

RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK, AZOK MEGBÍZHATÓSÁGA ÉS KÖVETKEZMÉNYEI

REZGÉSMÉRÉSEK ÉS REZGÉSVIZSGÁLATOK

KOVÁTS ATTILA
Miskolci Egyetem

Készült: a TEMPUS S_JEP_11271 projekt támogatásával

Miskolc
- 1999 -

Kiadja a Miskolci Egyetem

A kiadásért felelős: *Dr. Tóth László*

Műszaki szerkesztő: *Dr. Tóth László*

Példányszám: 40

Készült Colitó fóliáról az MSZ 5601-59 és 5602-55 szabványok szerint

Miskolci Egyetem Sokszorosító Üzeme

A sokszorosításért felelős: *Kovács Tiborné*

TB. - '99- - ME

A levonat sokszorosításba leadva: 1999. augusztus 2.

ELŐSZÓ

Minden történelmi korszak fejlődésének megvan a maga hajtóereje. Míg a XIX. században a tudomány előrehaladását egyértelműen a vasúti közlekedés robbanásszerű elterjedése hatotta át (évente átlagosan 10.000 km hosszágban építettek új vasútvonalakat), addig jelen korunkban a mikroelektronika adta lehetőségek szöttek át a mindennapjainkat, így a műszaki életünket is, szolgáltatva annak fejlődéséhez szükséges hajtóerőt. E két periódus fejlődésének sajátosságai természetesen megmutatkoztak a társadalmi struktúra formálódásában is. Az elmúlt században kialakult a nagyüzemi munkásság, megvalósult a tőke koncentrációja és létrejött a reál - dominánsan a műszaki - tudomány művelőinek népes tábora. Ez utóbbiak kivívták maguknak a széles társadalmi elismertséget, hisz tevékenységük közvetlenül hozzájárult a társadalom látható fejlődéséhez. Napjaink sajátossága az *információs társadalom* kialakulása, amelyben a mikroelektronikai elemek fejlődése átszövi a mindennapi életünk, tevékenységünk lehetőségeit. A műszaki életben ez többek között a számítástechnika robbanásszerű elterjedését, a diagnosztikai vizsgálatok eszközparkjának átalakulását, az anyagok viselkedésének, tulajdonságainak mélyebb megismerését szolgáló anyagvizsgálati módszerek, eszközök létrejöttét eredményezték. A fejlődés ütemét jól tükrözi az, hogy mindez az utóbbi 20 évben következett be (pl. a számítógépek mikroprocesszorainak műveleti sebessége 1978-1998 periódusban 3 nagyságrendet változott!).

A nagy értékű műszaki létesítményeket, szerkezeteket (hidakat, erőműveket, gázolajfeldolgozó rendszereket, vegyipari üzemeket, tranzit energiaszállító vezetékeket, repülőgépeket, hajókat, stb.) 15-50 éves üzemeltetésre tervezik az adott periódusban érvényben levő szabványok, műszaki irányelvek figyelembevételével. Ezekben pedig az azt megelőző néhány év ismeretszintje, technológiai színvonala testesedik meg. A mikroelektronika által diktált fejlődési ütem lehetővé teszi azt, hogy a nagy értékű szerkezetek, létesítmények üzemeltethetőségi feltételeit, maradék élettartamát egyre nagyobb megbízhatósággal becsüljük, azaz integritását egyre kisebb kockázattal ítéljük meg.

Az előzőkből adódóan kialakult egy új, diszciplína, a „*szerkezetek integritása*”, vagy „*szerkezetintegritás*” fogalma és létrejött intézményrendszere szerte a világon. A döntően mérnöki ismereteket integráló tudományterület feladata annak eldöntése, hogy egy adott szerkezet, létesítmény milyen feltételek mellett üzemeltethető a továbbiakban, ill. mennyi a maradék élettartama és ez milyen módon menedzselhető. Ahhoz, hogy a szerkezet állapotát a lehető legnagyobb biztonsággal felmérhessük - ebből adódóan a további üzemeltethetőség feltételeit a legkisebb kockázattal megbecsüljük - elengedhetetlen az, hogy

- *diagnosztikai vizsgálatokkal felmérjük a szerkezet állapotát,*
- *tisztázzuk a valóságos üzemi körülményekre jellemző mechanikai állapotot,*
- *megítéljük a beépített anyagok károsodásának folyamatát és mértékét az adott üzemeltetési feltételek mellett.*

Nyilvánvaló egyrészt az, hogy az előzőekben említett három fő terület (méréstechnika - mechanika - anyag) egyforma jelentőséggel bír a szerkezet integritásának megítélésében és bármelyik terület elhanyagolása, súlyának csökkentése hibás döntéshez, esetleg katasztrófához vezethet. Nyilvánvaló másrészt az, hogy minden műszaki döntésben, így az üzemeltethetőség feltételeinek megítélésében is, bizonyos kockázat rejlik, hisz a tudomány adott szintjét hasznosítjuk és a rendelkezésre álló eszközpark maga is az adott kor színvonalát képviseli. Ebből

adódóan mérlegelni kell az esetleges hibás döntés műszaki, jogi, közgazdasági és környezetvédelmi következményeit. Ezek együttes figyelembevételével viszont már kialakíthatók az ésszerű kockázatvállalás feltételei.

