

4. mérés

Rezgésanalízis

Sujbert László

BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

1. Bevezetés

A rezgésanalízis a jelfeldolgozás jellegzetes alkalmazása, amelynek során nyomon követhető a jel útja a fizikai jeltől a számítógépes rendszerig. Ez utóbbi gyakran kezelői felület nélkül, a mérendő objektumhoz kapcsolódva működik, tehát az analízator beágyazott rendszerként működik.

Rezgésanalízist változatos célokra alkalmaznak. Egyik gyakori alkalmazás a különféle gépek, berendezések diagnosztikája. Ebben az esetben a rezgés teljesítményéből, spektrumából következtetnek a mért mechanikai rendszer állapotára, esetleges meghibásodására. Fejlett szakértői rendszerek az a priori ismeretek alkalmazásával a hibás alkatrészt is képesek azonosítani, jelentős megtakarítást eredményezve (pl. repülőgép-hajtómű vizsgálata). A rezgő mechanikai rendszerek gyakran jelentős zajt bocsátanak ki környezetükbe. Rezgésanalízissel lokalizálhatók a káros zajforrások. A mechanikai szerkezetek tervezésénél is használható a rezgésanalízis: az elkészült prototípuson (pl. autó alváz) méréseket végezve meghatározhatók a veszélyes rezgésterhelésnek kitett elemek, és a konstrukció módosítható. Akusztikus méréseknél is szívesen alkalmaznak rezgésérzékelőket, pl. hangszerek vizsgálatára.

2. Elméleti összefoglaló

2.1. Rezgésérzékelők

A fenti címen alkalmazható érzékelők ismertetése meghaladja egy mérési útmutató kereteit. Az érzékelők ugyanis nem a rezgést mint olyat, hanem a rezgő test elmozdulását, sebességét, gyorsulását érzékelik, és ezeken belül is többféle megoldás létezik. Ezek a jellemzők rendre egymás deriváltjai, így egymásba átszámíthatók. Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül néhány lehetőséget sorolunk fel.

2.1.1. Elmozdulásérzékelők

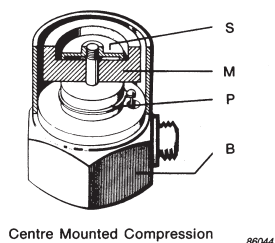
Induktív vagy kapacitív érzékelők, rezgések vizsgálatára ritkán alkalmazzák ezeket, mert szükség van egy, a mérendő rendszerhez képest álló egységre. Kitüntetett szerepe van viszont a lézer-interferométernek, amelyet gyorsulásérzékelők pontos kalibrálására használnak.

2.1.2. Sebességérzékelők

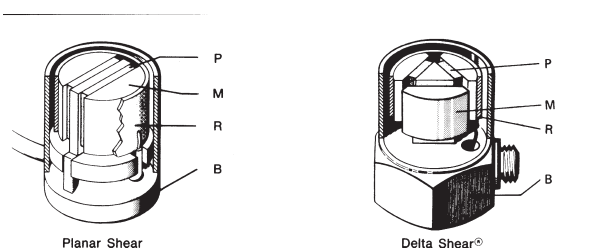
Ehelyütt csupán a lézer-vibrométert említjük, amely a Doppler-effektus elvén méri a rezgés sebességét. Ezek igen drága eszközök, előnyük viszont, hogy nem avatkoznak be a mechanikai rendszerbe, és nem okoznak plusz tömeget, ami különben a rendszer elhangolódásához vezet. További előny, hogy egy mérési alkalommal több ponton is lehet méréseket végezni, átalakítások nélkül. Általában tartozik hozzájuk egy üvegkábel is, így az egyébként viszonylag terjedelmes lézert a mérendő rendszer közelében elhelyezve csak az üvegkábelt kell mozgatni. Hátránya viszont, hogy a rezgő felületnek vissza kell vernie a fényt. A lézer-vibrométer alkalmazására példa belsőégésű motorok tesztelése. A blokk fémfelületéről visszaverődő lézersugár a méréshez elegendő intenzitású.

