

Szerkezetfárasztás

(segédlet a gyakorlati órákhoz)

Dr. Gedeon József

ny. tud. főmunkatárs

előadásai alapján készítette:

Dóra Sándor

tanársegéd



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Közlekedésmérnöki kar
Járműváz és Könnyűszerkezetek tanszék

Budapest, 2007. március 1.

Tartalomjegyzék

1. Üzemi terhelésmérések	3
1.1. Méréstechnikai alapfogalmak.....	3
1.1.1. Közvetlen mérés.....	3
1.1.2. Közvetett mérés.....	4
1.1.3. Digitális mérőrendszerek.....	4
1.2. A mérések célja és csoportosítása.....	5
1.2.1. A gerjesztő hatások mérése.....	5
1.2.2. Szerkezetfárasztási kísérletek.....	6
1.2.3. Átviteli karakterisztika mérése, gerjesztésszimuláció.....	6
1.3. Érzékelők.....	6
1.3.1. Mérőhíd.....	6
1.3.2. Nyúlásmérő bélyegek.....	7
1.3.3. Induktív érzékelők.....	8
1.3.4. Kapacitív érzékelők.....	9
1.3.5. Piezoelektromos érzékelők.....	10
1.3.5. Az érzékelők dinamikus tulajdonságai.....	11
1.4. Regisztráló műszerek.....	14
Irodalomjegyzék	16

1. Üzemi terhelésmérések

A fejezet célja a járművázak kifáradási szempontból történő méretezése során alkalmazott mérési eljárások és mérőrendszerek használatának ismertetése. Elsőként a mérésekkel kapcsolatban felmerülő általános problémákat elemezzük, és kiemeljük a korábbiakban már tanult alapfogalmak jelenleg fontos vonatkozásait. Ezután áttekintjük a járművázak tervezésével, méretezésével és ellenőrzésével kapcsolatos mérési eljárásokat. Részletesen foglalkozunk a mérésekhez használt érzékelők felépítésével és működési elvével, különös tekintettel a dinamikus tulajdonságokra. Végül megismerkedünk a regisztráló műszerek és adatrögzítő berendezések főbb típusaival.

1.1. Méréstechnikai alapfogalmak

Minden mérés közös jellemzője, hogy a kapott érték mérési hibát tartalmaz, tehát nem egyezik meg a valósággal. A mérnök számára fontos, hogy tisztában legyen ezen hibák jellemzőivel, valamint a csökkentésükre kidolgozott módszerekkel. Annál is inkább szükséges ez, mert sokszor a műszergyártók sem vallanak be mindent...

Általánosan elmondható, hogy a mérőrendszer összetettségének növelésével a hibák lehetősége és várható értéke is növekszik. Ezért a mérések kivitelezésénél lehetőség szerint törekedni kell az egyszerűsége.

A méréseket több szempont szerint csoportosíthatjuk. A számunkra legfontosabb tulajdonság alapján két fő csoportot különböztethetünk meg: *közvetlen* és *közvetett* mérést. Közvetlen mérés esetén a mérendő mennyiséget egyszerűen összehasonlítjuk a mértékegységgel. Ilyen például a hosszúságmérés. Közvetett mérésnél a mérendő mennyiség nem megfigyelhető, csak annak valamilyen más mennyiségre gyakorolt hatása. Ilyen a rugó segítségével történő erőmérés, amikor valójában az erő hatására történő elmozdulást mérjük, vagy a mechanikai feszültség mérése, de ebbe a csoportba sorolandó a hőmérsékletmérés is. Fontos látni, hogy a közvetett jelleg jelentősen megnöveli a mérés bizonytalanságát. Ennek jelentősége, hogy a gyakorlatban az elektromos jelfeldolgozás miatt szinte csak közvetett mérésekkel lesz dolgunk.

A méréseket csoportosíthatjuk még a kapott eredmények fajtája szerint. Így megkülönböztetünk *abszolút* és *összehasonlító* méréseket. Az összehasonlító műszerek az ún. *komparátorok*, amelyek valamely mennyiség adott határok közötti voltát ellenőrzik. Ezek relatív skálával rendelkeznek, és a kalibrálást valamilyen etalonnal, például mérőhasábbal vagy beállító gyűrűvel kell elvégezni. Ilyen műszerek a mérőórák, pneumatikus komparátorok és a különböző kaliberek.

1.1.1. Közvetlen mérés

Közvetlen mérésnél a mérendő mennyiséget egyszerűen összehasonlítjuk a mértékegységgel. Még ezen egyértelműnek látszó eljárás során is felmerülnek hibalehetőségek. Forrásuk szerint megkülönböztetünk *műszer*, *személyi* és *környezeti* hibákat. A hiba jellege szerint lehet *rendszeres* és *véletlen*.

A rendszeres műszerhibákat a hitelesítési eljárás során kellő pontosságú ellenőrző műszer és etalonok segítségével meghatározhatjuk. A kapott eredmények alapján a műszerekhez hitelesítési görbéket szerkeszthetünk, amelyek segítségével ezen hibák korrigálhatók. A mikroprocesszoros mérőműszerek a kalibrálás után eltárolják a hitelesítési görbét, és méréskor azonnal a korrigált értéket mutatják.

A leolvasási hibák (pl. parallaxis hiba) elsősorban az analóg műszerekkel kapcsolatban merülnek fel. A digitális műszereknél ezen hibafajtának a szerepét a kijelzett érték pontossága veszi át. A mérési eredmények megadásánál elvben mindig fel kellene tüntetni azt a

bizonytalansági sávot, amelyen belül a valós érték egy adott valószínűséggel megtalálható. A gyakorlatban az az általános eljárás, hogy a megadott érték utolsó számjegye már bizonytalan. Ennek ellenére meg kell győződni a digitális műszerek kijelzésének valódi pontosságáról. Előfordulhat ugyanis, hogy az A/D átalakító véges felbontása miatt bizonyos méréshatárokból akár több számjegy is van, amely nem változhat folytonosan.

A mérnöki gyakorlatban általában a 90%-os megbízhatósági intervallum már elfogadható, de előfordulhat ettől eltérő szélességű megbízhatósági sáv is. Mérési eredmények esetén a statisztikai módszerekből ismert szórás segítségével határozhatjuk meg a megbízhatósági sávot, míg regressziós illesztésnél a *relatív hibaszórás* kiszámításával.

A környezeti hibákat a mérés közben fellépő zavaró hatások okozzák. Ilyen például a hőmérséklet megváltozása, a rázkódás vagy a külső elektromágneses zavarás. A műszerek hitelesítésénél rögzíteni kell a hitelesítés hőmérsékletét is. A közvetett mérésekről szóló fejezetben további környezeti hibákat is megismerünk.