A szerkezetintegritás tehát egy igen komplex terület. Akik ezt művelik azoknak képesnek kell lenniük arra, hogy az üzemeltetőséggel kapcsolatos problémákat teljes körűen átlássák, kiemeljék a meghatározó paramétereket, kérdéscsoportokat és alkalmasak legyenek arra, hogy az érintett tudományterületek szakembereivel érdemben szakmailag konzultálni tudjanak.

A szerkezetek integritásának, reális állapotának, maradék élettartamának megítélése mind az üzemeltetők, mind pedig a biztosítótársaságok alapvető érdeke. Az üzemeltető szempontjából a tudatos tervezés, fejlesztés megkerülhetetlen sarokpontja az üzemben levő készülékek műszaki állapota, biztonsága; a szükséges biztosítás tekintetében pedig az ésszerű kockázatvállalás, biztosítási összeg alapeleme a reális állapot ismerete. Ezek jelentőségét mérlegelve támogatta az Európai Unió a TEMPUS program keretében a „*Teaching and Education in Structural Integrity in Hungary*” címmel összeállított pályázatot, amelynek fő célkitűzése ezen új diszciplína meghonosításán kívül egyrészt a szerkezetintegritás oktatási anyagainak kidolgozása, másrészt a **Szerkezetintegritás - Biztosítási Mérnök Szakmérnöki Szak** beindítása. A négy hazai intézmény - Miskolci Egyetem, Budapesti Műszaki Egyetem, Kossuth Lajos Tudományegyetem Műszaki Kara és a Széchenyi István Műszaki Főiskola szakembereinek bevonásával elérendő célok megvalósítását nagyban segítették a következő külföldi partnereink:

- Prof. T. Varga, Bécsi Műszaki Egyetem
- Prof. H. P. Rossmanith, Bécsi Műszaki Egyetem
- Dr. J. Blauel, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik
- Prof. S. Reale, Università Degli Studi di Firenze
- Prof. G. Pluinage, Universitz of Metz,
- Dr. S. Crutzen, Joint Research Centre, European Commission

Miskolc, 1999. Július 15.

Tóth László

*egyetemi tanár
a projekt koordinátora*

Ez az összeállítás a szerkezetek állapotának megítélésénél alkalmazott rezgésvizsgálati módszerekkel, mint a ronesolásmentes szerkezeti vizsgálatok egyik speciális területével, foglalkozik. Az elméleti alapok összefoglalása után tárgyalja az alkalmazáshoz szükséges legfontosabb műszerelemeket és műszereket, a kiértékelési módszereket és azok felhasználását a mindennapi gyakorlatban.

Minden szerkezeti elem, elempár vagy teljes szerkezet működését rezgésjelenségek, tágabb értelemben zajok fellépése jellemzi. Függvénye a pillanatnyi állapotnak, működésmódnak és információtartalma – kellő ismeretek birtokában – meghatározó mind az elhasználódás mértékének, mind a működési rendellenességének megítélésénél.

A rezgés valamely rugalmas közegben (gázban, folyadékban, szilárd testben) hullámszerűen tovaterjedő mechanikai zavarási állapotot jelent. A közeg mechanikai tulajdonságainak

függvényében maga a zavarás a közeg állapotának térben és időben történő ingadozása az egyensúlyi helyzet körül. Rezgésekről (ún. testhangokról) akkor beszélünk, ha ez a folyamat szilárd közegben játszódik le. A továbbiakban csak ezzel az esettel foglalkozunk.

A rezgésvizsgálat vagy más kifejezéssel a rezgésdiagnosztika a korszerű karbantartási rendszerek egyik legjelentősebbike. Alkalmazásával a szerkezet leállítási és megbontása nélkül – kellő számú adat birtokában – bármely időpontban megállapítható a kérdéses egység (elem, elempár vagy szerkezet) pillanatnyi állapota (károsodásának mértéke), várható élettartama, majd ezek alapján egy esetleges beavatkozás szükségessége és ennek időpontja az üzemidő függvényében. Ezáltal tervezhetővé válik maga a karbantartási folyamat is.

A karbantartási módszereket áttekintve – beavatkozás meghibásodásnál, statisztikai adatokból meghatározott időpontban (TMK: Tervszerű Megelőző Karbantartás!), állapotfigyelés alapján – ez az eljárás lényeges költségcsökkenést, általában egyszerűbb javítást és hatékonyabb üzemeltetést biztosít. A nagy termelés kiesést eredményező váratlan leállások („Szükség szerinti javítás” módszere), a tényleges élettartam figyelmen kívül hagyása és a megbontással járó elkerülhetetlen járulékos hibák („TMK”) elkerülésével lehetővé teszik a tervezett élettartam elérését nagy megbízhatósággal, s a hibák behatárolását egyszerű módszerekkel.

Megbízhatósága függvénye az alkalmazott műszerek minőségének, az alkalmazók képzettségének és gyakorlatának. Kellő elméleti tudás és gyakorlati tapasztalat birtokában ez az érték 90 % felett van, ami azt jelenti, hogy 100 esetből 90 feletti a helyes megítélés. Ugyanez az arány segédeszközök alkalmazása nélkül egyértelműen 50 % körüli, de csak akkor, ha a vizsgálatot végző szakemberek mögött több évtizedes tapasztalat van.