2.1.3. Gyorsulásérzékelők

Rezgésmérésre leggyakrabban gyorsulásérzékelőket alkalmaznak. Az érzékelőket a rezgő test felületére kell feltenni. Az érzékelők belsejében egy vagy több ún. szeizmikus tömeget helyeznek el, ami gyorsulás hatására létrehozza az adott érzékelőre jellemző változást. Bővebben a következőkben a piezoelektromos elven működő gyorsulásérzékelőkkel fogunk foglalkozni.



1. ábra. Hagyományos gyorsulásérzékelő. alap (B), szeizmikus tömeg (M), piezoelektromos kristály (P), előfeszítő rugó (S)



2. ábra. Továbbfejlesztett gyorsulásérzékelők. alap (B), elvezetés (R), szeizmikus tömeg (M), piezoelektromos kristály (P)

2.1.4. Mikrofonok

A mikrofonok nem rezgést, hanem hangnyomást érzékelnek, rezgés mérésére csak közvetve alkalmazhatók, elsősorban kvalitatív mérésekre.

2.2. Piezoelektromos gyorsulásérzékelők

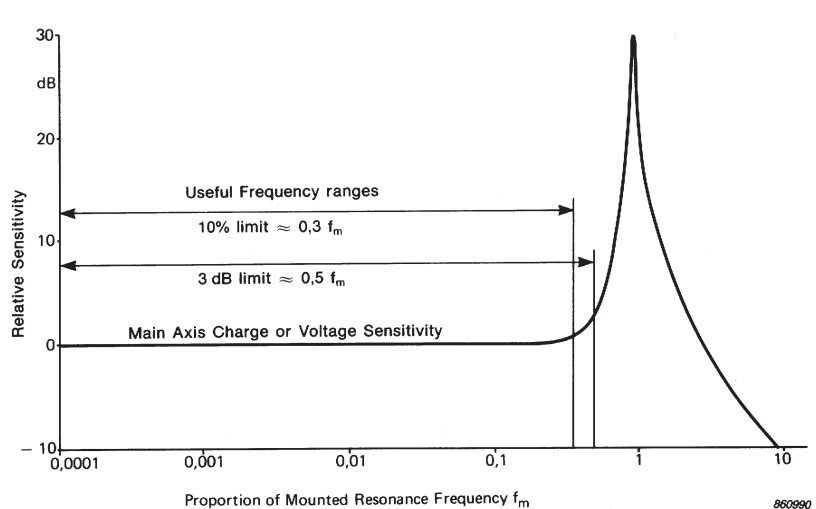
Az 1. és a 2. ábrán ábrán az adott szakmai területen meghatározó Brüel & Kjør cég érzékelőinek felépítését láthatjuk. A 2. ábrán bemutatott bonyolultabb geometriával nagyobb érzékenység érhető el.

A bemutatott érzékelők mind – az ábrákon látható helyzetet figyelembe véve – függőleges irányú gyorsulást érzékelnek. A 2. ábra jobb oldalán látható érzékelő a fejlettebb konstrukció, a bal oldalihoz képest magasabb a rezonanciafrekvenciája, adott szeizmikus tömeg mellett nagyobb az érzékenysége. A méréshez ilyen kialakítású érzékelőket fogunk használni.

A piezoelektromos anyag felületén deformáció hatására töltés halmozódik fel, amely az érzékelő kapacitáson kicsiny feszültséget hoz létre. Ez a „kondenzátor” a szivárgó áramok hatására lassan kisül, így ezek a gyorsulásérzékelők konstans gyorsulás (pl. nehézségi gyorsulás) mérésére közvetlenül nem alkalmasak. Egy gyorsulásérzékelő frekvenciatartománybeli átvitelének tipikus görbét a 3. ábrán láthatjuk. A specifikációban szereplő legkisebb frekvencia általában 1 Hz, a legnagyobb a rezonanciafrekvenciától függ, tipikusan 10..20 kHz. A rezonanciafrekvencia az érzékelő mechanikai rezonanciafrekvenciája, általában 20..50 kHz. A specifikált tartományban az amplitúdómenet ingadozása néhány százalék.

Az érzékelő érzékenysége tipikusan 10..100 pC/g. A kimeneten megjelenő töltés (feszültség) további feldolgozásra nem alkalmas, azt erősíteni kell. Első lépésben ún. töltéserősítőt alkalmaznak, amely a kristályon megjelenő töltést (terhelhető) feszültséggé konvertálja. A töltéserősítő alapvetően egy kondenzátorral negatívan visszacsatolt műveleti erősítő. A kicsiny töltés miatt nagy bemenőellenállású erősítőt kell alkalmazni, és az érzékelő jelét is úgy kell a bemenetre vezetni, hogy minél kisebb szivárgás lépjen fel. A műveleti erősítő jele már egyéb feszültségerősítő fokozattal tovább erősíthető.