1.1.2. Közvetett mérés

Közvetett mérésnél a mérendő mennyiséget fizikai törvényszerűségek felhasználásával egy könnyebben regisztrálható (szinte kizárólag villamos) mennyiséggé alakítjuk át. Az átalakítás lehet többszörösen áttételes is, amelynek matematikai kezelhetőségét a fizikai összefüggések biztosítják. A szerkezetdinamikai mérési gyakorlatban szinte csak közvetett mérések fordulnak elő, és a regisztráló műszerek mindig villamos mennyiségeket mérnek és erősítenek. Ilyenkor a mérendő mennyiség átalakítása, valamint a villamos jel továbbítása újabb problémákat vet fel a mérési pontossággal kapcsolatban.

A mérési tartományokat két helyen is illeszteni kell: az érzékelőét a mérendő mennyiséghez, a regisztráló berendezését pedig az átalakított analóg villamos jelhez. Azt a legkisebb méréshatárt kell kiválasztanunk, ami még éppen szélesebb a jelek által befutott tartománynál. Az átalakítás után kapott villamos jel továbbítása is problémákat okozhat. Az analóg jel nagyobb távolságra is látszólag kényelmesen elvezethető, és nagyobb méretű szerkezeteken végzett mérésénél a hosszú kábelek nem is hagyhatók el. A vezeték hosszának növekedésével azonban megnövekszik azok ellenállása és parazita kapacitása is, tehát egyre inkább aluláteresztő jellegűvé válnak. Ezzel párhuzamosan növekszik a külső elektromágneses terek zavaró hatása is.

1.1.3. Digitális mérőrendszerek

Ma már szinte csak digitális kimenetű mérőrendszerek használatosak, amelyek az érzékelők által szolgáltatott analóg villamos jelet digitális formában rögzítik, így azok számítógéppel hatékonyan feldolgozhatók. Ezek a mérések a folyamatos A/D átalakítás miatt hordoznak újabb hibalehetőségeket, amelyeknek csak egy részét képviselik az A/D átalakító hibái.

A szerkezetdinamikai mérési gyakorlatában a több csatornás A/D átalakítással szemben támasztott követelmények teljesítése jelenti a fő problémát. A mérőrendszerek gazdasági és gyártástechnológiai okokból általában csak egy darab (több, mint száz csatornás mérés esetén is csak néhány darab) A/D átalakítót tartalmaznak. Számunkra azonban fontos az egyes csatornák jelének azonos időpillanatban történő mintavételezése. Ennek megoldása viszont a gyártótól függ. Előfordulhat, hogy az egyes csatornák mintavételezése egymás után, egyenletes időközönként történik. Ez nemkívánatos működésmód, azonban ha mégis ez a helyzet, a számítógépes feldolgozó programokban az időeltolódás ismeretében a keletkezett hiba részben korrigálható. A legkedvezőbb megoldás az, amikor minden csatornát külön mintavevő-tartó áramkörrel látnak el, és azokat egyazon időpillanatban kapcsolják tartás állapotba. Ezután az A/D átalakítás már egyenként elvégezhető.

1.2. A mérések célja és csoportosítása

A gyakorlati szempontok szerint háromféle mérésre lehet szükség:

- Fel kell mérnünk az adott, legtöbbször még meg sem épített járművet üzem közben érő környezeti hatásokat, amelyek a jármű mint több-szabadságfokú lengőrendszer gerjesztését okozzák.
- Ha már ismertek a gerjesztő hatások, akkor előfordulhat, hogy egy meglévő szerkezetet, vagy annak valamely részét, esetleg egy modell szerkezetet kell kifáradási szempontból minősítenünk.
- A dinamikai, legtöbbször végeselemes modellek finomítása, illetve az azok vizsgálatával szerzett eredmények ellenőrzése érdekében szükség van olyan mérésekre is, amelyekkel meghatározhatók a járműnek az egyes gerjesztésekre adott válaszai.

A következőkben ezeket a mérési eljárásokat tekintjük át, különös figyelmet fordítva a mért jellemzőkre. Ezek fajtái szerint választhatjuk ki a szükséges érzékelőket.

1.2.1. A gerjesztő hatások mérése

A méretezés során szükségünk van a járművet gerjesztő környezeti hatások mérésére. Ezek alapján állíthatjuk össze a fárasztókísérletek terheléskollektíváit, illetve a regisztrátumokat elemezve adatokat nyerhetünk a számításokhoz, vagy a számítógépes szimulációhoz.

A gerjesztő hatások mérése a járműtípustól függően az út- vagy sínprofil felvételét, a vízhullámzás, illetve a légköri turbulencia mérését jeleneti. Az útprofil mérésére három lehetőségünk van:

- A felmérést elvégezhetjük teodolitok segítségével. Ehhez ki kell jelölnünk egy vagy két nyomvonalat, amelyek mentén azonos lépésközzel magasságmérést fogunk végezni. Ez az eljárás rendkívül drága és időigényes, de ez adja a legpontosabb eredményt.
- Alkalmazhatunk még ötödik kerekes mérést. Ekkor egy járműhöz csuklós csatlakozással – amely elfordulást és függőleges elmozdulást is megenged – egy mérőkereket rögzítünk. A mérendő úton haladva, és az ötödik kereket a kijelölt nyomvonalon végigvezetve a felfüggesztésére szerelt gyorsulás jeladó segítségével mérjük a függőleges mozgást. Az így felvett profil azonban nem pontos, ún. kopírozási hiba keletkezik, mert a véges sugarú kerék a kisebb egyenetlenségeket nem tudja pontosan követni. A mérőrendszer aluláteresztő szűrőként működik.
- Ötödik kerék helyett a jármű tengelycsonkjainak gyorsulása is mérhető. Ahhoz, hogy az így kapott regisztrátumból következtethessünk az útprofil tulajdonságaira, próbapadon meg kell határoznunk a tengelycsonkok és a kerék talppontok közötti átviteli függvényt. Ez azonban igen nehéz, és pontatlan, hiszen a gumibroncs jellemzői még menet közben is változnak. Természetesen itt is fellép az ötödik kerekes mérésnél leírt kopírozási hiba is. A sínhibák mérésére használt mérőkocsi ennek a megoldásnak felel meg a vasutas gyakorlatban.

A vízhullámoknak mérhetjük közvetlenül a magasságát, vagy a hullámhosszát. A hullámmagasság mérésére nyomásmérő is felhasználható, és a hullám terjedési sebességének ismeretében a hullámhossz a nyomásváltozások periódusidejéből is kiszámítható.

Légköri megfigyelés végezhető az irányítótoronyban a szélsősebesség mint időfüggvény meghatározásával, vagy használhatunk kalibrált repülőgépet, amelynek a gyorsulását regisztráljuk. Ismeretesek még a doppler effektust felhasználó, radarhoz hasonló lézeres berendezések is, amelyek a levegővel együtt mozgó porrészecskék sebességeloszlását tapogattják le. Ezek segítségével egyidejű mélységi megfigyelés is végezhető.

