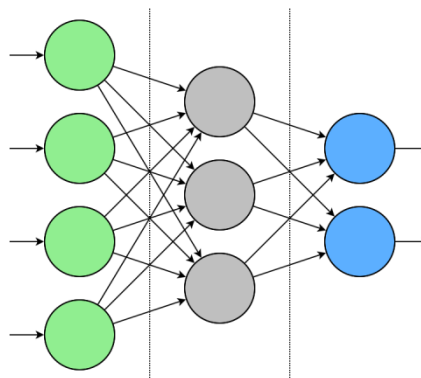
A neurális hálózat műveleti eleme a neuron több-bemenetű és egy-kimenetű nemlineárisan viselkedő eszköz. A neuron nemlineáris viselkedését az ún. aktivációs függvény biztosítja.

10. ÁBRA - EGY NEURON ELVI FELÉPÍTÉSE



A neurális hálózatban használt összeköttetések egyirányú jelterjedést tesznek lehetővé. Egy kimenet több bemenettel összeköthető, de a kimenetek egymással nem köthetők össze. A neuronokat rétegekbe (layer) szervezzük. Ezeket a rétegeket felosztjuk bemeneti rétegre (input layer), rejtett rétegre (hidden layer) és kimeneti rétegre (output layer).

11. ÁBRA - PÉLDA EGY HÁROMRÉTEGŰ NEURONHÁLÓRA



AZ EREDMÉNYEK

A kísérletezéshez a MATLAB rendszer neural network toolbox-át használtuk. A toolbox klaszterező beállításait használtuk. A neuronháló tanítását a mintavételezett 1200 adatsor 70%-án tettük meg (ez az alapbeállítás), melyek véletlenül lettek kiválasztva. Majd 15%-ot validálásra és 15%-ot tesztelésre használtunk.

A korábban felsorolt összes hibát megpróbáltuk egyszerre detektálni és elkülöníteni a referenciától. Különböző szenzorokat figyelembe véve kíséreltük meg ezeket. Az 5. táblázat tartalmazza az első eredményeket. Ennek soraiban találhatók a különböző szenzorhalmazokkal elért eredmények. A szenzorokat néztük egyesével, illetve a szenzor „szigetek” kombinációit vizsgáltuk. Az oszlopokban láthatók a hibák a korábban megadott hibakódokkal (referencia jel a 14-es). A táblázat számai megadják, hogy az adott szenzorhalmazzal az adott hiba milyen arányban volt jól detektálható.

5. TÁBLÁZAT - A KÜLÖNBÖZŐ SENZOROKKAL JÓL DETEKTÁLT HIBÁK SZÁZALÉKOS ÉRTÉKE AZ ÉKSZÍJAS MEGHAJTÁSÚ LÉGTECHNIKA ESETÉN

Szenzor\Hibák	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Átlag
1	0	60	56	100	40	49	69	42	84	59	48	64	83	77	59,4
2	84	75	64	84	74	60	76	62	70	52	62	64	74	70	69,4
3	80	73	74	82	82	51	79	46	38	79	12	52	67	83	64,1
4	68	85	98	98	50	60	57	78	80	54	26	62	81	68	68,9
5	46	74	78	100	86	62	71	50	98	58	30	67	82	76	69,9
6	100	68	14	100	88	67	67	72	84	65	0	55	86	71	66,9
7	72	75	74	100	84	67	65	64	94	64	48	70	84	70	73,6
8	76	74	58	100	72	75	66	58	90	45	68	49	72	73	69,7
9	62	66	66	100	62	64	77	60	86	57	62	66	91	80	71,4
10	60	76	66	100	48	64	79	82	74	65	68	48	91	75	71,1
1, 2	34	79	74	0	86	67	90	74	84	82	50	73	88	75	68,3
1, 3	74	76	78	100	90	66	80	78	72	86	24	76	88	77	76,1
2, 3	92	68	70	88	74	56	63	72	78	69	34	73	83	72	70,9
1, 2, 3	82	69	88	100	94	60	88	76	92	74	66	75	83	87	81,0
4, 5	78	84	98	86	100	71	74	88	90	58	32	75	93	71	78,4
4, 6	88	89	96	98	88	0	75	88	94	64	82	74	0	79	72,5
5, 6	94	76	66	100	92	76	91	90	86	70	40	61	86	80	79,1
4, 5, 6	88	89	94	98	100	82	79	96	98	73	42	74	97	77	84,8
7, 8	96	72	84	94	100	82	85	84	94	51	18	65	87	88	78,6
9, 10	56	81	88	0	92	70	77	76	96	57	42	83	91	65	69,6
1, 3, 5, 6, 7, 9	100	87	100	98	100	90	89	68	98	77	54	84	88	85	87,0
1-10	100	85	98	100	100	91	85	100	100	96	74	91	92	85	92,6

