

A folyamatműszerezés érzékelői

Energiaátalakulások szilárd testekben – 6.

Dr. Fock Károly

A mechanikai érzékelők családját ismertető cikksorozat következő részében az eddigiektől alapvetően eltérő működésű érzékelőkről lesz szó. Működésük lényege, hogy felépítésüket tekintve mindegyikük mechanikai rezgőrendszer. Az ismertetést a rezgésmérőkkel kezdjük, amelyekben a rezgőrendszer a mérendő rezgés hatására kényszerrezgésben van, és a rezgő tömeg kitérése lesz arányos a mérendő mennyiséggel.

Rezgőrendszerű érzékelők

A soron következő érzékelőkre az jellemző, hogy felépítésüket tekintve mindegyikük mechanikai rezgőrendszer. A különféle típusok közötti lényeges különbség a működésében van. Egyik csoportjuk lengőrendszere – az általában periodikus – mechanikai gerjesztés hatására kényszerrezgésben van; ezeket közismert néven rezgésmérőknek hívjuk. A másik csoportban a mérendő fizikai mennyiség (erő, torziós nyomaték, nyomás, sűrűség, viszkozitás, gázösszetétel stb.) az érzékelő rezonanciafrekvenciájának megváltozását okozza. Első típusai a rezgőhúros erőmérők, ill. a rezgővillás szintmérők voltak, de mint látni fogjuk, a mikroelektromechanikai technológia egy sor, a fentiekől lényegesen eltérő kialakítású érzékelőt is létrehozott. Összefoglaló néven ezeket az érzékelőket mechanikai rezonátoroknak nevezik. Eltérés van a kimenőjelekben is. Amíg a rezgésmérőknél általában a rezgő tömeg elmozdulásának a mérését kell megoldani, addig a mechanikai rezonátorok kimenőjele frekvencia.

A felsorolt típusok egyikéhez sem sorolhatók az utóbbi években egyre gyakrabban előforduló, a szilárd halmazállapotú, rugalmas anyagok felületi hullámterjedésén alapuló érzékelők. A működés elvi alapját a hullámok terjedési sebességének a mérendő mennyiségtől való függése jelenti, ami lehet pl. az erő hatására keletkező feszültség vagy a lecsapódó pára, esetleg a gázkeverék adszorbeálódott egyik komponense. A kimenőjel a hullámterjedési idő. Az érzékelő rugalmas szerkezeti eleme nyugalomban van.

Bár a felsorolt érzékelők mindegyikére a (mech, mech, 0) csoportosítási Miller-index jellemző – vagyis a mechanikai bemenőjel hatására létrejövő kimenőjel is mechanikai –, tartós üzemben villamos segédenergiával működő, kiegészítő elemek nélkül egyikük sem működőképes. Ezeknek a kiegészítő elemeknek a típusa, kialakítása azonban erősen függ az érzékelő működésmódjától és kialakításától, ezért ebben a fejezetben ezeket nem részletezzük.

Rezgésmérők

A mechanikai rezgések mérésének két módja ismeretes. Az egyik mérési módszer szerint a rezgő testet egy rezgésmentes pontból figyeljük és úgy állapítjuk meg annak jellemzőit. Ezt nevezik relatív rezgésmérési módszernek. A mérés általában érintésmentes, de sokszor kivitelezhetetlen a nyugvó vonatkoztatási pont hiánya miatt.

A rezgésmérés másik módszerének – az abszolút rezgésmérésnek – az a lényege, hogy a rezgést végző testtel merev kapcsolatba hozzák a rezgésmérőt, amelyik egy belső mechanikai lengőrendszert tartalmaz. A belső mechanikai lengőrendszer

ezáltal kényszerrezgésbe jön, és a rezgési állapot valamely jellemzőjét egy alkalmasan megválasztott mérőátalakítóval villamos kimenőjellel alakítják át, amely a továbbiakban a villamos jelfeldolgozáshoz bemenőjelként szolgál. A továbbiakban ezzel a mérési módszerrel foglalkozunk.

A mérendő rezgés jellemzői (amplitúdó, sebesség, gyorsulás, frekvenciaspektrum) és a rezgésmérő kimenőjele közötti kapcsolatot a rezgésmérő belső mechanikai rendszerének és a villamos kimenőjelű mérőátalakítónak az együttes jelátviteli tulajdonságai határozzák meg. A funkcionálisan két különböző rendszer általában nem hat egymásra, ezért azok jelátvitelét egymástól függetlenül tárgyalhatók.