1.2.2. Szerkezetfárasztási kísérletek

Fárasztókísérlet alatt a próbadarabnak a valós üzemi körülmények alapján előállított dinamikus terhelését értjük. A kísérlet alatt a szilárdsági és kifáradási szempontból kritikus helyeken mérjük az alakváltozásokat és a feszültségeket. Ezt az elmozdulások regisztrálásával és nyúlásmérő bélyegek felragasztásával oldjuk meg.

1.2.3. Átviteli karakterisztika mérése, gerjesztésszimuláció

Az útprofil mérésénél már szó volt a jármű átviteli jellemzőinek kiméréséről. Ezt a feladatot speciális, több csatornás pulzator felhasználásával oldhatjuk meg. A járművet a kerekek alá helyeztük, vagy a tengelycsomókra csatlakoztatott hidraulikus munkahengerekkel gerjeszthetjük. Közben általában gyorsulás jeladó segítségével regisztráljuk a felépítmény egyes elemeinek mozgását. Ilyen pulzatoron lefuttatható egy előzetesen két nyomon felmért útprofil által okozott gerjesztés is. A szimulált útprofilon való végighaladás során általában feszültségmérést is végzünk a felépítmény kritikusnak ítélt helyein. A gyorsulásmérők és a nyúlásmérő bélyegek helyének kiválasztásához előzetes számítógépes szimuláció (pl. modál-analízis) nyújt segítséget.

Ezeknél a méréseknél problémát okoz a gumiabroncsok átviteli karakterisztikáinak nagy szórása. A karakterisztika még a mérés alatt is jelentősen változhat. Elfogadott módszer, hogy a menet közben jelentkező centrifugális erő szimulálása céljából a guminyomást az előírt értéknél nagyobbra állítják be.

1.3. Érzékelők

Az érzékelő (más néven mérőátalakító) célja, hogy a mérendő mennyiséggel arányos feldolgozható jelet állítson elő. A villamos mennyiségek egyszerű kiértékelhetőségére való tekintettel a feladat a nem villamos mennyiség olyan villamos mennyiséggé alakítása, amely tartalmazza a mérendő mennyiségre vonatkozó információkat. A járműváz mérési gyakorlatban legtöbbször a következő négy jellemző mérésére lehet szükség: elmozdulás, gyorsulás, erő, mechanikai feszültség.

Működési elvük szerint az érzékelők két nagy csoportra oszthatók: *passzív* és *aktív* érzékelőkre. A passzív érzékelők az áramkör valamely villamos jellemzőjét (ellenállás, kapacitás, induktivitás) változtatják a mérendő mennyiségnek megfelelően, az aktív érzékelők működése során pedig a mérendő mennyiséggel arányos villamos energia keletkezik. A járműváz mérési gyakorlatban *ellenállásos*, *induktív* és *kapacitív* passzív érzékelőket használnak. Az aktív érzékelőket a *induktív* és *piezoelektromos* érzékelők képviselik.

1.3.1 Mérőhíd

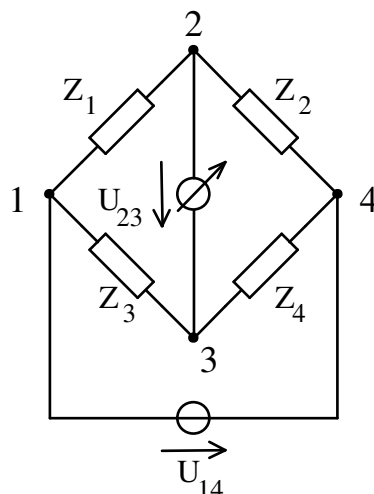
Az érzékelőket nem kötik össze közvetlenül a műszerek bemenetével, hanem ún. *hídkapcsolásban* működtetik, kihasználva az ezzel járó előnyöket. A *Wheatstone* mérőhíd kapcsolása az 1.1. ábrán látható.

A kapcsolást az U_{14} feszültségforrásról tápláljuk, és az U_{23} feszültséget regisztráljuk. Ennek értéke:

$$U_{23} = U_{14} \left(\frac{z_3}{z_3 + z_4} - \frac{z_1}{z_1 + z_2} \right) \quad (1.1)$$

A híd kiegyenlített, ha $U_{23} = 0$, és kiegyenlítetlen, ha $U_{23} \neq 0$. A mérőkör érzékenységét a $\frac{dU_{23}}{dX_m}$ differenciálhányadossal definiáljuk, ahol X_m a mérendő mennyiség. A híd érzékenysége az impedanciáknak a kiegyenlített állapothoz képesti kis megváltozására:

$$\frac{dU_{23}}{U_{14}} = \frac{1}{4} \left(-\frac{dZ_1}{Z_1} + \frac{dZ_2}{Z_2} + \frac{dZ_3}{Z_3} - \frac{dZ_4}{Z_4} \right) \quad (1.2)$$



1.1. ábra

A $Z_1 - Z_4$ impedanciák egy része állandó értékű, de legalább egy közülük érzékelő. Attól függően, hogy a hídbe 1, 2 vagy 4 érzékelőt kötünk *negyed*, *fél* vagy *teljes* hídkapcsolásról beszélünk. Az (1.2) képletből látható, hogy minél több az érzékelő, annál nagyobb a mérőkör érzékenysége. Több érzékelőt alkalmazva csökkenthető a kapcsolás zavarérzékenysége is, mivel a zavarjelek (pl. hőmérsékletváltozás miatti impedancia-változás vagy külső elektromágneses tér által indukált feszültség) minden érzékelőn jelentkeznek, és az (1.2) képlet zárójelében szereplő tagok pozitív és negatív előjeleit kihasználva *kompenzálhatók*.

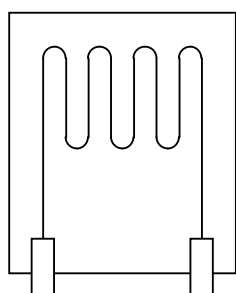
Kiegyenlített hidas mérés esetén magát az U_{23} feszültséget mérjük, kiegyenlített hidas mérésnél pedig valamelyik impedancia változtatásával kiegyenlítjük a hidat, és a kiegyenlítő impedancia értékét regisztráljuk. Ez az eljárás pontosabb, mert ekkor a 2-3 pontok közé bekötött mérőműszeren nem folyik áram. Ez azért fontos, mert az (1.1) képlet csak végtelen nagy impedanciájú mérőműszer esetén igaz, vagy ha $U_{23} = 0$. A kiegyenlített hidas mérés hátrányaként említhető, hogy a kiegyenlítési folyamat időigénye miatt kisebb az elérhető határfrekvencia, így ezt a típust csak nagy pontosságú statikus méréseknél használják. Dinamikus mérés esetén inkább kiegyenlített mérőhidat alkalmaznak, és nagy bemenő ellenállású mérőerősítőt használnak az U_{23} feszültség mérésére, amit az analóg elektronikából ismert műveleti erősítős kapcsolásokkal valósítanak meg.