Az állapotfigyelés mindig az észlelt jelenség elemzésével jár együtt, azaz a mérés és a diagnosztizálás sohasem választható szét, s csak ennek alapján valósítható meg az eredményes és helyes beavatkozás.

Igyekszünk ezzel a rezgésvizsgálatok magyar nyelvű szakirodalmában egy olyan összeállítást megjelentetni, amelynek középpontjában maga a cél, a szerkezeti elem vagy a teljes szerkezet állapotfelmérésének, élettartamának meghatározása áll. Az eszközök – a vizsgálati módszerek és eljárás – bemutatása döntően azok fizikai alapjaira, alkalmazhatósági feltételeire, korlátaira és eredményeinek megbízhatóságára, az azokat befolyásoló tényezők tárgyalására vonatkozik a teljesség igénye nélkül.

Mint minden új kezdeményezésnek, e füzetnek is nyilvánvalóan meglesznek a maga hiányosságai és a jövőben számos területen kiegészítésre szorulnak. Ezt nagyban segítené az, ha a Tisztelt Olvasók észrevételeiket, javaslataikat a szerzőknek vagy a projekt vezetőjének eljuttatnák. A TEMPUS program nyújtotta támogatás lehető legjobb kihasználása érdekében az elkészült tananyagokat INTERNETE-n is közreadjuk (<http://www.bzlogi.hu/tempus.html>) annak érdekében, hogy a szerkezetintegritás diszciplínája hazánkban minél gyorsabban és minél szélesebb körben elfogadásra és elterjedésre találjon.

Miskolc, 1999. június 15.

Kováts Attila

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	1
1. Bevezetés	
2. Rezgésvizsgálatok	5
2.1 A rezgésekkel kapcsolatos alapfogalmak	6
2.2. Szintek	10
2.2.1 Teljesítményszint	10
2.2.2 Származtatott szintek	10
3. Mérőszámok	11
4. Műszerelemek és műszerek	12
4.1 Rezgésérzékelők	12
4.2 Szűrők	16
5. Mérések	18
5.1 Rezgéssebesség mérés	18
5.2 Lökésimpulzus módszer	16
5.3 A "SEE"-technológia	19
5.4 Burkológörbe módszer	20
6. A rezgésanalízis módszere, jellegzetes frekvenciák	20
6.1 Kiegyensúlyozatlanság	20
6.2 Szerelési hiba, deformálódott tengelyek	20
6.3 Impulzusszerű erőhatás	21
6.4 Csapágyak, tengelykapcsolók	21
6.5 Fogaskerék hajtóművek	23
6.6 Szijszíj- és ékszijszíjhajtások	24
6.7 Láncszijszíjhajtások	25
6.8 Villamosgépek	25
6.8.1 Villamos forgógépek	25
6.8.2 Transzformátorok	25
6.9 Hidraulikus és pneumatikus rendszerek	26
7. Határértékek	27
Irodalomjegyzék	30

1. Bevezetés

Minden szerkezet működése rezgések fellépésével jár együtt. E rezgés fizikai paramétereit az elem (pl. ventilátor járókerék, szeleptányér) vagy elempár (pl. fogaskerék, csapágy) üzemi és konstrukciós adatai, ezen túlmenően azonban pillanatnyi állapota is meghatározza. Az üzemi adatok közé alapvetően a terhelés, a fordulatszám és a kenési állapot, a konstrukciós paraméterek közé a geometriai méretek, a kialakítás, a relatív mozgások, s többnyire a kapcsolódási viszonyok sorolhatók.

E tényezők kölcsönhatása következtében kialakuló rezgések az idő függvényében – a szerkezet tervezett élettartamán belül – állandó folyamatos változásban vannak. Változatlan alapadatok mellett is módosul azonban az állapot a működés során, döntően a kopás (méret és felületminőség változása), a fáradás (teherbíró-képesség kimerülése, pl. kigödrösödés), a kifáradás következtében.

Mindezek a változások jól követhetők a rezgésjellemzők változásának megfigyelésével és azok változásának követésével, azaz *változási trend* megállapításával. Ez utóbbi a megbízhatóság-elméletből ismert ún. "fürdőkád-görbe" felvételét jelenti, amely többnyire – néhány speciális kivételtől eltekintve – jól jelzi azt a tönkremeneteli határt, amelynél a beavatkozás már feltétlenül szükségessé válik.

Alkalmazása egyértelműen az üzemeltetési költségek csökkentése szempontjából fontos. Az állapotfigyelésen alapul, ezzel egyrészt messzemenően lehetségessé válik a lehető legnagyobb élettartam elérése, másrészt a jelentős költségkihatásokkal járó üzemkiesések elkerülése is. Ebből következően nő a szerkezet megbízhatósága, mert korrigálja a tervezés és a gyártás folyamán elkövetett hibákat, közelítéseket. Ez utóbbiak vonatkozásában utalni kell Nagy Gy.: *Kisciklusú fárasztás* c. munkájának bevezető részében leírtakra:

"A tervezéskor bizonytalanságot jelent a szerkezet tényleges mechanikai állapota és a számításához felhasznált modell közötti eltérés. Ez a hiba egyszerű szerkezeti kialakítások esetében nem jelentős, de bonyolultabb részek, keresztmetszet változások, elágazások, nyomástartó edények esőcsonkjai esetében stb. már számottevő; a ma használatos alak- és formafaktórokkal csak pontatlanul közelíthető.