A gyorsulásérzékelőkhöz egyedi kalibrációs jegyzőkönyvet adnak. Ez a következő fontosabb adatokat és jelleggörbét tartalmazza:



3. ábra. Gyorsulásérzékelő amplitúdókarakterisztikája

- geometriai, fizikai adatok,
- elektronikus paraméterek,
- érzékenység,
- keresztirányú érzékenység (tipikusan 1% alatt),
- amplitúdó- és fázismenet,
- hőmérsékleti érzékenység,
- rezonanciafrekvenciák.

2.3. Gyorsulásérzékelők kalibrálása (kiegészítő anyagrész)

Mint láttuk, a gyorsulásérzékelők a gyorsulást csak közvetve érzékelik, ezért kalibrációra van szükség. Ehhez nagy pontossággal ismert gyorsulás gerjesztést kell alkalmazni, és mérni az érzékelő kimenetén megjelenő feszültséget. A B&K cég az egyes érzékelőkhöz adott kalibrációs jegyzőkönyvben 10^{-3} pontossággal adja meg az érzékenységet. Érdeemes belegondolni abba, hogy nem triviális feladat a rezgésérzékelőt ilyen pontosan ismert gyorsulással gerjeszteni.

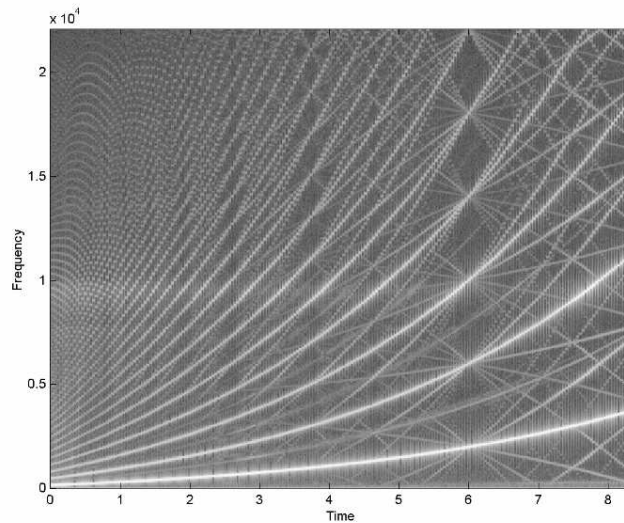
A gyártó kalibrálásra lézer-interferométert alkalmaz, amivel méri az érzékelő kitérését. Gerjesztésnek pontosan ismert frekvenciájú szinuszos rezgést állítanak elő, így a harmonikus rezgőmozgásra vonatkozó összefüggésekkel a gyorsulás meghatározható. (g gyorsulás esetén 100 Hz-en a kitérés $25 \mu\text{m}$.) A kimeneti jel feszültségének pontos mérése egyszerű feladat.

Közönséges laboratóriumokban kalibrálásra az összehasonlító mérést használják: a kalibrálandó érzékelőt egy pontosabban ismert érzékelőhöz hasonlítják. Gyors kalibrációra használatosak olyan kézi gerjesztő eszközök, amelyek mérsékelt (néhány %) pontossággal adott (pl. g) gyorsulást idéznek elő.

2.4. Gyorsulásjelek feldolgozása

Ehelyütt csupán azokat a módszereket ismertetjük részletesebben, amelyeket a mérés során is alkalmazni fogunk, az egyéb lehetőségeket csak megemlítjük. A mérés során alapozunk a diszkrét Fourier-transzformáció alapvető összefüggéseire, különösen a felbontás kiszámítására, a helyes pontszám megválasztására, valamint az ablakfüggvények használatára.