1.3.2. Nyúlásmérő bélyegek

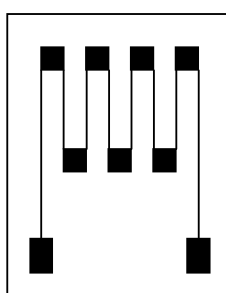
A nyúlásmérő bélyegek szilárdságtani összefüggéseket felhasználva a feszültségállapot meghatározására alkalmasak. Működési elvük a vezető anyagok nyúlás hatására bekövetkező ellenállás-változásán alapul. Segítségükkel a szabad felszín alakváltozási állapotára következtethetünk.

A nyúlásmérő bélyegeket használhatjuk *statikus* és *dinamikus* mérésekre. A dinamikus mérések szigorúbb követelményeket támasztanak a bélyegekkel szemben. A fárasztókísérleteknél használt bélyegek paraméterei a hosszú, $10^5 - 10^6$ számú terhelési ciklusból álló mérés során állandók kell maradjanak (a bélyeg nem fáradhat ki). A mérőhíd táplálására egyen- és váltóáram egyaránt használható, de a gyakorlatban ma már kizárólag kisméretű váltakozófeszültséget használnak, mert így kisebb zavarérzékenység érhető el.

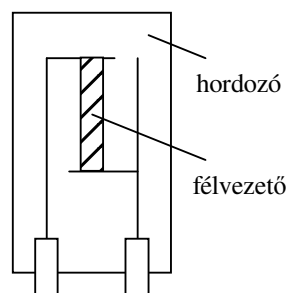
Kialakítás szerint a bélyeg lehet huzalos (1.2. ábra), vagy fóliás (1.3. ábra). A huzal anyaga konstantán, míg a fóliás bélyegekre fotokémiai eljárással viszik fel a vezető réteget. A fóliás bélyegek lehetnek *rozettások*, ami a teljes feszültségállapot meghatározását is lehetővé teszi. Kételemes merőleges elrendezésű bélyeget mutat az 1.5. ábra. Speciális kialakítású ún. membrán bélyeggel nyomásmérés is megvalósítható.



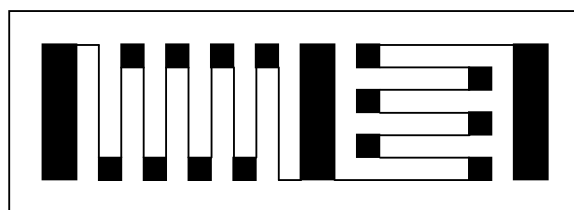
1.2. ábra



1.3. ábra



1.4. ábra



1.5. ábra

A bélyeg hordozója lehet: papír, gyanta, textil vagy kerámia. A hordozó feladata az alakváltozás közvetítése a felszínről a vezető anyagra, valamint az elektromos szigetelés. A bélyegeket ragasztással erősítik fel a felületre. Fontos, hogy a ragasztóréteg a lehető legvékonyabb legyen, mert így adódik át a legpontosabban az alakváltozás.

A bélyegek jellemzője a nyúlási- vagy bélyegtényező. Ennek definíciós képlete:

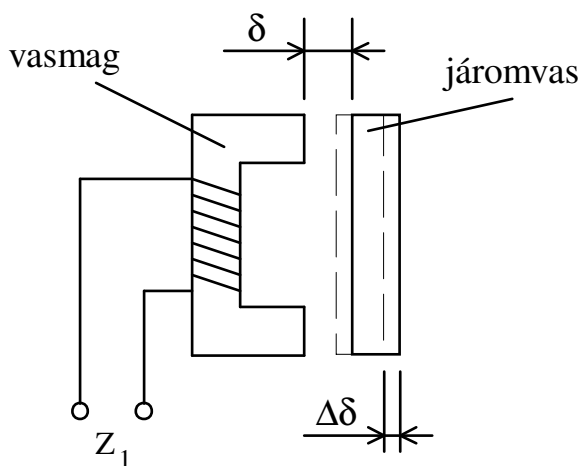
$$k = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{d\ell}{\ell}} = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} \quad (1.3)$$

A huzalos és fóliás bélyegek nyúlási tényezője 2-2,5 közötti, míg az 1.4. ábrán látható félvezető bélyegeké 50-100 között mozog. Látszólag a félvezető bélyegek sokkal előnyösebbek a hagyományosaknál, azonban pontossági és stabilitási szempontból alulmaradnak. Nem szabad ugyanis elfelejteni, hogy a nagy erősítéssel szükségképpen együtt jár a zavaró hatások és az öregedés során megváltozó jellemzők nagyobb befolyása is.

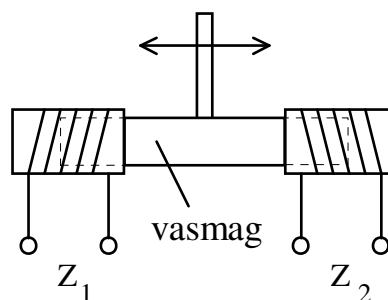
1.3.3. Induktív érzékelők

Az induktív érzékelőket váltakozóáramú mérőkörökben használjuk, és a tekercs induktív ellenállásának változását mérjük. Az induktivitás befolyásolásának egyik módja a légrés méretének megváltoztatása a mágneses körben. Ennek elvét szemlélteti az 1.6. ábra. A tekercs

induktív reaktanciájának változása csak kb. 15% légrészváltozásig tekinthető lineárisnak, ennél nagyobb elmozdulás esetén az összefüggés hiperbolikus. További hátrány, hogy a reaktancia érzékeny a hőmérsékletváltozásra és a tápfeszültség frekvenciájától is függ. Egy másik eljárás a vasmag elmozdítása. Ez esetben lényegesen nagyobb a lineáris tartomány. Az 1.7. ábrán látható merülő vasmagos mérőátalakító ezt az elvet mutatja. A félhíd kapcsolás további előnye, hogy hőmérsékletkompenzált és nagyobb az érzékenysége, mint az előző elrendezésnek.



1.6. ábra



1.7. ábra

Az inductív érzékelők egy különleges fajtája a *magnetoelasztikus* átalakító. Ez közvetlen leképezést valósít meg a mechanikai feszültség és az inductivitás között. Működése azon alapul, hogy a ferromágneses anyagok mágneses permeabilitása mechanikai igénybevétel hatására megváltozik.