A feszültségi és alakváltozási állapot tisztázatlanságán kívül bizonytalanságot jelent az anyag, ill. a használatos anyagjellemzők pontos ismeretének hiánya. Általánosan használt az anyagminőséghez kötődő legkisebb folyáshatár alkalmazása, amelynél a beépített anyag folyáshatára általában nagyobb. Ugyanakkor ez a megközelítés nem veszi figyelembe a ma még szükségszerűen meglévő, megengedett anyagfolytonossági hibákat.

A tervezéskor nem vagy csak korlátozottan lehet figyelembe venni bizonyos, gyártás közben jelentkező hatásokat. Nevezetesen a technológiai művelet közben keletkező, de még megengedhető hibákat, pl. hegesztett kötések hibái, ill. a megmunkálás következtében létrejövő maradó feszültségeket.

A normál üzemeltetés során is adódnak olyan járulékos terhelések, amelyek a tervezéskor fel sem merültek, ill. vannak olyanok, melyek a tervező számára ismertek, de számszerűsítésük nehézkes és így nehezen vehetők figyelembe. Példaként említhetők a hőmérsékletváltozásokból, a szállókésekből, az indítási és leállási folyamatok tranziens hatásaiból stb. származó járulékos terhelések.”

Hibák származhatnak tehát mind a tervező, mind az üzemeltető részéről. Ugyanakkor a bizonytalanságok miatt jelentős tartalékok is lehetnek, amelyek az élettartamot jelentősen meg is növelhetik. A tartalékok vonatkozásában gondoljunk csak a gördülőcsapágyakra. A csapágykatalógusokban megadott dinamikus teherbírás (C) egy olyan érték, amelyre méretezve (kiválasztva) a csapágyat, azok 90 %-a a névleges élettartamot (10^6 körülfordulás) eléri vagy meghaladja. Azaz bizonyos számú csapágyonál jelentősen nagyobb élettartamra is számítani lehet. Mindezek elkerülése csak fokozott költségekkel, s csak egy bizonyos mértékig lehetséges, de egy állapotfigyeléssel (rezgésjellemzők mérése útján) mindezek jórészt ki is védhetők.

Az elérhető megtakarításokra csak egyetlen tényt célszerű megemlíteni. Amikor ezt az eljárást elsőként tengeri fűtőtornyok szivattyúinak karbantartásánál alkalmazták, s még az elméleti alapok sem voltak teljesen tisztázva, már a kezdetnél mintegy kétharmadára lehetett csökkenteni a karbantartási költségeket.

2. Rezgésvizsgálatok

2.1. A rezgésekkel kapcsolatos alapfogalmak

A rezgés – a Magyar Értelmező Szótár megfogalmazása szerint – egy egyensúlyi helyzetéből ellentétes irányokba kitérő testnek, anyagi részecskének vagy fizikai jelenségnek (pl. villamos feszültségnek) periodikus ingadozásaiból álló változása, ill. e változásnak egy mozzanata. Lehet *csillapítatlan*, amikor pl. a kitérés állandó vagy *csillapított*, ahol e változás az idő függvényében csökken. E megfogalmazáson túl a jelenség lehet *aperiodikus* is, amelynek időbeli lefolyása elvileg minden periodicitástól mentes.

Maga a rezgés leírható a (részecske)kitérés (s), a (részecske)sebesség (v) vagy a (részecske)gyorsulás (a) időbeli változásával

$$s = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

$$v = \frac{ds}{dt} = A \omega \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -A \omega^2 \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

ahol a már ismerteken kívül A a rezgés kitérés, sebesség vagy gyorsulás amplitúdója; ω a rezgés körfrekvenciája; t az idő; φ a fázisshift. E három alapösszefüggés bármelyike ábrázolható időfüggvényével (l. l. *ábra*) vagy spektrumával (frekvencia-csoztlásával) egyaránt.

A periodikus rezgés legegyszerűbb esete a tisztán szinuszos rezgés (2. ábra), amely a műszaki gyakorlatban legegyszerűbb elemként kitüntetett szerepet játszik. Egyik legfontosabb jellemzője a T rezgésidő, ill. annak reciproka, a frekvencia

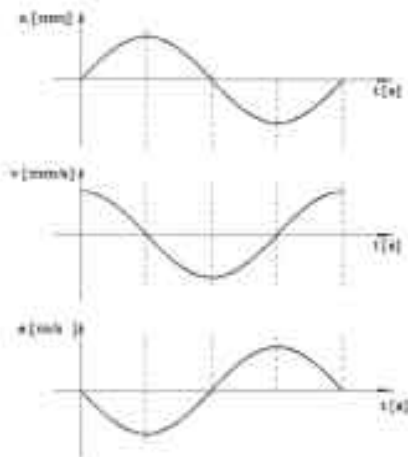
$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

vagy a körfrekvencia

$$\omega = 2 \pi f. \quad (5)$$

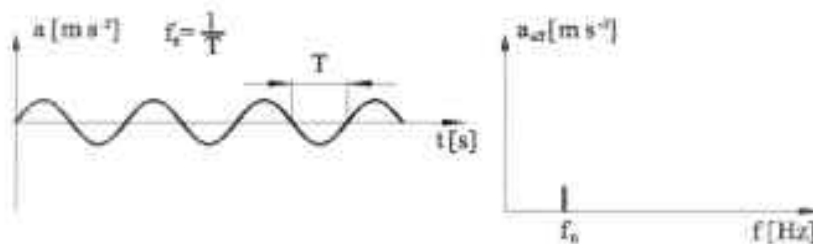
Gyakran kell több szinuszos rezgés egyidejű megjelenésére számítani. A 3. ábra pl. két elemi (szinuszos) rezgés egyidejűségét szemlélteti, ahol $T_1 = 2 T_2$, ill. $f_1 = f_2/2$.