Az elvárt eredményeket nagyjából hozta ez a kísérlet. Például a 11-es, „Befűvő ventilátor légáramlási hiba, a szerkezeti elem lelazult” volt a legrosszabban detektálható hiba. Hasonlóan rossz arányt ért még el a „Befűvő ventilátor légáramlási hiba, külső rács vagy a kalorifer eltömődött” hiba (10).

A legjobban detektálható hibák a „Befűvő ventilátor ékszíj szakadás 2 szíj” (4), a „Befűvő ventilátor hajtás rögzítés fellazulás” (5), „Befűvő ventilátor/zsalu teljesen zárva” (9) és a „Befűvő ventilátor motorjának csapágy hibája” (13). Érdekes, hogy a legjobban detektálható „ékszíj szakadás, 2 szíj” néha teljesen detektálatlan lett. Ezt általában a „Befűvő ventilátor laza ékszíj” (1) hibával keverte össze a tanuló algoritmusunk.

Talán magyarázat lehet az, hogy ebben az esetben a hiba ellenére a gép fele teljesen hibátlanul működik, azaz a lényeges frekvenciák jórészt rendben voltak.

Az átlag oszlopban látható, hogy az egyes szenzorok és szenzorcsoportok milyen arányban adtak helyes eredményt.

A direkt meghajtásos légtechnikánál is hasonlóak mondhatók el, mint az ékszíjas meghajtás esetén. A 6. táblázat a fentihez hasonló módon összegzi, hogy az adott szenzorhalmazzal az adott hiba milyen arányban volt jól detektálható (referencia jel a 10-es).

6. TÁBLÁZAT - A KÜLÖNBÖZŐ SZENZOROKKAL JÓL DETEKTÁLT HIBÁK SZÁZALÉKOS ÉRTÉKE A DIREKTMEGHAJTÁSÚ LÉGTECHNIKA ESETÉN.

Szenzor\Hibák	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Átlag
11	54	68	90	66	74	75	40	65	74	96	70,2
12	72	74	98	78	83	79	20	86	81	97	76,8
13	70	84	94	66	63	65	54	50	86	91	72,3
14	80	70	94	74	63	66	10	19	73	87	63,6
15	62	82	96	64	64	63	28	74	81	93	70,7
11, 12	92	70	100	72	89	75	52	91	90	99	83
11, 13	88	90	86	70	83	85	64	83	90	95	83,4
12, 13	88	84	94	86	79	63	60	87	94	97	83,2
11, 12, 13	94	78	84	78	89	88	72	82	96	99	86
14, 15	88	82	100	84	85	72	60	60	84	97	81,2
11, 13, 15	86	86	94	98	89	83	62	92	98	96	88,4
11-15	92	100	86	100	95	90	76	95	95	99	92,8

A legjobban detektálható hibák a „Elszívó ventilátor, zsalu teljesen zárva” (3), „Elszívó ventilátor motorjának csapágy hibája” (9) és a „Elszívó ventilátor hajtás rögzítés fellazulás” (1) hibák voltak. Ezek mondhatók a rendszer működését leginkább befolyásoló hibáknak, azaz a jó arányú detektálás elvárható volt.

Talán a vártaknak ellentmond, hogy a legrosszabbul detektálható hiba itt a „Elszívó ventilátor légáramlási hiba, szerkezeti elem lelazult, zörög, rezeg” (7) volt. Bár magyarázható lehet azzal, hogy a hiba és a zörgés valószínűleg a lazult elemtől jön, amely messze volt a szenzoroktól. Továbbá a működést nem nagyon befolyásoló tényező is lehet zörgő.