1.3.4. Kapacitív érzékelők

A kapacitív érzékelőket is váltakozóáramú mérőkörben használjuk, és a kapacitív ellenállás változását mérjük. A síkkondenzátor kapacitása mint ismeretes:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (1.4)$$

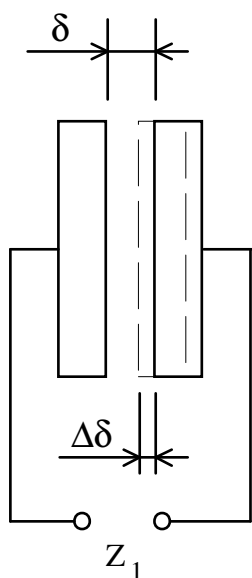
ahol ε a dielektromos állandó, A a fegyverzetek felülete, d pedig azok távolsága. A kapacitás befolyásolásának egyik módja a fegyverzetek távolságának változtatása. Ez az 1.8. ábrán látható. Kis hézagváltozás esetén a kapacitásváltozás közel lineáris:

$$C = \varepsilon \frac{A}{\delta} \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right) \quad (1.5)$$

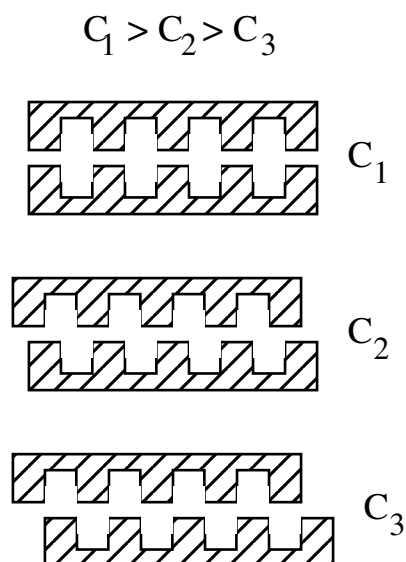
Az ilyen átalakítók kapacitása csak néhány század pF. A másik lehetőség a fegyverzetek felületének változtatása. Ennek módját az 1.9. ábra mutatja. A megvalósított érzékelőkben egymás felett elforduló tárcsákat alkalmaznak.

A kapacitív mérőátalakítók előnye, hogy egészen kicsi (μm) és egészen nagy (néhány cm) elmozdulások is mérhetők ugyanazon átalakítóval. További előny az egyszerű felépítés. A kapacitív érzékelők hátránya, hogy a viszonylag kis kapacitás miatt rendkívül érzékenyek a vezetékek és a mérőkör szórt kapacitásaira. A szükséges mérő- és erősítő áramkör is bonyolultabb, mint az egyéb érzékelőké.

A kapacitív és inductív érzékelőket újabban oszcillátorok rezgőkörébe kapcsolva is használják. A regisztráló műszer ekkor a rezgés frekvenciájának elhangolódását méri.



1.8. ábra



1.9. ábra

1.3.5. Piezoelektromos érzékelők

A piezoelektromos mérőátalakítók kivezetésein mechanikai feszültség hatására elektromos töltés jelenik meg. A felhasznált, hexagonális rendszerben kristályosodó anyag modellje az 1.10. ábrán látható. A három kitüntetett tengely elnevezése:

- x – villamos tengely,
- y – semleges, vagy mechanikai tengely,
- z – optikai tengely.

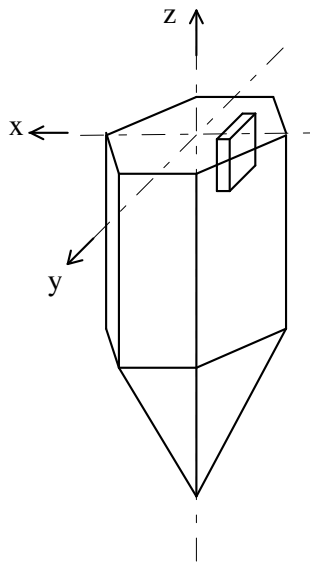
Az 1.10. ábrának megfelelően kivágott, és az 1.11. ábrán látható téglatest x-tengelyre merőleges síkjain jelenik meg az elektromos töltés. A z-tengely mentén az optikai tulajdonságok a meghatározók. Az y-tengely irányában nincsenek a kristálynak kitüntetett tulajdonságai. Az x-irányú terhelést *longitudinálisnak*, az y-irányút pedig *transzverzálisnak* nevezzük. A gyakorlatban a longitudinális terhelés terjedt el, mert ekkor a keletkezett töltés nem függ a kristály méreteitől, csak a rá ható erőtl:

$$Q = DF_x \quad (1.6)$$

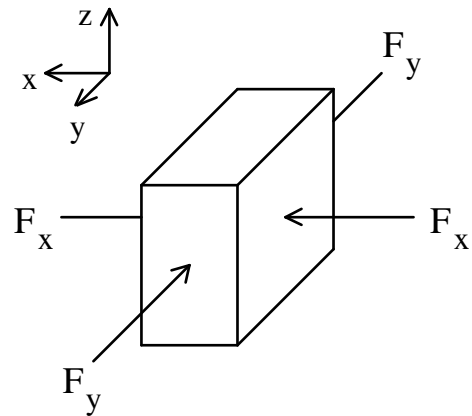
ahol D a piezoelektromos tényező. Az újabb érzékelőkben a kristályt nyíró- vagy hajlító-igénybevételnek teszik ki. A kristály anyaga általában kvarc, de bórium-titanát használata is előfordul.

A piezoelektromos átalakítók használhatók erő, nyomás, vagy szeizmikus tömeggel kiegészítve gyorsulás mérésére is. Piezoelektromos erőmérő egy gyakorlati megoldása látható az 1.12. ábrán. A foglalat a talajon helyezkedik el, a terhelést pedig a nyomólap közvetíti a kristálylapokig.

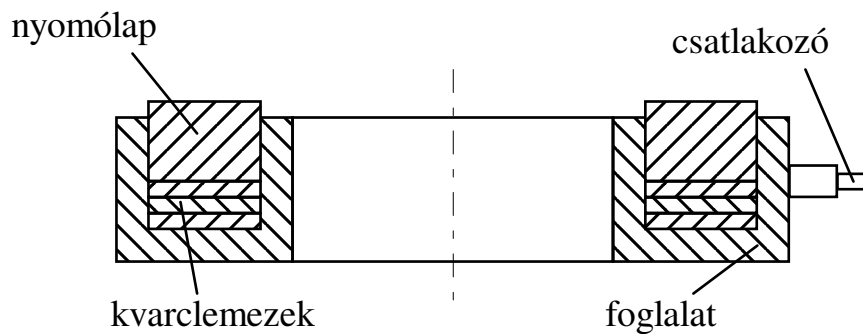
A piezoelektromos mérések sajátos hibaforrása, hogy a keletkezett töltések a parazita-kapacitásokon felhalmozódnak. Ez egyre növekvő *nullponteltolódást* okoz, ami egy idő után telítésbe is vezérelheti az erősítőt. Ennek elkerülésére az erősítő áramkörnek folyamatos visszanzulázást kell biztosítania. A vezetékcapacitás zavaró hatásának kiküszöbölése céljából már csak előerősítővel egybeépített piezoelektromos érzékelőket használnak, így a kábelen már néhány voltos jelszint van, amihez képest a vezetékzaj elhanyagolható.