Gyakorlatilag minden periodikus rezgés szinuszos rezgések összetételének tekinthető (statisztikus rezgés). Ilyen rezgés pl. a szabályos *négyszög-rezgés* is (4. ábra), amelynél jól látható, hogy a spektrumban csak a páratlan együtthatójú összetevők jelennek meg.



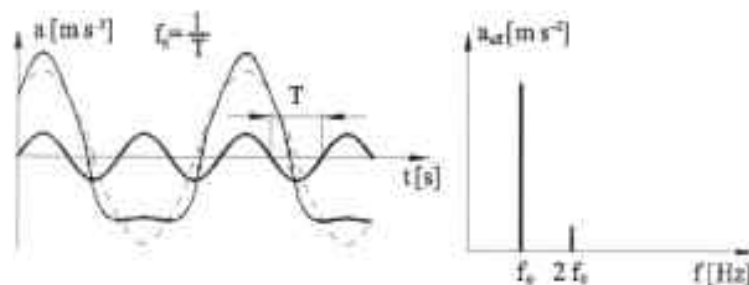
1. ábra

Összefüggés a harmonikus rezgőmozgás jellemzői között $\varphi = 0$ esetben



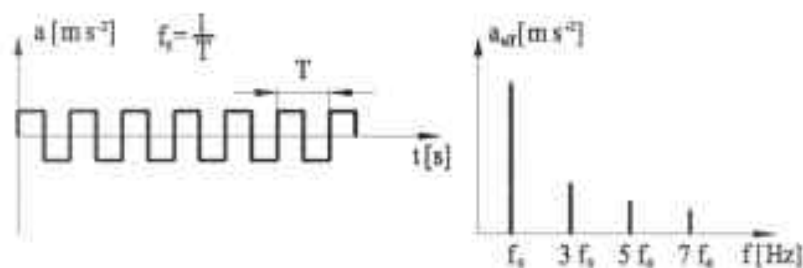
2. ábra

Tisztán szinuszos rezgés idő- és frekvenciafüggvénye (spektruma)



3. ábra

Két szinuszos rezgés eredő idő- és frekvenciafüggvénye (spektruma)



4. ábra

Négyszögrezgés idő- és frekvenciafüggvénye (spektruma)

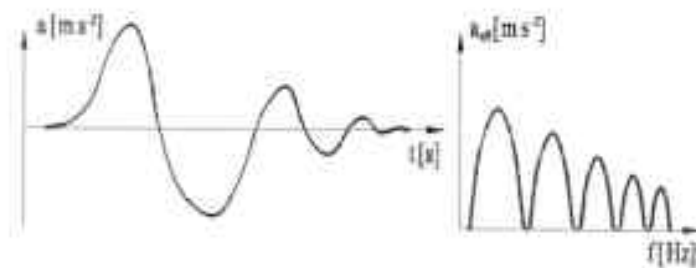
Ezekben az esetekben az egyes összetevőket a *Fourier-féle sorfejtéssel* lehet meghatározni. Ekkor

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_k \cos k \omega t + b_k \sin k \omega t), \quad (6)$$

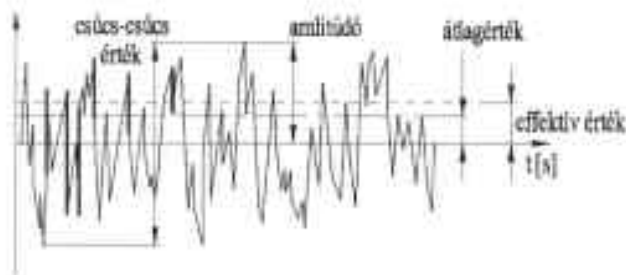
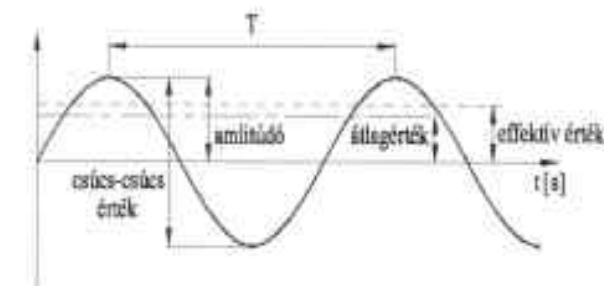
ahol a_0 , a_k és b_k állandók (*Euler-Fourier-féle* együtthatók); k természetes szám.

A csillapított rezgés egyedi esetének fogható fel a *transziens rezgés* (pl. 5. ábra), amely főként indítási és leállási folyamatoknál tapasztalható.