A részletes eredményeket a mellékletek tartalmazzák, melyek mindegyike az adott szenzorhalmazokhoz tartozó „Classification confusion matrix”. A sorok és oszlopok tartalmazzák a hibákat és a referenciákat. A sorok tartalmazzák a cél hibát (target), azaz, hogy a minta melyik hibából került ki. Az oszlop pedig azt mutatja meg, hogy az algoritmus melyik hibaosztályba osztályozta ezt (output). Minden egyes mező megmondja, hogy mennyi minta is került abba. Azaz, hány minta került ki a sor által megadott hibából és az oszlop által megadott osztályba mennyi lett osztályozva. A helyesen detektált

elemek száma a főátlóban helyezkedik el. Minden más nullától eltérő szám a táblázatban a nem helyesen detektált minták számosságát adja meg. Megjegyzendő, hogy a sorok összege visszaadja az adott hibából vett minták nagyságát, melyek 50 többszörösei. Általában 50, de például a referenciáknál 200. Hogy ez jobban látható legyen, ezért hagytuk itt meg a tényleges értékeket és nem a %-os megadást választottuk.

Ezeket megvizsgálva látható, hogy alapjába véve 1-1 szenzor is elég jó eredményeket tud produkálni. Természetesen vannak jobb és rosszabb szenzorok. Pl. a 7-es szenzor (motor hajtott oldalán függőlegesen) önmagában is elég jó. Összességében a vártak megfelelően a 10 szenzoros hozza a legjobb eredményeket.

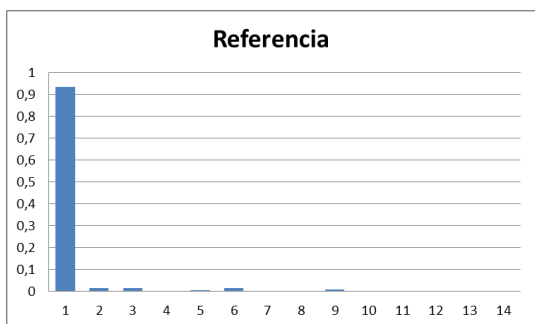
VAK TESZTEK

A fenti eredményeket azokon az adatsorokon kaptuk, amelyekkel a neurális hálózatot tanítottuk. Fontos kérdés az, hogy az eljárásunk egyáltalán helyes-e abban az értelemben, hogy azt tanulta-e meg, amit szerettünk volna. Azaz, a hiba jellemzőjét tanultuk-e meg, vagy valami más tulajdonságát az adatsornak. Ez egy elég komoly veszély a neuronhálók esetén, így elvégeztünk néhány „vak tesztet”, azaz olyan mérések adatsorait kaptunk, amelyekről nem mondták meg, hogy mi volt a hiba, nekünk kellett vakon kitalálni. A vak tesztek során felmért hibák különböznek a fentiektől, ezek sorszámai láthatók a következő táblázatban.

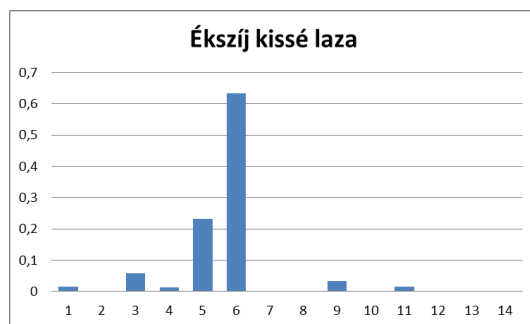
Sorszám	Hiba
1	Referencia
2	Befűvő ventilátor zsalu nem nyit ki
3	Befűvő mindkét motor csapágyszross mindkét ventilátor csapágyszross
4	Befűvő ventilátor szakadt ékszíj
5	Befűvő ventilátor kissé laza ékszíj
6	Befűvő ventilátor nagyon laza ékszíj
7	Befűvő ventilátor motorjának csapágyszhibája
8	Befűvő ventilátor ékszíj fellazulási hiba
9	Befűvő ventilátor motor tárcsa felőli csapágyszross, ventilátor tárcsa felőli csapágyszross, másik kettő csapágyszjó
10	Befűvő ventilátor légáramlási hiba, zsalu nem nyit ki
11	Befűvő ventilátor talapzat fellazulási hiba
12	Befűvő ventilátor kiegyensúlyozási hiba
13	Befűvő ventilátor légáramlási hiba, külső rács vagy kalorifer eltömődött
14	Befűvő ventilátor légáramlási hiba, szerkezeti elem lelazult, zörög, rezeg

7. TÁBLÁZAT - A VAK TESZT SORÁN FELMÉRT HIBÁK SORSZÁMAI

Az alábbi diagramok egy-egy vak teszt eredményét mutatják. Ezek során minden szenzor fel lett használva, minden tartományban simítva van az FFT 9 széles átlagoló szűrővel, és minden tartományban normáltuk az FFT értékeket.