A leggyakoribb eset az, amikor a rezgésjel periodikus, és a periodikus jel komponenseinek elemzése a feladat. Nemperiodikus (sztochasztikus) jelek elemzésére kerül sor pl. bizonyos átviteli függvény mérések esetén, vagy több érzékelő jele esetén, amikor keresztkorrelációt, koherenciafüggvényt számítanak. Amennyiben kis



4. ábra. Spektrogram

teljesítményű, zajjal fedett, ismeretlen frekvenciájú komponensek után kutatnak, spektrum helyett kepspectrumot számolnak. Egyes esetekben viszont a frekvenciakomponensek helye jól ismert, és éppen az a kérdés, hogy ezek hogyan változnak. Ebben az esetben a spektrumot nem frekvenciában, hanem a komponensek számában skálázzuk. Ez az ún. harmonikus analízis (order analysis vagy order tracking). Időben változó, de dominánsan periodikus jelek analízisére alkalmazzák a Wavelet-transzformációt, vagy a Wigner-eloszlást. Ez utóbbi speciális esete a rövid idejű Fourier-transzformáció, amivel mi is foglalkozni fogunk.

2.4.1. Spektrogram számítása

A spektrogram a spektrum abszolút értékének időbeli változását mutatja. Mivel háromféle dimenziót – idő, frekvencia, amplitúdó – kell megjeleníteni, térbeli ábrát, vagy olyan síkbeli diagrammot alkalmaznak, amelyen a sík egy pontjának színe és intenzitása hordozza az információt. A 4. ábrán egy ilyen spektrogram látható, itt fekete-fehérben. Az ábrán egy mechanikai rendszer logaritmikusan sweepelő háromszögjelre adott gyorsulásválaszát látjuk. A vízszintes tengely az idő, a függőleges a frekvencia. Jól látszanak az egyes harmonikusok, és az is, hogy a magasabb felharmonikusok hamar kikerülnek az analizált tartományból. Látszanak még kisebb intenzitású, időben csökkenő frekvenciájú komponensek is: ezek mutatják, hogy az analízis során nem tartottuk be a mintavételi tétel feltételét, ugyanis a belapolódó komponensek látszólag éppen csökkennek.

A spektrogram a következőképpen számítható ki. A regisztrátumot fel kell osztani kisebb darabokra, és ezek diszkrét Fourier-transzformáltját kell egymás mellé illeszteni. A frekvenciafelbontás meghatározza a szükséges pontok számát, így néha túl hosszú darabokra lenne szükség, ez alatt a jel jelentősen megváltozhat. Megoldás, hogy átlapolódó darabokat transzformálunk, így az időlépés kisebb lesz. (Szokásos a 75%-os átlapolás.) Látható, hogy az időbeli és a frekvenciabeli felbontás növelése egymásnak ellentmondanak. Ezt az ellentmondást javítja az említett Wigner-eloszlás, vagy a Wavelet-transzformáció. A diszkrét transzformáció hibáinak javítására ablakfüggvényeket alkalmazhatunk.

A MATLAB spektrogram számítását a `spectrogram` függvénnyel támogatja.

2.4.2. Állandósult spektrum számítása

Amennyiben a rezgésjel csak kismértékben változik, lehetőség van arra, hogy a spektrumot hosszabb regisztrátum alapján számoljuk. Ebben az esetben is alkalmazható a regisztrátum kisebb darabokra vágása, de transzformáltját valamilyen módon (leggyakrabban lineárisan) átlagoljuk (Welch-módszer), amelynek következtében

csökken a számított spektrum varianciája. Ha a felhasznált regisztrátumdarabok átlapolódása 75%-nál nem nagyobb, az átlagolás közel független elemek alapján történik, és a variancia N elem esetén N -ed részére csökken. Ügyelni kell azonban arra, hogy ehhez a feldolgozáshoz ne az FFT-vel kapott komplex spektrumot, hanem ennek abszolút értékét használjuk.

A MATLAB az állandósult spektrum számítását a `pwelch` függvényvel támogatja.