A rezgés jellemzésére a *kitérés – idő* (vagy *sebesség – idő*, ill. *gyorsulás – idő*) függvényen túl annak *amplitúdója*, az *amplitúdó átlagértéke* vagy *effektív értéke*, esetenként *csúcstól-csúcsig értéke* szolgálhat (6. ábra).



5. ábra
Tranziens folyamat



6. ábra
Rezgésjellemzők értelmezése tisztán szinuszos és statisztikus rezgés esetén

Az átlagérték (average value)

$$x = \frac{1}{T} \int x(t) dt, \tag{7}$$

az *effektív érték* (négyzetes középérték: *Root Mean Square; RMS*)

$$x_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int [x(t)]^2 dt}. \quad (8)$$

Ez utóbbi megfelel az elektrotechnika effektív értékének, s ebből következően a rezgés teljesítményére jellemző.

2.2. Szintek

2.2.1 Teljesítményszint

A mindennapi életben előforduló rezgésforrások teljesítménye, s ezzel azonosan valamennyi jellemzője is igen széles tartományban mozog, közelítően mintegy 15 nagyságrendet fog át. A számítások egyszerűsítése céljából ezért bevezették a *szintértéket*, amely egy célszerűen megválasztott alaphoz való viszonyítást jelent logaritmikus rendszerben:

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

ahol P az a forrásteljesítmény, amelynek szintértékét keressük; P_0 a viszonyítási alap (referencia). Az összefüggésbe mindkettőt azonos mértékegységben kell behelyettesíteni. A szint mértékegysége a *decibel*, jele *dB*.

A decibel mértékegységű szintérték eredeti megfogalmazásában mindig teljesítmény jellegű mennyiségekre vonatkozik, ezért a származtatott szinteknél az összefüggés módosulhat.

A szintérték jelen majdnem minden esetben L , de indexben ki kell tenni, hogy mely (teljesítmény jellegű) jellemzőre vonatkozik. Így L_w a *teljesítményszint*. Amennyiben P_0 nemzetközileg rögzített érték, úgy *abszolút szintről*, ellenkező esetben *relatív szintről* beszélünk. Ez utóbbinál az egyértelműség érdekében a decibel után mindig meg kell adni annak értékét is (pl. dB/1 W). Külön jelölés hiányában a szint mindig abszolút!

A nemzetközileg rögzített viszonyítási alap 1 pW, amely akusztikai okokra, a hallásküszöbre vezethető vissza. Gyakorlati (méréstechnikai) okokból a szintértékeket mindig egész dB-re kell kerekíteni!

A forrást meghatározó teljesítmény több nagyságrendet átfogó változásából következik, hogy minden ebből származtatott – a forrás környezetét vagy magát a forrást leíró – jellemző (részecskesebesség, - gyorsulás stb.) hasonló mértékben ingadozik, ezért bevezetése ezeknél is célszerű.

2.2.2 Származtatott szintek

Rezgések megítélésénél a teljesítményszint használata csak elvétve fordul elő, helyette valamelyik célszerűbben kezelhető, a teljesítménnyel egyenértékű jellemző szintértékét használjuk.

A gyakorlat célszerűségi okokból számos olyan, teljesítmény jellegű szintet is értelmez – alapvetően rezgések vonatkozásában –, amelyek használata egyrészt a mérési feladatok kiértékelését, másrészt a forrásjellemzők elemzését könnyíti meg. E szintek fizikai törvényszerűségek alapján (9)-ből közvetlenül levezethetők.

A gyorsulásszint

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{a_0} \quad [\text{dB}], \quad (10)$$

ahol $a_0 = 1 \mu\text{m s}^{-2}$, összhangban a teljesítményszintnél rögzített $P_0 = 1 \text{ pW}$ -tal.

A sebességszint

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0} \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

Gyakorlati okokból gyakran $v_0 \neq 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, hanem a negatív értékek elkerülése miatt ennél kisebb, $v_0 = 1 \text{ nm s}^{-1}$. Néhány állam (és műszergyártó cég) ettől eltérő referenciát alkalmaz, így adatfelhasználásnál fokozott körültekintéssel kell eljárni! Az eltérés figyelmen kívül hagyása nagyságrendi különbségeket is eredményezhet!

A kitérésszint

$$L_x = 20 \lg \frac{x}{x_0} \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

Általában $x_0 = 10^{-11} \text{ m}$ szokásos, azaz nem következik a teljesítményszint vonatkoztatási alapjából.

3. Mérőszámok

Rezgésjellemző alatt általában azt a fizikai mennyiséget értjük, amely erősségére utal. Méréstechnikai okokból ez a (részecske)kitérés, (részecske)sebesség vagy (részecske)gyorsulás (a továbbiakban kitérés, sebesség, gyorsulás) lehet. Bármelyikük a frekvenciával és a fázisszöggel kiegészítve az idő függvényében a jelenséget egyértelműen leírja.