A tárgyalás egyszerűsítése érdekében a vizsgálatot koszinuszos hullámformájú mérendő jelre végezzük el, amely nem vezet az általánosság rovására, hiszen a Fourier-sorfejtés alapján tetszőleges periodikus jel előállítható szinuszos és koszinuszos jelek összegeként, az aperiodikus jelek esetén pedig annak Fourier-spektruma hasonlítható össze a rezgésmérő frekvenciaátviteli tulajdonságaival.

A rezgésmérő modellje

A bevezetőben tett megszorítások alapján az abszolút rezgésmérő általános modellje az 1. ábrán látható: az M tömegből, a K rugómerevségű rugóból és a D sebességarányos csillapítóból álló egy szabadságfokú, koncentrált paraméterű mechanikai lengőrendszer, amelyet a mérendő y jel gerjeszt, és ennek hatására az M tömeg a házhoz képest x elmozdulást végez. A tömeg teljes elmozdulása $x+y$. A lengőrendszer mozgásegyenletét másodrendű lineáris differenciálegyenlet írja le

$$\frac{dx}{dt} \rightarrow \dot{x} \quad , \quad \frac{dx^2}{dt^2} \rightarrow \ddot{x} \quad , \quad \text{ill.} \quad \frac{dy^2}{dt^2} \rightarrow \ddot{y}$$

jelöléseket alkalmazva az idő szerinti differenciálásra):

$$M(\ddot{y} + \ddot{x}) + D\dot{x} + \frac{1}{K}x = 0 \quad ,$$

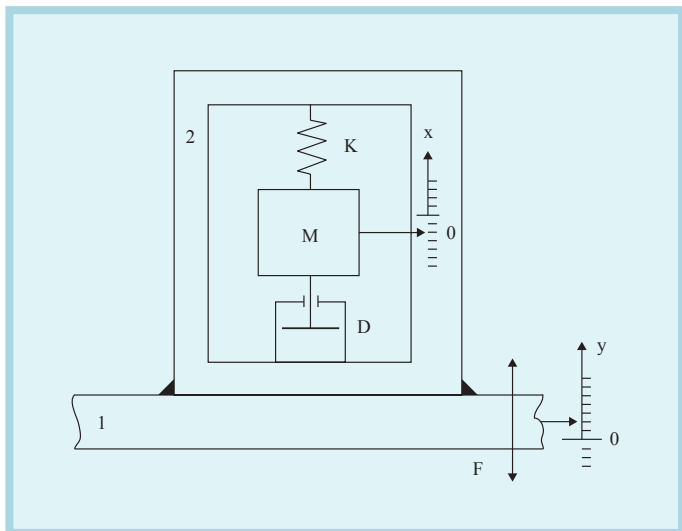
amely a lengőrendszer elemeire ható erők egyensúlyát fejezi ki. Az

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{MK}} \quad \text{és} \quad \zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

szokásos jelölésekkel (ahol ω_0 a csillapítás nélküli lengőrendszer rezonancia körfrekvenciája, ζ a csillapítási tényező) a mozgásegyenlet az

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{y}$$

alakban írható fel. Mindössze annak a feltételezésével, hogy a mérendő rezgés periodikus függvény, és ismerjük annak a legmagasabb frekvenciájú összetevőjét, a mozgásegyenlet elemzéséből kritériumokat kaphatunk a rezgésmérők típusaira.



1. ábra Rezgésmérő modellje (1. rezgő test (csővezeték, tartály, gépalap), 2. rezgésmérő háza)

Útérzékegy kialakítás

A mérendő frekvenciához képest kis ω_0 és kis csillapítás esetén [nagy tömeg, lágy rugó (M és K nagy), a ζ csillapítási tényező kicsi] a differenciálegyenlet közelítőleg

$$\ddot{x} \cong -\ddot{y}$$

ami egyszeres, ill. kétszeres integrálás után

$$\dot{x} \cong -\dot{y} \quad \text{és} \quad x \cong -y$$

alakú lesz. Egy mechanikai lengő rendszert az utolsó egyenlet alapján útérzékegynek nevezünk, ha a ténylegesen mért kitérés és a relatív elmozdulás abszolút értékben közel azonos.

Sebességérzékegy kialakítás

Kis ω_0 és nagyon nagy csillapítás esetén [nagy tömeg, lágy rugó (M és K nagy) és nagy ζ csillapítási tényező] a differenciálegyenlet közelítőleg

$$2\zeta\omega_0\dot{x} \cong -\dot{y}$$

ill. integrálás után

$$x \cong -\frac{1}{2\zeta\omega_0}\dot{y}$$

alakra hozható. Ezt a mérőrendszert sebességérzékegynek nevezünk. A belső lengőrendszer tömegének relatív kitérése a mérendő rezgés sebességétől függ.