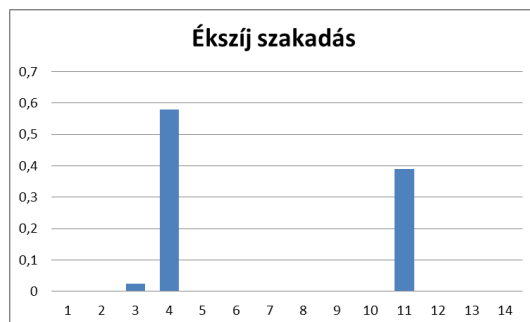
Mint látható, referenciamérés esetén 93%-ban helyes eredményt kaptunk



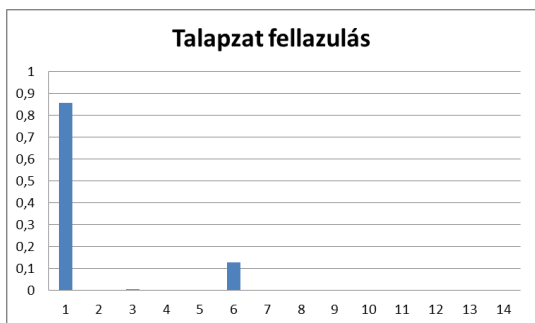
Kissé laza ékszíj esetén 23%-ban kaptunk helyes eredményt, 63%-ban nagyon laza ékszíj hibát detektált a rendszer.



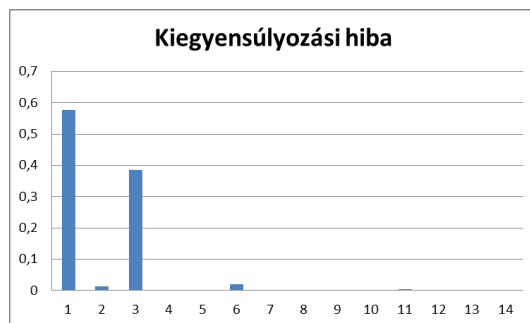
Nagyon laza ékszíj esetén 83%-ban helyes eredményt kaptunk.



Ékszíj szakadás esetén a helyes eredmények aránya 58%, viszont 40%-ban talapzat fellazulási hibát érzékelt a rendszer



Talapzat fellazulás esetén a rendszer 85%-ban hibátlannak titulálta a berendezést, 13%-ban nagyon laza ékszíj hibát detektált.



Kiegyensúlyozási hiba esetén 58%-ban hibátlan működést, 39%-ban csapágy hibát észlelt a rendszer.

AMI MÉG HÁTRA VAN

TOVÁBBI TESZTELÉSEK

A vak tesztekben látható, hogy egyes esetekben a hiba észrevétlen maradt, ezért további tesztek szükségesek. A neurális hálózat nemcsak a hiba jellemzőit tanulta meg, hanem más tulajdonságokat is, ezért további méréseket kell végezni és ezekkel újratanítani a hálót.

KÖLTSÉGCSÖKKENTÉS

A szenzorok számának minimalizálása az egyik fontos feladatunk. Mivel a rendszer nemcsak tudományos célokat szolgál, hanem kereskedelmi forgalomba is fog kerülni, fontos a költségminimalizálás, ezáltal a termék versenyképességének biztosítása. Könnyen belátható, hogy fölösleges 10 szenzor helyett 100-at használni, ha 10 szenzorral is elég pontos méréseket lehet végezni. Jelenleg még folyik a kutatás a minimális szenzorhálózat meghatározására.

A további vizsgálatokkal, a szenzorok minimalizálására a statisztikai modellalkotásban megszokott technikákkal meg fogjuk azt mondani, hogy mely szenzorok elhagyásával minimalizálható a rossz detektálások száma. Reményeink szerint ezen eredményekkel jó irányelveket lehet majd adni a telepítéshez, hogy hova is legyenek elhelyezve szenzorok.