A gyakorlatban egy rezgés különböző frekvenciájú tiszta szinuszos jelek eredője. Önmagában egy tiszta szinuszos jel esetén bármely jellemző egyenértékű a kapott információt tekintve, összetettnél viszont a feladat jellegétől függően kell választani

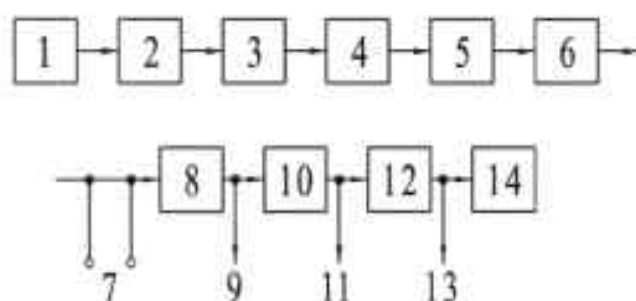
A kitérést választva (szélessávú mérésnél) a kisfrekvenciájú összetevők kerülnek előtérbe (a gyorsulásmérés inkább a nagyobb frekvenciájú összetevőket emeli ki). Alkalmazása kiegyensúlyozatlanság kimutatása, kis légrésű forgó gépek, továbbá szerszámgépek esetén szokásos. Ez utóbbiaknál ugyanis a megmunkált felület mérete, alakhűsége és felületminősége meghatározza a megengedhető kitérést.

A rezgéssebesség a rezgés energiataralmával van kapcsolatban. Gépállapot, épületkárosodások elbírálására és kimutatására, továbbá pl. földrengések erősségének mértékére (I. *Mercalli-skála*) egyértelműen jellemző.

Az élő szervezetre gyakorolt hatás szempontjából a rezgés gyorsulás mérvadó, de bizonyos esetekben a gépészeti gyakorlat (pl. gördülőcsapágyak állapotellenőrzésénél) is alkalmazza. Egyúttal a környezeti terhelés mérőszáma is, s mint ilyen, tevékenységi körönként részletesen előírt.

4. Műszerelemek

Rezgésmérési célokat szolgáló műszer elvi felépítését a 7. ábra szerinti blokkvázlat mutatja.



7. ábra
Rezgésmérő blokkvázlata

- | | | | |
|----|--|-----|--|
| 1. | rezgésérzékelő | 8. | erősítő |
| 2. | töltéserősítő | 9. | váltakozó áramú kimenet |
| 3. | integrátor (gyorsulás, sebesség, kitérés váltásztás) | 10. | egyenirányító |
| 4. | felálláteresztő szűrő | 11. | egyenáramú kimenet |
| 5. | erősítő | 12. | konverter |
| 6. | aluláteresztő szűrő | 13. | logaritmikus egyenáramú kimenet (szintérték) |
| 7. | külső szűrő | 14. | kijelző |

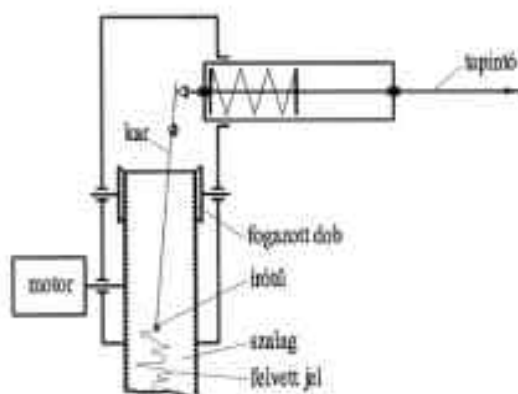
Gyakorlati (mérési) szempontból legfontosabb az érzékelők és a (külső) szűrő ismerete, miután e két elem az információszerzést tekintve meghatározó.

4.1 Rezgésérzékelők

A rezgésérzékelők a rezgésjellemzők valamelyikét (*kitérés, sebesség, gyorsulás*) mérik. Ezek többnyire mechanikus-elektromos átalakítók, azaz a mechanikai rezgés a bemenő jel, amely villamos feszültségként jelenik meg a kimeneten. (A nagyon kis frekvenciák tartományában a kitérés optikai úton is mérhető, ennek előnye nagy leolvasási pontossága.)

A *kitérés érzékelők* mechanikus, villamos és optikai elven működnek.

A *mechanikus kitérés érzékelő* elvi felépítését a 8. ábra mutatja. Működése azon alapszik, hogy beállítható áttételekkel a rezgés kitevést felnagyítja, s azt egy állandó sebességgel haladó szalagra rögzíti. Általában az írássebesség változtatható. Szokásos hitelesítő jel felvitele is meghatározott időnként, amelyből pontosan meghatározható a frekvencia, de a rezgéskép tovább is nagyítható, így a kitérés közvetlenül leolvasható, s a frekvencia ezen az úton is számítható. Frekvenciatartományuk 0...200 Hz, a szokásos max. nagyítás 40-szeres, amplitúdótartományuk 0,05...0,5 mm. Hibái ellenére egyszerűsége miatt igen elterjedt, gyakran *optikai* elvvel kombinált (nagyítás tükörrel).



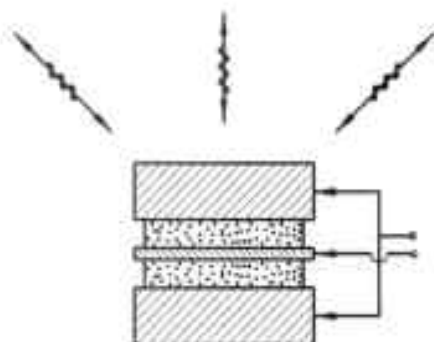
8. ábra
Mechanikus kitérés érzékelő vázlata

A *villamos kitérés érzékelő*knél több elv is elterjedt. *Nyúlásmérő bélyeges* megoldásnál az érzékelő közvetlenül a vizsgált elemre ragasztott, s követi annak alakváltozását. Ez ellonállás-változásként jelentkezik, amelyet villamos úton lehet mérni. A *kapacitív kitérés érzékelő* főként forgó elemek, továbbá igen kis tömegű tárgyak mérésénél szokásos. Működése a kondenzátor elven alapszik. Jellemzőjük a nagy érzékenység, a széles frekvenciatartomány. Hátrányuk, hogy csak relatív értékeket szolgáltatnak (nehezen hitelesíthetők, ill. kalibrálhatók), ill. csak kis kitérések mérésére alkalmasak.