1.10. ábra



1.11. ábra

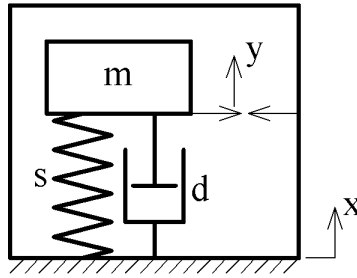


1.12. ábra

1.3.5. Az érzékelők dinamikus tulajdonságai

Az előzőekben láttuk, hogy az induktív és kapacitív érzékelők alapkitelben relatív elmozdulás, a piezoelektromos mérőátalakítók pedig erő mérésére alkalmasak. Ennek megfelelően a gyakorlatban legtöbbször elmozdulást, vagy gyorsulást mérünk, bár a sebesség mérésére is vannak működő megoldások. Mivel a gyorsulás, sebesség és elmozdulás összetartozó jellemzők, a köztük lévő differenciál- és integrál-kapcsolat felhasználásával elvben bármelyik ismeretében a többi már számítható. Nem szabad azonban megfeledkezni az átszámítás során felhalmozódó hibákról.

Az érzékelők mechanikai szempontból legegyszerűbben az 1.13. ábrán látható egy-szabadságfokú, útgerjesztett lengőrendszerként modellezhetők. A rugalmasan felfüggesztett *szeizmikus* tömeg mozgása a típustól függő mértékben csillapított. A mérni kívánt mozgás az érzékelő házára adódik át.



1.13. ábra

A mérendő – de közvetlenül nem mérhető – jelet x -szel, a tömegnek a házhoz képesti *relatív* elmozdulását – a mérhető mennyiséget – pedig y -nal jelölve a rendszer az $m(\ddot{x} + \ddot{y}) = -d\dot{y} - sy$ differenciálegyenlettel írható le, aminek egy rendezettebb alakja:

$$m\ddot{y} + d\dot{y} + sy = -m\ddot{x} \quad (1.7)$$

ahol m a tömeg, s a rugómerevség és d a csillapítási tényező. Bevezetve a szakirodalomban szokásos $\omega_0 = \sqrt{\frac{s}{m}}$ csillapítatlan sajátkörfrekvenciát és a $\xi = \frac{d}{2\sqrt{sm}}$ relatív csillapítást, az egyenlet a következő általánosabb alakot ölti:

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = -\ddot{x} \quad (1.8)$$

Ha a tömeg nagy, és a rugómerevség kicsi, akkor műszerünkkel elmozdulást mérhetünk. A tömeg mérhető relatív elmozdulása és a mérendő abszolút elmozdulás közötti *frekvenciafüggvény*:

$$H(i\omega) = \frac{m\omega^2}{-m\omega^2 + di\omega + s} = \frac{\omega^2}{-\omega^2 + 2\xi\omega_0 i\omega + \omega_0^2} \quad (1.9)$$

ahol i az imaginárius egység. Az abszolút érték alakulását az 1.14.a. ábra mutatja a relatív csillapítás három különböző értéke esetén. Látható, hogy az egyenletes nagyítás érdekében a mért jel által átfogott frekvenciatartománynak a rendszer sajátfrekvenciája fölé kell esnie. Az ehhez szükséges alacsony sajátfrekvenciát a nagy tömeg és a lágy rugó alkalmazása biztosítja. Az így aláhangozt rendszer y kimenő jele az x abszolút elmozdulással arányos.

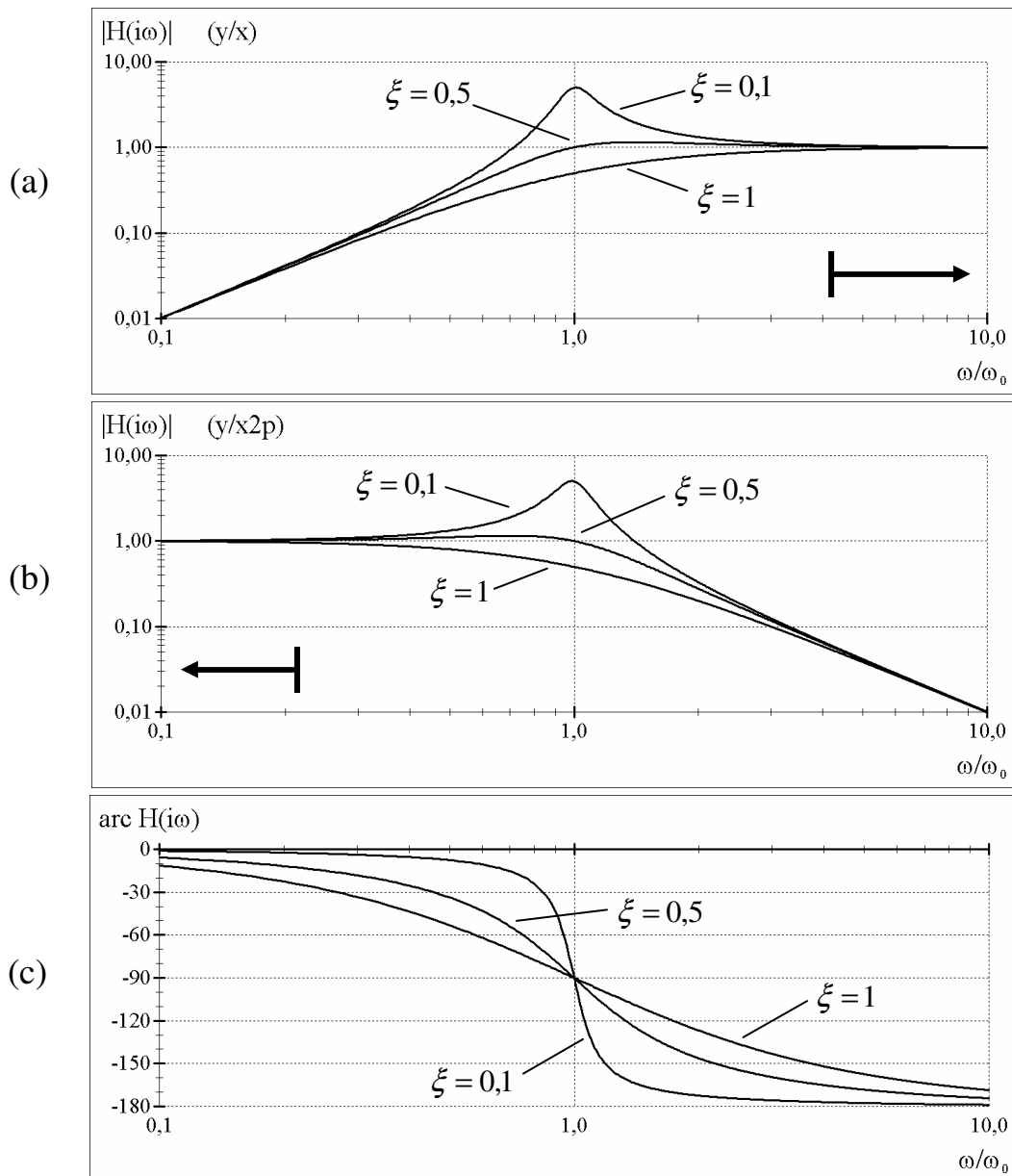
Gyorsulásméréskor a rugó nagyon merev, a tömeg pedig nagyon kicsi. Induktív vagy kapacitív mérőátalakítót felhasználva a tömeg relatív elmozdulását mérjük. Ez elhanyagolható csillapítóerő esetén a tömeg abszolút gyorsulásával arányos. Piezokristályt alkalmazva a tömeg közvetlenül a kristályra erősíthető, amely ekkor rugóként és erőmérőként is funkcionál, a tömegre ható erőből pedig számítható a gyorsulás. A frekvenciafüggvény a tömeg mérhető relatív elmozdulása és a mérendő abszolút gyorsulás között:

$$H(i\omega) = \frac{-m}{-m\omega^2 + di\omega + s} = \frac{-1}{-\omega^2 + 2\xi\omega_0 i\omega + \omega_0^2} \quad (1.10)$$

Az abszolút érték alakulása az 1.14.b ábrán követhető. Most a sajátfrekvencia alatti tartományban állandó a nagyítás. Megfelelően nagy sajátfrekvencia merev rugó és kis tömeg esetén adódik. Az így föléhangolt rendszer y kimenő jele az \ddot{x} abszolút gyorsulással arányos, amiktől a rugóerő csak a rugómerevségnek megfelelő konstans szorzó erejéig különbözik.

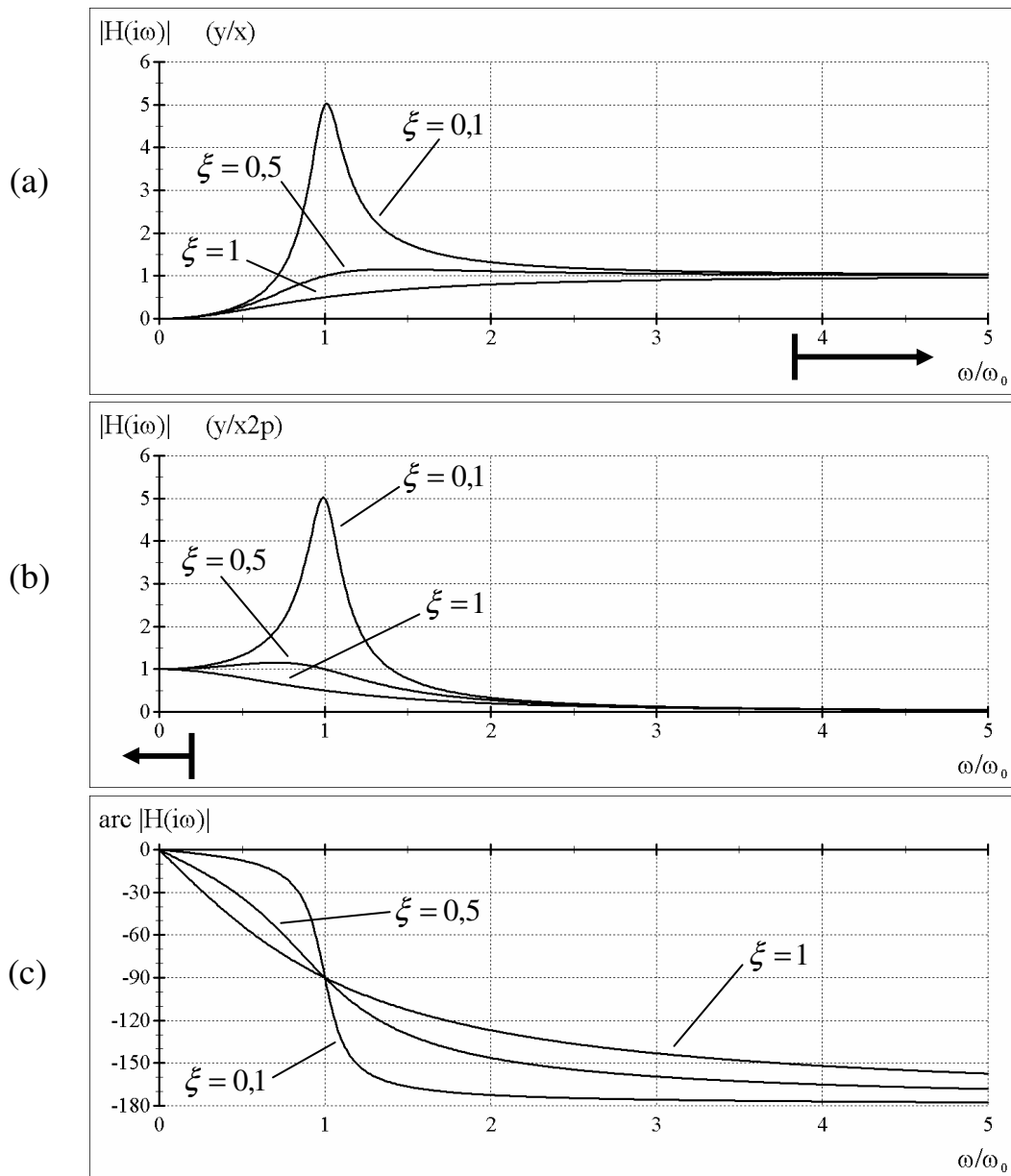
A fázisszög mindkét esetben azonos lefutású, amit az 1.14.c ábra szemléltet. Ha nem csak az amplitúdó mérésére van szükség, hanem a relatív fázisszög vagy az időfüggvény pontos ismeretére is, akkor a frekvenciafüggvény fázisszögének alapján tovább szűkül a

működési tartomány. Az amplitúdó- és fázisszög hibára előírt kritériumok együttes teljesülésének frekvenciasávja a csillapítás értékének változtatásával is befolyásolható.



1.14. ábra

Az 1.14. ábra a Bode-diagrammoknál megszokott logaritmikus skálázás mellett mutatja a függvények alakulását. Az 1.15. ábrán ugyanazok a függvények láthatók lineáris léptékben. Ezek jobban szemléltetik a kihasználható tartományok méretét, és élesebben mutatják a függvények lefutását.