2.4.3. Átviteli karakterisztika mérése

Mivel szenzorok jeleit vizsgáljuk, fontos tisztázni, hogy mi az a rendszer, amelynek az átviteli karakterisztikáját mérjük. Rezgésanalízis esetén mechanikai rendszert vizsgálunk, amelynek egy adott pontján helyezzük el a rezgésérzékelőt. Ennek megfelelően a rendszer kimenete elmozdulás, sebesség vagy gyorsulás; a mérésben alkalmazott szenzorok miatt gyorsulásjeleket vizsgálunk. A rendszer bemenete viszont többféle lehet: minden olyan jel, amely mechanikai gerjesztést eredményez. Gyakran alkalmaznak mérőkalapácsot, amelyben erőérzékelőt helyeznek el, a bemeneti jel ez esetben erő dimenziójú. Másik gerjesztési lehetőség ún. shaker alkalmazása, amely a bemenetére adott feszültségjellel arányos erőt, illetve gyorsulást hoz létre. Felépítése hasonlít egy elektrodinamikus hangszóróra, amelynek eltávolították a membránját. A bemenet lehet a shaker feszültsége is, de elhelyezhetünk erőérzékelőt a shaker kimenetén, a mechanikai rendszer gerjesztési pontján is. Ha a mechanikai rendszer maga is tartalmaz elektromechanikus átalakítót, az átalakítóra adott feszültség (áram) is lehet a rendszer bemenete. Amennyiben a rendszert egyetlen átviteli karakterisztikával jellemezzük, egyben azt is feltételezzük, hogy a rendszer lineáris, vagy a nemlineáris viselkedést elhanyagoljuk.

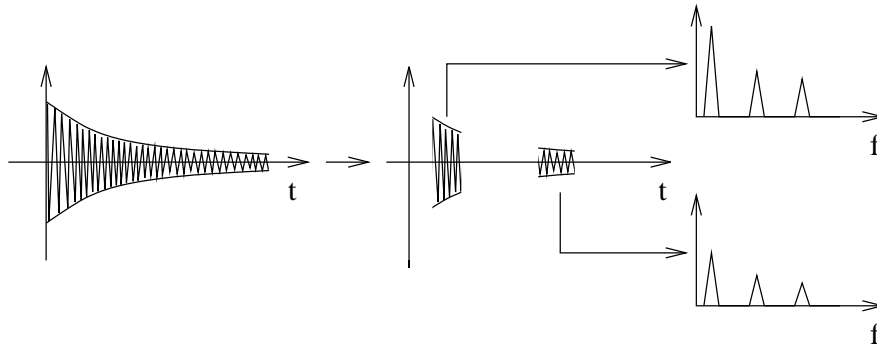
Az átviteli karakterisztika meghatározásához tehát adott a bemeneti és a kimeneti jel időfüggvénye. Definíció szerint az átviteli karakterisztika a két jel Fourier-transzformáltjának hányadosa. A művelet végrehajtása azonban elvi nehézségeket is felvet, a témakör tárgyalása bőven meghaladja a rendelkezésre álló kereteket. A Fourier-transzformáltakat diszkrét Fourier-transzformációval (DFT) becsljük véges regisztrátum alapján, amelynek elvi okokból is jelentős a varianciája (lásd előző szakasz), de a jeleket jelentős teljesítményű mérési zaj is terhelheti. Fontos az is, hogy a gerjesztés perzisztens legyen, azaz minden olyan frekvencián legyen jó jel-zaj viszony mellett rendelkezésre álló gerjesztés, ahol az átviteli karakterisztikát meg kívánjuk határozni. Pl. ha a 20...2000 Hz tartományban kívánunk analizálni és shakert alkalmazunk szinuszos gerjesztéssel, akkor a gerjesztő feszültség frekvenciájának le kell „fednie” ezt a tartományt.

Ha tehát adott a perzisztens gerjesztés, az átviteli karakterisztika a kimenet és a bemenet állandósult spektrumának hányadosa. Sok esetben elegendő az amplitúdó-karakterisztika vagy amplitúdómenet meghatározása, azaz az átviteli karakterisztika abszolút értékének számítása. Amennyiben tudjuk, hogy a gerjesztőjel spektruma az adott tartományban konstans (fehér), akkor elegendő a kimenet állandósult spektrumának meghatározása, annak abszolút értéke a vizsgált rendszer amplitúdómenete lesz. Fehér spektruma van a korábbi mérési gyakorlatokon alkalmazott „sweepelő” szinuszjelnek (chirp jel), vagy a véletlen zajnak. A mérés során ez utóbbit fogjuk alkalmazni, a MATLAB programban ugyanis könnyű véletlen zajt generálni.