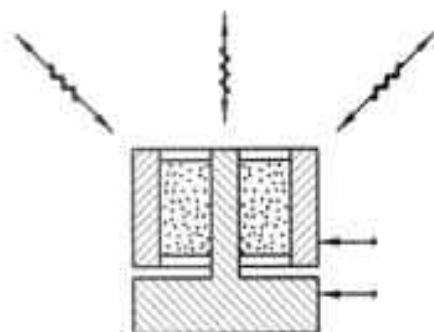
A *rezgésebbesség érzékelők* működési elve a dinamikus mikrofonokéval egyező. Tömegük viszonylag nagy (rendszerint 500 g felett), a kisebbek a nagyobb belső súrlódás miatt kevésbé érzékenyek. Kialakításuktól függően abszolút és relatív érzékelők lehetnek. Az előbbinél a tekercs, az utóbbinál az állandó mágnes rögzített. Frekvenciatartományuk 10...1000 Hz.

A *rezgés gyorsulás érzékelő* a legelterjedtebb típus. A piezoelektromos elven működnek. Előny az egyszerű szerkezeti kialakítás, a kis tömeg (néhány gramm), a széles frekvenciatartomány, a tömör szerkezet, a széles dinamika-tartomány, az időstabilitás, az egyszerű hitelesítés (kalibrálás) és használat, a normál környezeti hatásokkal szembeni érzéketlenség, továbbá az, hogy nem tartalmaz mozgó alkatrész (nincs kopás!), öngerjesztett és olesó. Hátrányként jelentkezik a nagy impedancia (csak korlátozott hosszúságú kábelek alkalmazhatók), s bizonyos körülmények között a *piezoelektromos hatás* fellépése. (*Piezoelektromos hatás*: kis hőmérséklet változások következtében a polarizációs irányra

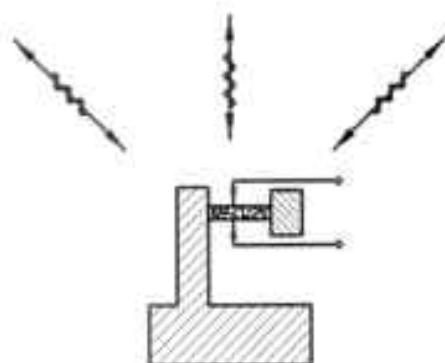
merőleges síkok között töltésvándorlás indul meg, amely a mért jeleket kisülés útján zavarja.) Kialakítását tekintve *kompresziós* (9. ábra), *nyírt* (10. ábra) és *hajlított kristályos* (11. ábra) típus lehet.



9. ábra
Kompresziós típusú gyorsulásérzékelő



10. ábra
Nyírt kristályos gyorsulásérzékelő



11. ábra
Hajlított kristályos gyorsulásérzékelő

A kompresziós típusra a nagy terhelhetőség, a kiváló érzékenység, a viszonylag nagy tömeg és a magas rezonancia frekvencia jellemző. A nyírt kristályos típus a hőmérsékleti

hatásokra gyakorlatilag érzéketlen (Δ -Shear típus). A hajlított kristályos típus igen nagy érzékenységgű, rezonancia frekvenciája alacsony, max. terhelhetősége korlátozott. Ez utóbbit műszaki célokra csak elvétve alkalmazzák. Valamennyi típusra jellemző, hogy minél nagyobb az érzékelő tömege, annál nagyobb érzékenysége is.

Miután a gyorsulásérzékelők a legelterjedtebb rezgésérzékelők, néhány fontosabb tulajdonságukról külön is említést kell tenni.

A gyorsulásérzékelők egy meghatározott frekvenciatartományban a gyorsulással egzakt módon azonos kimenő jelet adnak. A tartomány alsó határát az érzékelő tömege, a felsőt rezonancia frekvenciája határozza meg. Tipikus jelleggörbét a 12. ábra mutat.



12. ábra
Gyorsulásérzékelők jelleggörbéje

A kimenő jel az alkalmazható méréstartományban a gyorsulással arányos (13. ábra). Az alsó méréshatárt általában az előerősítő, a felsőt az érzékelő szilárdsága szabja meg.



13. ábra
A be- és a kimenő jel közötti kapcsolat gyorsulásérzékelőknél

Jellemzőjük az *érzékenység* (átviteli tényező). Ez a kimenő oldalon megjelenő feszültség és a bemenő oldali rezgés gyorsulás viszonya

$$\eta = \frac{U}{a} \quad [\text{mV} / \text{g}], [\text{mV} / \text{m s}^{-2}], [\text{pC} / \text{m s}^{-2}]. \quad (13)$$

Szokásos értékei – típustól függően – 12...100 mV/g (0,2...10 mV/m s⁻²).