FELHASZNÁLÓI FELÜLET

Elengedhetetlen egy könnyen áttekinthető grafikus felhasználói felület (GUI) készítése. Mivel a rendszert nem csak szakértők számára fejlesztjük, így feltehető, hogy a végfelhasználó nem – vagy csak nehezen – érti meg például a mellékletekben látható táblázatokat. Nagy vonalakban már van elképzelésünk a GUI milyenségéről.

A megrendelő ragaszkodik a Windows operációs rendszerrel való kompatibilitáshoz, és elzárkózik a webes felület gondolatától, így – magunkat is kímélve a nehézségektől – a választás a C# nyelvre esett. A Microsoft Visual Studio fejlesztői környezet nagymértékben megkönnyíti a programozó dolgát GUI készítés terén, így ezzel a választással gyorsan és könnyedén elkészíthetjük a felhasználói felületet, ezzel is több időt adva magunknak a háttérben dolgozó algoritmusok javítására, a további tesztekre.

ÖSSZEFOGLALÁS

Látható, hogy a vázolt alap meggondolás is egy jól osztályozó algoritmust eredményezett. A tapasztalatunk szerint a vizsgált frekvenciatartomány elegendőnek tűnik, még a magas frekvencián megjelenő hibák esetén is. A felbontás is elég hatékornynak látszik. A nyitott kérdések irányában érdemes egy-egy kísérletet tenni. Például a szenzorok árának minimalizálása érdekében érdemes lehet megvizsgálni, hogy mi a minimális szükséges mintavételezés, illetve milyen felbontású szenzort kell alkalmaznunk.

MELLÉKLETEK

Az adott szenzorhalmazokhoz tartozó „Classification confusion matrix”. A sorok tartalmazzák a cél hibát (target), az oszlopok pedig azt, hogy az algoritmus melyik hibasztyába osztályozta az adott jeleket (output).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1			9	6	2	5	3	5	2	2		6	3	7
2		60		3		12	6		5		2	8		4
3		2	28			1		7	4	3				5
4				50										
5			8		20	5		6	5				4	2
6		10		2		49	19		3	1		9		7
7		7	1	1		7	103			7	5	8		11
8				4		1	9	21	12			2		1
9							3	5	42					
10			3	2		6	4	1		59	4	15	3	3
11							12	1		2	24	9		2
12						1	12			12	4	64		7
13				2	2		2		2	4	2	3	83	
14		3	4	1		10	14		1	9	4	1		153

1. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	42		4				2		2					
2		75		5		1	10	2				2		5
3			32		5	2		10					1	
4	2			42				3	1			2		
5		1			37		6	6						
6		5	7	2		60	7			5		4	6	4
7	1	9				2	114	3	2	3	4		1	11
8	4	3					1	31	4		2	5		
9	5		4		2		3	1	35					
10	3		8	4	4		11		3	52	1	9	1	4
11		4	2					6		2	31	4		1
12	1	6	1			2	6	1		6		64	1	12
13		3		1			2	3	14				74	3
14	2	1	11	3		2	21	6	1	7	1	6		139

2. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	40	2			4			1	1					2
2		73	2			11	7			1		2		4
3	7		37		2				3				1	
4				41				1	3				4	1
5					41	2		1	6					
6	4	11				51	14		2	3		8		7
7		4				7	118		4	1		2		14
8	1	2	4		2	3		23	11	2		2		
9	4		13		2	1		10	19	1				
10			1	1		2	8			79		5	3	1
11	4	2	1				7		2	8	6	8		12
12	3	3	12	1			16			5		52		8
13	2			4	2	13	2	1		5		1	67	3
14		7			1	2	15			4		6		165

3. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	34		12							1				3
2		85					5			2	1	4		3
3	1		49											
4		1		49										
5	6	2			25		7		6			3	1	
6		7				60	2			5		6	5	15
7	1	6				5	86			18	5	14	1	14
8					3			39	4			4		
9								3	40				7	
10		8		2			8			54		5	5	18
11						1	9			11	13	10	2	4
12	2	1					4			5	1	62	1	24
13	1					5				6	1	4	81	2
14		7			2	9	12			23		5	6	136

4. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	23		27											
2		74				4	12			2			1	7
3	10		39		1									
4				50										
5	1		2		43		2						2	
6		13		2		62	5			9			1	8
7		2	1	2		10	106	2		7		1		19
8	4	2	3		2		8	25	3					3
9									49	1				
10	2	1				7	11		1	58	1	11	2	6
11		5				2	9			6	15	3		10
12		3				1	13			1	4	67		11
13		3					1		4	3	4		82	3
14		4		2		6	20		3	9	1		4	151

5. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	50													
2		68				13	4		2	1				12
3	16		7		12		4	11						
4				50										
5					44			6						
6		12				67	6					1	3	11
7		10				4	101			1		4	6	24
8	1		5		8			36						
9			8						42					
10		12			3	2	8			65		3	4	3
11		6				3	17			15		2		7
12	3	6			2	7	17			7		55		3
13		3				3	2			2		4	86	
14		12		1	1	4	23		2	8		3	5	141

6. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	36		2	3	4			5						
2		75				10	11					1		3
3	1		37					3	9					
4				50										
5					42			6						2
6		4		2		67	20			5		1		1
7		10				8	97		1		4	8		22
8	4		1		4			32	2				4	3
9	1		2						47					
10		5			2		20			64	2	6		1
11						3	12			8	24	1		2
12		3	4	2		1	6			4		70		10
13		3	3				7				1		84	2
14		8	1			8	29			3	4	7		140

7. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	38		3		3			6						
2		74	1		1	11	7	2		1	2			1
3	6		29		7			1	7					
4				50										
5	3	3			36			3	3				2	
6		9	2		1	75	5		2		1	1		4
7		5				14	99	3		4	9	3	3	10
8	6	2	4		2	3		29	2				2	
9	2		3						45					
10		17	6			1	1		5	45	7	17		1
11						1	1			3	34	7		4
12		6	2	1	2		13			7	13	49	2	5
13		11	7		1	4			2			1	72	2
14		9	1		3	3	16	3		9	3	6	2	145

8. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	31		10		5				1	3				
2		66	5	2	5	7	6						5	4
3	2		33		1			7	6				1	
4				50										
5	2		17		31									
6	3	7	6	2	1	64	9				3			5
7	3	4	7			3	115			3	3	3	3	6
8	1		11		3	1		30	1				3	
9			3		1				43				3	
10			14	4	1		9			57	3	6		6
11			7				3		1	5	31			3
12		8					5	5		7	2	66		7
13		2				3	1	1					91	2
14			8			5	14	2	3	2	2	2	3	159

9. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	30			9				7	4					
2		76	1		3	4	15							1
3	7		33				3	4	3					
4				50										
5	7				24		4	12			3			
6		4				64	12			3	3	7		7
7	1	1		3		17	119			3				6
8	3		2	3	1			41						
9	1	2			5			3	37	2				
10		2			7		5	6		65	2	8		5
11	1				6		4			4	34			1
12	1	12		10	1		15	3		3	3	48		
13		2					4			1		2	91	
14	7	5		7		2	15	2	1	5	5	1		150

10. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	50													
2	1	85			1	2	8	2		1				
3	1		49											
4				50										
5					50									
6		3				91	1			1		1	2	1
7						1	128	2		6		5	6	2
8								50						
9									50					
10										96	2	1		1
11	1					5	1			5	37	1		
12							3			3		91		3
13		3	2						1	1		1	92	
14		4			2	8	7	1		8			1	169

1. - 10. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	41				1	3		3	2					
2	2	69				1	7			7	10			4
3			44					3	2	1				
4				50										
5					47				3					
6						60	14			3	12	3	1	7
7		4				1	132			2	3	3	1	4
8	1		1		2			38	2	6				
9	1		1		2				46					
10							13			74	4	2		7
11							5	1		1	33	5	1	4
12							8			5	5	75	1	6
13					4	1	2			3	6	1	83	
14	7	2		3			6	2	1	1	4	1		173

1. - 3. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	17	2	3		6		3	5	7				5	2
2		79				6	11					3		1
3			37		5		4	2					2	
4	18						4		4	2	2	2		18
5	3				43	3							1	
6		2	1			67	18	2		3			3	4
7		2			1	1	136	1		1	3	2		3
8	3	2	1		1			37	5					1
9		1			3				42		3		1	
10		1					9			82		6		2
11		3			1		4				25	4	6	7
12	2	3					9	2		6		73		5
13		1	2				1			1	4	2	88	1
14		8			2		24		2	12		2		150