Gyorsulásérzékegy kialakítás

A mérendő frekvenciához képest nagy ω_0 és kis csillapítás esetén [kis tömeg, merev rugó (M és K kicsi) és kis ζ csillapítási tényező] a differenciálegyenlet közelítőleg az

$$x \cong -\frac{\ddot{y}}{\omega_0^2}$$

alakra egyszerűsödik, ami a gyorsulásérzékegy kialakításnak felel meg. A belső lengőrendszer tömegének kitérése a mérendő rezgés gyorsulásával arányos.

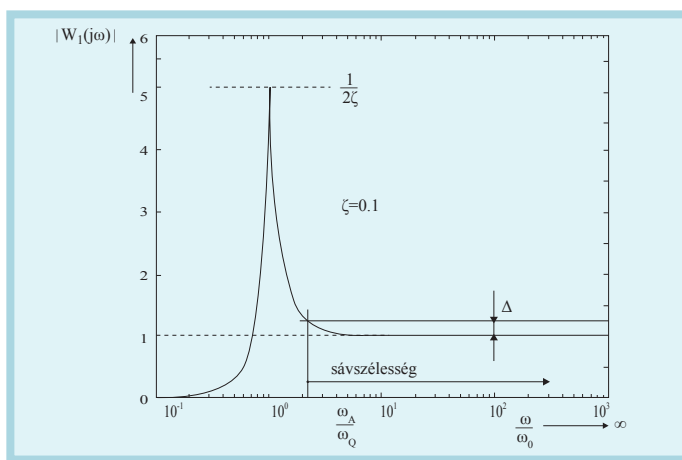
A rezgésmérők frekvenciaátviteli tulajdonságai

A rezgésmérők út-, sebesség-, ill. gyorsulásérzékegy típusokra történő fenti felosztása szemléletes, de nem ad választ a közelítés hibájára. Ennek nagyságát a differenciálegyenletből kiszámítható amplitúdókarakterisztikák alapján egyszerűen meghatározhatjuk.

Útérzékegy kialakítás esetén a

$$|W_1(j\omega)| = \left| \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} \right| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}}$$

amplitúdókarakterisztikának a 2. ábrán látható alakjából megállapítható, hogy $\omega/\omega_0 \gg 1$ teljesülése esetén valóban fennáll a gerjesztés és a mért amplitúdók abszolút értékek egyenlősége.



2. ábra Útérzékegy mechanikai lengőrendszer amplitúdókarakterisztikája

A mérés során megengedett Δ hiba és az ω_A alsó frekvenciahatár szoros kapcsolatban vannak egymással. Δ növelésével ω_A a kisebb frekvenciák irányába tolódik el, és fordítva; a Δ csökkentése a frekvenciatartományt szűkíti.

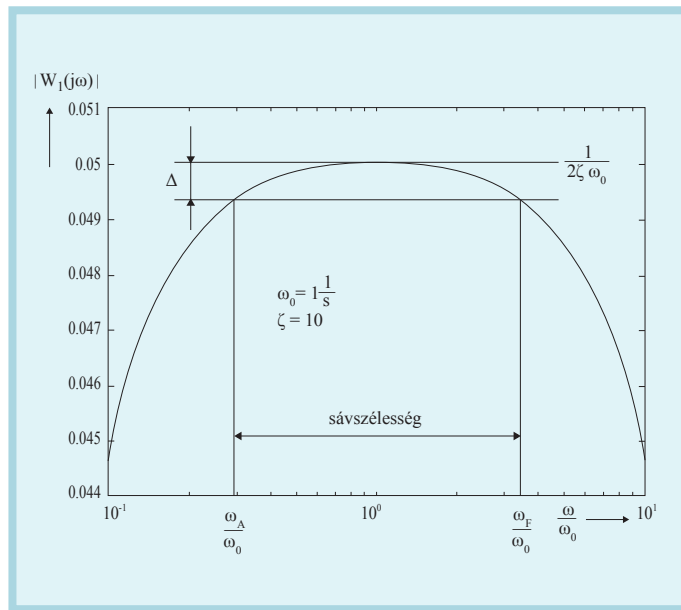
Sebességérzékegy mechanikai lengőrendszer