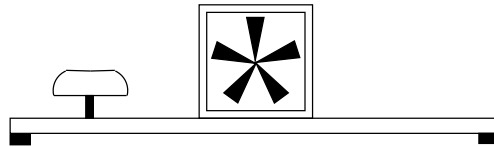
2.4.4. Lecsengési időállandó számítása, jelgenerálás (kiegészítő anyagrész)

Az alábbiakban azt az esetet tekintjük át, amikor egy lecsengő periodikus jel paramétereit kell kiszámítani. Az 5. ábra a feldolgozás első lépéseit mutatja. A lecsengő periodikus jelet mutatja a bal oldali diagram. Ennek két szakaszát szemeljük ki vizsgálatra: az egyik szakasz a regisztrátum elején található, ahol a jelszint még nagy, de a kezdeti tranziensek már lecsillapodtak; a másik szakaszban a jelszint határozottan kisebb, de még nem csökkent le a regisztrátumban lévő zaj szintjére. A középső diagram mutatja a kiválasztott két szakaszt. A jobb oldali diagramon látható a két szakaszra kiszámított spektrum.

Feltételezzük, hogy a rendszer lineáris, továbbá minden harmonikus komponens exponenciálisan cseng le, egy időállandóval. Az egyes komponensek frekvenciája nem változik, ezért a jobb oldali diagramokon a csúcsok frekvenciája nem változik, csak az amplitúdójuk. Mivel a lecsengés exponenciális, és a jel diszkrét, igaz az,



5. ábra. Lecsengési idő számítása



6. ábra. Az első mérendő objektum

hogy:

$$X_i(n+1) = \lambda_i X_i(n), \quad \lambda_i < 1 \quad (1)$$

ahol $X_i(n)$ az i -edik csúcshoz tartozó amplitúdója az n . időpillanatban. Legyen az i -edik csúcshoz tartozó amplitúdója az első spektrumban $X_{i,1}$, a másodikban $X_{i,2}$, a két regisztrátum kezdete közötti mintaszám pedig K . Ekkor λ_i a következőképpen számítható:

$$\lambda_i = \left(\frac{X_{i,2}}{X_{i,1}} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (2)$$

A lecsengő periodikus jel komponenseiből „rakható össze”. Egy komponens jellemezhető frekvenciájával (f_i), kezdeti amplitúdójával ($X_{i,1}$), és diszkrét időállandójával (λ_i). Ekkor az adott komponens N mintája:

$$x_i(n) = X_{i,1} \sin\left(2\pi \frac{f_i}{f_s} n\right) \lambda_i^n, \quad n = 0..N-1 \quad (3)$$

Az eredeti jel tehát az alábbi módon approximálható:

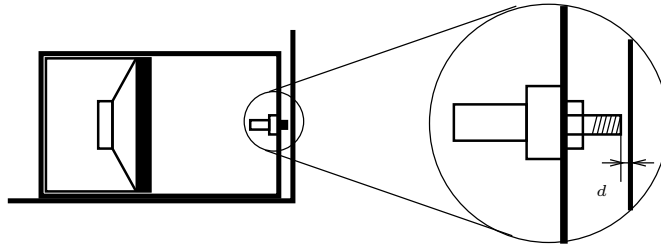
$$x(n) \approx \hat{x}(n) = \sum_{i=1}^I x_i(n), \quad n = 0..N-1 \quad (4)$$

A vizsgálat és a szintézis során eltekintettünk a periodikus jelkomponens fázisának meghatározásától: tapasztalatok szerint ez első közelítésben nem játszik szerepet.

3. Mérési összeállítás

A mérés során két eszközt kell vizsgálni. Az első objektum vázlata az 6. ábrán látható. Egy ventilátor és opcionálisan egy csengő rezgéseit fogjuk vizsgálni, amelyek egy falemezre vannak szerelve. A ventilátort hálózati feszültségű aszinkron motor hajtja, fordulatszámát kismértékben változtatható toroid transzformátor segítségével. A falemezben található néhány menetes furat, ezeken a helyeken lehet a rezgésérzékelőt rögzíteni. A rezgésérzékelő B&K 4384 típusú érzékelő.