1.15. ábra

1.4. Regisztráló műszerek

A mérőrendszer összeállítása előtt fontos feladat a mérés körülményeinek felmérése. A mérési körülmények szempontjából két csoportot különböztethetünk meg: *laboratóriumi* és *üzemi* méréseket. Nyilvánvaló, hogy egy laboratóriumi műszer sokkal kedvezőbb feltételek között működhet, mint egy üzemi. A valóságos üzemeltetési helyzetekben történő méréseknél a műszerek is ki kell bírnia a vizsgált szerkezetet érő hatásokat úgy, hogy a külső hatások a mérés pontosságát sem befolyásolhatják. Az üzemi műszereket tehát a környezeti változások zavaró hatása ellen kompenzációval kell ellátni.

Ugyan ma már kizárólag digitális regisztráló műszereket használnak, nem hasznoltak a történelmi áttekintést az analóg műszerekkel kezdeni. A digitális számítógépek kifejlesztése előtt ugyanis komoly feladatot jelentett egy-egy mérés műszereinek a megtervezése. A 30-as években karcoló eljárásokkal próbálkoztak. Ezeket főként a belsőégésű motorok indikálásával

foglalkozó mérnökök tökéletesítették. Ez elsősorban miniaturizálást jelentett, mert a motorok fordulatszámának növekedésével a mechanikus szerkezetet egyre mozgékonyabbá kellett tenni. Később fénypontvetítéses műszerekkel filmen rögzítették a regisztrátumokat. A 40-es években a műszerek (például az oszcilloszkópok képernyőjének) fényképezése jelentett megoldást. Az így elkészített regisztrátumok kézi feldolgozása rendkívül hosszadalmas és körülményes munka volt és a pontosság sem volt kielégítő.

Az analóg mérőmagnetofonok megjelenése minőségi ugrást jelentett, de a pontosság még mindig messze elmaradt a követelményektől. Az amplitúdómodulált rögzítést átalakított zenei magnetofonokkal végezték. A hasznos információra szuperponálódó zaj és az egyenetlen szalagsebesség miatt a rögzített regisztrátum nem volt pontos. A frekvenciamodulációra való áttéréssel már csak a szalagtovábbítás bizonytalan sebessége okozott hibát. Az így rögzített regisztrátumok feldolgozására analóg számítógépeket használtak. A regisztrálók erősítőit ún. *rack* elrendezésben gyártották. Egy készülékszekrénybe a mérőcsatornák számának megfelelően több egyedi, vagy néhány csatornás modult építettek be.

Végül szakítottak a folytonos regisztrálással, és egyeduralkodóvá vált a digitális rögzítés. Az ilyen rendszereknél a mintavételezési időköz megfelelő beállításával a vizsgált folyamat információtartalmát korrekten feltáró regisztrálás végezhető. A *Shannon-féle mintavételezési tétel* szerint elegendő, ha a mintavétel frekvenciája kétszerese a folyamatban előforduló legnagyobb frekvenciának. A feltétel teljesülése esetén a diszkrét pontokban adott digitális impulzussorozat a felülről sávhatárolt analóg bemenő jelre nézve minden információt tartalmaz. Ez azt jelenti, hogy D/A-átalakító segítségével a minták alapján az eredeti folytonos jel visszaállítható. A gyakorlatban azonban a sávhatárolás véges meredekségétől függően négyszeres vagy még nagyobb mintavételi frekvencia ad kellő biztonságot. A bemutatott eljárás kifejlődését a digitális hangrögzítés és információtovábbítás (CD, hangkártya, digitális műsorszórás, internet) gyorsította fel.

A digitális jel rögzítéséhez szükséges tárolókapacitást a rögzítendő regisztrátum hossza és a mintavétel gyakorisága határozza meg. Adathordozóként ütésálló merevlemezis háttértárolókat is alkalmazhatunk, de a legjobb megoldás a szilárdtest memória. Az egyes mérési sorozatok végén ennek tartalma áttöltethető egy merevlemezis tárolóra.

A rack rendszert a számítógéppel összeköthető illesztőegységek váltották fel. Ezek általában 4-16 analóg bemenettel rendelkeznek, kimenetük pedig közvetlenül csatlakoztatható a számítógép valamelyik portjához, vagy a berendezésekhez tartozó csatolókártya bemenetéhez. A szoftverek sokszor azonnali (real-time) adatfeldolgozásra is alkalmasak.

Üzem közbeni mérések esetén a mérőcsatornákon kívül hasznos néhány speciális csatorna alkalmazása is, ami lehet nyomógomb vagy hangrögzítő sáv is. Ezek segítségével megkönnyíthető a későbbi jegyzőkönyvezés, és jelezhetők az esetleges váratlan események is.

Automatikus digitális eszközök és mikroszámítógépek összekapcsolására fejlesztették ki az *IEEE-488 szabványú általános rendeltetésű berendezéssínt* (LPT párhuzamos port). A jelek TTL szintűek, az adatátvitel és a kapcsolatteremtés ún. *kézfogásos (handshake) protokoll* szerint történik, amely biztosítja az információs csatorna állandó ellenőrzését. Az átviteli vonal kezdetben aszimmetrikus működésű volt, jobban támogatta a mikroszámítógéptől a periféria felé irányuló adatforgalmat. Később az adatvonalak kétirányúak lettek (ECP, EPP üzemmódok). A nagy sebességű adatátvitel modernebb eszköze az USB port, amelynek előnye a kevesebb (4 db) csatlakozó. Ezek közül kettő tápvezeték, kettő pedig sodort érpárt alkot, amelyen az adatátvitel soros formában történik. A sodort vezetékpárnak köszönhetően tetszőleges vezetékhozz mellett elhanyagolható zavarérzékenység és a hagyományos soros porthoz (RS-232) képest jelentősen gyorsabb adatátvitel valósítható meg.

Digitális számítógépek segítségével a regisztrátumok feldolgozása gyorsan és kényelmesen elvégezhető. Vigyázni kell azonban a véges számábrázolás miatt bekövetkező

kerekítési hibákra. Az ebből adódó pontatlanság több egymás utáni művelet elvégzése (pl. numerikus integrálás) esetén jelentős lehet.

A primer regisztrátumok adatformátuma műszerfüggő, legtöbbször binárisan kódolt, de lehet akár tömörített is. A feldolgozás előtt konverziót kell végrehajtani a programjaink által kezelt formára. Saját használatra az adatok szöveges ASCII formátumban is elmenthetők.

Irodalomjegyzék

1. Dr. Gedeon József: Bevezetés a sztochasztikus járműdinamikába
(BME Közlekedésmérnöki kar, Járműváz és könnyűszerkezetek tanszék, Budapest, 1997)
2. Dr. Gedeon József: Jármű vázszerkezetek kifáradási élettartam vizsgálata
(Műszaki doktori értekezés, BME Közlekedésmérnöki kar, Budapest, 1984)
3. Dr. Gedeon József: Mechanika IV/1. Lengéstan
(BME Közlekedésmérnöki Kar, Műegyetemi kiadó, 1995)
4. Dr. Ilosvai Lajos: Műszeres gépjárművizsgálat I.
(BME Közlekedésmérnöki Kar, Gépjárművek tanszék, Budapest, 1995)