1. ÉS 2. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	37	2			1		2	3	2			3		
2		76			2	9				1		8		4
3		5	39		1					3				2
4				50										
5	2				45				3			3	2	7
6	3	1		2		66	14			2			7	1
7	2	7	1		3	7	121							
8	2		1	1	2			39	5					
9	3			6	3				36					
10		4			4		3			86		2		2
11	7	1				5	7			12	12	4		2
12		3					4			9		76		8
13		1				1	3		4	5		3	88	
14		6	1	1		8	14				6	3	2	154

1. ÉS 3. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	46	3							1					
2		68				7	3		3	5		7	1	6
3	4		35	1	6			1	2				1	
4				44				3				3		
5		2		4	37			5	2					
6		10		2	3	56	4	4		5		8		8
7	3	12		1		2	94		6	7		7	1	17
8			1		4			36	5			2		
9			2	6	2				39			1		
10		4		1					3	69		17		6
11		4	1			3	4			1	17	15		5
12						2	4			9	3	73	1	8
13	3	3				2	1		4			3	83	1
14	2	11		1		7	7		5	13		6	5	144

2. ÉS 3. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	44		3									3		
2		89					3					1	1	6
3	3		47											
4			1	49										
5					50									
6		1				82	2		2	4		2	5	2
7		1	1			4	118				6	10	3	7
8					1			48	1					
9								1	49					
10		1		7		3	6			73	1	2	7	
11		6		1			9			7	21	3	2	1
12		3					8			3		74	3	9
13							2					1	97	
14		4	2	1		12	5	1		8	1	5	8	153

4., 5., ÉS 6. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	39		11											
2		84				3	4		1		1		2	5
3	1		49											
4			3	43	1									3
5					50									
6					2	71	3				1	7	3	13
7		6	1			4	111		4	5	1	5	3	10
8				2	1			44	3					
9					5				45					
10		5		4			4	3	5	58		3	5	13
11							3			4	16	2	6	19
12						3	9			6		75		7
13		1				3	1						93	2
14	3	4				2	18	2		8	2	16	4	141

4. ÉS 5. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	44		3					3						
2		89					7	2				2		
3	2		48											
4				49				1						
5					44			3	3					
6		8					18	33	2	17	3	15		4
7					1		113	10		4	4	9		9
8					4			44	2					
9								3	47					
10				3	3		5	4		64	4	9		8
11							2	3			41	2		2
12		3	3				3	2		5	5	74		5
13		1	4		3		17	53	4		1	10		7
14		4					1	16	2	1	9	10		157

4. ÉS 6. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	47		3											
2		76	1	1		1	11		1	1		2		6
3	12		33		5									
4				50										
5					46			4						
6		2			2	76	2	2		2	3	1	3	7
7			2		2		137	1	1	6				1
8			4		1			45						
9					5			2	43					
10			3	3			9			70		8		7
11		6				1	1			18	20	4		
12	1	1					14	1	3	7	2	61	5	5
13		4				2	3					5	86	
14		2	3				22			4		8	2	159

5. ÉS 6. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	48		2											
2		72	1			9	12			2			2	2
3	2		42		5			1						
4				47						3				
5					50									
6		4				82	2			5	2		2	3
7	1	5				4	128							12
8	2		5		1			42						
9								3	47					
10		15	13		3	3	2			51	2	7		4
11	3	7				2	13			9	9	5		2
12		6	5			2	4	3		6	4	65		5
13		5					1				3	1	87	3
14	1	6	4			7	5					2		175

7. ÉS 8. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	28				9		2	4		4			3	
2		81	1		3	1	11			3				
3			44		3				3					
4	39	9											2	
5					46					1			3	
6	3	3				70	11	1		5		3	2	2
7	6	3				8	116			7		1	5	4
8			3		1		4	38		4				
9			1					1	48					
10	7	2				11	5			57	4	7	5	2
11	6	1					8			12	21	1	1	
12		1						3		10	3	83		
13		2			2		2			1		2	91	
14	1	5	6			10	22	3		12	1	2	8	130