A második objektum egy helyiségben vagy nagyobb szerkezetben rögzített forgó gép modellje, ahogy az a 7. ábrán látható. Egy kis méretű hangszugárzót helyeztünk egy kartondobozba, a doboz falán pedig rezgésérzékelő



7. ábra. A második mérendő objektum.

rögzíthető egy csavarral az ábra szerint. A forgó gép mint rezgékeltő funkcionál, ezt úgy modellezzük, hogy a hangsugárzóba periodikus gerjesztést vezetünk. Változó frekvenciájú (sweepelő) periodikus jel gyorsuló vagy lassuló forgást modellez. Ide tartozik egy „L” alakban meghajlított merevnek tekinthető lemez is. A d légrés finom beállításával elérhető, hogy ha a doboz fala rezonál, a csavar felütöközik a lemezen, az ütődések pedig a rezgésjelen impulzusokat eredményeznek. A jelenség a hangfrekvenciás tartományban jól hallható. Ez az összeállítás jól modellez egy hibajelenséget, amelyet a gyakorlatban is tapasztalunk, pl. autóbuszon. Az ilyen jelenség a szerkezet károsodásához is vezethet, de mindenképpen kellemetlen a felhasználó számára. A jelenség a rezgésjelenből is azonosítható, így a mechanikai rendszer állapotának monitorozására is alkalmas.

Mindkét objektumhoz ugyanazt az érzékelőt használjuk. Ügyeljünk az érzékelő kábelének pontos csatlakoztatására. A kábelt csak akkor csatlakoztassuk, ha az érzékelő már a helyén van. Soha ne csavarjuk ki az érzékelőt a helyéről úgy, hogy a kábel még csatlakoztatva van!

A gyorsulásérzékelő töltés kimenetű, ezért jelét töltéserősítővel erősítjük. A töltéserősítőn állítsuk be az érzékenységet az érzékelő saját adatlapja alapján. A töltéserősítő jele már oszcilloszkópra, illetve hangkártyára vezethető.

A megfelelően kondicionált jelet feldolgozás céljából egy PC hangkártyájára vezetjük. A PC-n az **Audacity** programmal lehet felvételeket készíteni és lejátszani. A felvételeknél ügyeljünk a mintavételi frekvencia és a 16 bites üzemmód kiválasztására. A felvételeket MATLAB alatt lehet értékelni, a wave fileokat az **audioread** függvénnyel lehet beolvasni, illetve MATLAB vektort az **audiowrite** függvénnyel lehet wave fileba írni.

4. Mérési feladatok

1. Helyezze el a rezgésérzékelőt a ventilátor mellett. Helyezze üzembe a ventilátort névleges feszültségen. Az Audacity programmal rögzítse a jelet, és MATLAB alatt analizálja! Állapítsa meg az optimális mintavételi frekvenciát! A gyorsulásérzékelő érzékenysége és az erősítés alapján határozza meg a rezgésjel nagyságát m/s^2 egységben is!
2. A toroid transzformátor kimenő feszültségének változtatásával változtassa a fordulatszámot, és készítsen több felvételt is! Azonosítsa a 0..500 Hz tartományban detektálható komponenseket! Határozza meg az aszinkron motor slipjét névleges feszültségen! Ügyeljen a DFT pontszámának megválasztására!
3. Helyezze el a rezgésérzékelőt a doboz oldalán, és vezessen változó frekvenciájú szinuszos jelet a hangsgárzóra! Az „L” alakú lemez beállításával érje el, hogy bizonyos frekvenciákon „megzörgesse” a lemezt. A zörgés jelenségét mellőzve mérje meg a bemeneti feszültség és a gyorsulásjel közötti amplitúdómenetet! Ehhez MATLAB-ban generáljon megfelelő időtartamú fehérzajt! Értelmezze a végeredményt, indokolja meg a fontosabb töréspontokat, maximum- és minimumhelyeket!
4. Milyen gerjesztést és analízist alkalmazna, amellyel észlelhető, ha az „L” alakú lemez túl közel kerül a dobozhoz, azaz káros mechanikai jelenség lép fel? A mérés során csak a „megfelelő” és a „nem megfelelő” állapot megkülönböztetésére alkalmas mérési módszert kell kidolgozni és demonstrálni, az állapot automatikus felismerése nem feladat.
5. (kiegészítő mérési feladat) Gyorsulásérzékelőt használva rögzítse a megütött csengő hangját! Határozza meg a főbb komponenseket, és azok lecsengésének időállandóját!
6. (kiegészítő mérési feladat) Az előző feladat eredményeinek felhasználásával generáljon „csengőhangot”! A jelet hallgassa meg hangszórón, és értékelje az eredményt!