9. ÉS 10. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	50													
2		87		2			8				1			2
3			50											
4				49				1						
5					50									
6		2		2		90	3			1				2
7		1				5	133			3	1	2		5
8		1	2		4		5	34	2			2		
9									49			1		
10		6	1	1			12			77		2		1
11						4	10			6	27	3		
12		3	1				1			4	2	84		5
13		6					5						88	1
14	1	5				3	10	4			1	5	2	169

1., 3., 5. - 7. ÉS 9. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	27	4	7							12
2	10	34	1						2	3
3			45			2			2	1
4		1		33	2	2	2		6	4
5				2	111		4	9		24
6	1		5	1	7	75	5	1		5
7			1		4	16	20			9
8			9		7	8	3	65		8
9			5		6		2	2	74	11
10	6		2	3				1	1	337

11. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	36	10		1						3
2	8	37	2		3					
3			49	1						
4				39		2	5	1	1	2
5					125	3	4	5		13
6					8	79	2	4	3	4
7					3	24	10	1	3	9
8					5	4	3	86		2
9				1	9	0	5	4	81	
10	6	3		2		0		1		338

12. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	35	2	1		1				2	9
2	1	42	4			3				
3		2	47							1
4			2	33			6	2	5	2
5				7	94	1	10	11	2	25
6			2	3	1	65	4		5	20
7				6	5	5	27			7
8			2	6	7	8	8	50	3	16
9		3		1	2		2	2	86	4
10	6	12			11				3	318

13. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	40	7						2		1
2	6	35	2	6					1	
3			47	3						
4	2			37		5		2		4
5				6	94	4	7		6	33
6				2	13	66		4	2	13
7				4	9	9	5			23
8				3	20	14	12	19	4	28
9	2			1	7	4		6	73	7
10		5	1	2	25					304

14. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	31	7			3				4	5
2		41	2		3				1	3
3			48							2
4			1	32	5	7		5		
5					96	3	1	9	4	28
6			1	1	7	63	5	8		15
7					10	12	14	10	3	1
8					4	1	5	74	1	15
9			3		1	5		7	81	3
10	5			6	11		2	1		325

15. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	46	1	3							
2		50								
3		1	43	6						
4				50						
5				1	143	2	1			3
6					2	90	5			3
7				2	2	4	38	1		3
8					1		3	95	1	
9					2			1	95	2
10	1					1			2	346

11. - 15. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	46									4
2		35	2	2	1			1	3	6
3			50							
4				36	1	2	2	3	5	1
5				2	133	3	5	5		2
6		4		1	5	75	8	3	2	2
7		1		2	3	4	26	5	2	7
8	1				7	1		91		
9					4	4			90	2
10	2			1					2	345

11. ÉS 12. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	44	1				1				4
2		45	3		1					1
3	5		43		1					1
4				35	2		6			7
5			1		125	3	1	10	1	9
6		1		1	5	85	3			5
7		2			1	10	32			5
8				6	2	3		83		6
9				2		2		6	90	
10	1				14	2				333

11. ÉS 13. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	44		2	1						5
2	4	42								4
3	2		47							1
4			2	43	4			1		
5			3	5	119		3	7	2	11
6	2		7	2	5	63	7	6	4	4
7	2			5	3	7	30			3
8				3		1		87	1	8
9		2		2					94	2
10	1				8				1	340

12. ÉS 13. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	47				2					1
2	3	39	4					3	1	
3		2	42		5					1
4				39		1		7	3	
5					134	7	1	5		3
6					5	88	5	1		1
7				2	2	6	36	3		1
8				3		7		82		8
9					2				96	2
10	1			2					1	346

11. - 13. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	44	4							1	1
2	1	41	2			3				3
3			50							
4				42		3		4		1
5				1	127	2	2	2		16
6		1			3	72	11	8		5
7					4	6	30	2	4	4
8					10	8	5	60		17
9			1		6	5		2	84	2
10		3		2	2	2				341

14. ÉS 15. SZENZOR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	43		5							2
2	2	43								5
3	1		47							2
4				49					1	
5					133	5		6	1	5
6				1	12	83		2		2
7			1		5	11	31	1		1
8					4	3	1	92		
9							2		98	
10	1				6			5	2	336

11., 13. ÉS 15. SZENZOR