$$|W_2(j\omega)| = \left| \frac{X(j\omega)}{\dot{Y}(j\omega)} \right| = \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{\frac{\omega}{\omega_0}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}}$$

amplitúdókarakterisztikája a 3. ábrán látható. Az

$$\frac{\omega}{\omega_0} \cong 1$$

érték környezetében a görbe annál laposabb, minél nagyobb a csillapítás. Ez természetesen amplitúdócsökkenéssel jár, ennek ellensúlyozására célszerű kis ω_0 értéket választani. A sávszélességet a megengedett Δ hiba értéke is befolyásolhatja. Látható, hogy sebességérzékeny kialakításnál az ω_0 rezonanciafrekvencia környezetében lehet csak mérni, ami mérés technikai szempontból nem a legkedvezőbb.



3. ábra Sebességérzékeny mechanikai lengőrendszer amplitúdókarakterisztikája

Gyorsulásérzékeny esetben az amplitúdókarakterisztikára a

$$|W_3(j\omega)| = \left| \frac{X(j\omega)}{\ddot{Y}(j\omega)} \right| = \frac{1}{\omega_0^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

kifejezés adódik, aminek diagramja a 4. ábrán látható. A sávszélesség növelése érdekében célszerű az ω_0 rezonanciafrekvenciát minél magasabbra választani, növelésének azonban technikai korlátai vannak. Természetesen a Δ hibakorlát itt is hatással van a sávszélességre.

Érdemes megjegyezni, hogy a sávszélesség alsó határa 0 rad/s. Ez azt jelenti, hogy a gyorsulásérzékeny érzékelők mechanikai lengőrendszerei a statikus gyorsulás mérésére is alkalmasak. Mint későbbiekben látni fogjuk, nem minden villamos kimenőjelű érzékelő alkalmas azonban statikus vagy nagyon alacsony frekvenciájú mechanikai jelek átalakítására.

Rezgésmérők alkalmazástechnikája

Az eddigi elemzések során hallgatólagosan feltételeztük, hogy a rezgésmérő a mérni kívánt rezgő testtel ideálisan, mereven van összekötve, valamint a rezgésmérőnek nincs visszahatása a mérendő objektumra.

A gyakorlatban azonban ez a feltétel nem mindig teljesül. Annak érdekében, hogy a rezgésmérő és a mérendő test közötti összekötésnek a hatását vizsgálni tudjuk, a rezgésmérő modelljét az 5. ábrán látható modellé kell kiegészíteni. Az M_B - K_B elemekből álló rendszer modellezi a rezgésmérő és a mérendő objektum közötti kapcsolatot. Az egyszerűség kedvéért a modell kialakításánál a csillapításoktól eltekintettünk. A vizsgálatot a gyorsulásmérőkre végezzük el. Tétélezzük fel, hogy a mérendő

objektum szinuszfüggvény szerint rezeg, vagyis

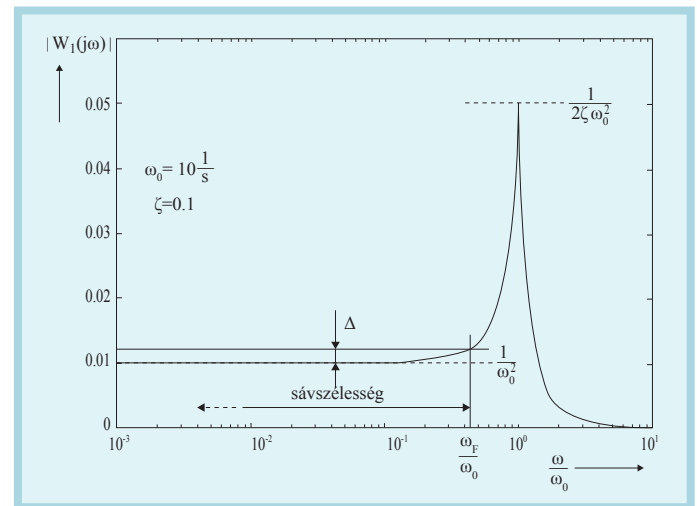
$$y = Y \sin(\omega t)$$

Az M és M_B jelű tömegekre vonatkozó mozgásegyenletek:

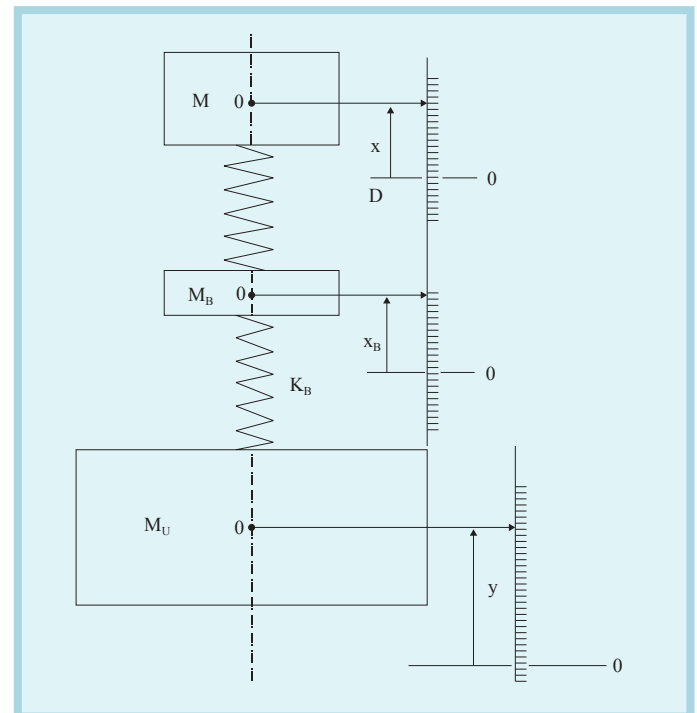
$$M \ddot{x} + \frac{1}{K}(x - x_B) = 0 \quad \text{és}$$

$$M_B \ddot{x}_B + \frac{1}{K}(x_B - x) + \frac{1}{K_B}(x_B - y) = 0$$

Rezonancia esetén az M jelű szeizmikus tömeg $(x-x_B)$ kitérése maximális. Ha a rezgés frekvenciájával az ω_r rezonanciafrekvencia irányába alulról közelítünk, akkor mind a három tömeg



4. ábra Gyorsulásérzékeny mechanikai lengőrendszer amplitúdókarakterisztikája



5. ábra Rezgésmérő rendszer kiegészített modellje azonos fázisban rezeg, tehát

$$x = X \sin(\omega_r t) \quad \text{és} \quad x_B = X_B \sin(\omega_r t)$$

Visszahelyettesítés után:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{K} - M\omega_r^2 \right) X - \frac{1}{K} X_B &= 0 \\ -\frac{1}{K} X + \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{K_B} - M_B\omega_r^2 \right) X_B &= \frac{1}{K_B} Y \end{aligned} \right\}$$

Rezonancia esetén az X - X_B amplitúdókülönbségnek, valamint az X és X_B amplitúdóknak önmagukban is maximális értéket kell elérniük. Ez abban az esetben igaz, ha az egyenletrendszer bal oldalán az X és X_B együtthatóiból képzett determináns értéke 0, azaz

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{K} - M\omega_r^2 & -\frac{1}{K} \\ -\frac{1}{K} & \frac{1}{K} + \frac{1}{K_B} - M_B\omega_r^2 \end{vmatrix} = 0$$

(Ez a determináns áll ugyanis az X és X_B megoldások nevezőiben.) Ez a feltétel az ω_r rezonanciafrekvenciára az alábbi negyedfokú algebrai egyenletet adja:

$$\omega_r^4 - \left[\frac{1}{K} \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{M_B} \right) + \frac{1}{K_B M_B} \right] \omega_r^2 + \frac{1}{K K_B M M_B} = 0$$

Vezessük be az alábbi dimenzió nélküli paramétereket:

$$a = \frac{M_B}{M}, \quad r = \frac{K}{K_B}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{KM}}$$

A behelyettesítés után az egyenlet ezek felhasználásával

$$\left(\frac{\omega_r^2}{\omega_0^2} \right)^2 - \left[1 + \frac{1}{a}(1+r) \right] \frac{\omega_r^2}{\omega_0^2} + \frac{r}{a} = 0$$

alakba írható. A negyedfokú egyenlet megoldásai közül számunkra csak a legalacsonyabb frekvencia érdekes. Ennek kifejezése:

$$\frac{\omega_r^2}{\omega_0^2} = \frac{\left[1 + \frac{1}{a}(1+r) \right] - \sqrt{\left[1 + \frac{1}{a}(1+r) \right]^2 - \frac{4r}{a}}}{2}$$

Ebben a megoldásban természetesen a korábban tárgyalt ideális eset is benne foglaltatik. Ha ugyanis a rezgésmérőt mereven erősítették a mérendő, végtelenül nagy tömegűnek elképzelt objektumhoz, akkor r és a végtelenné válik

$$(r \rightarrow \infty \wedge a \rightarrow \infty),$$

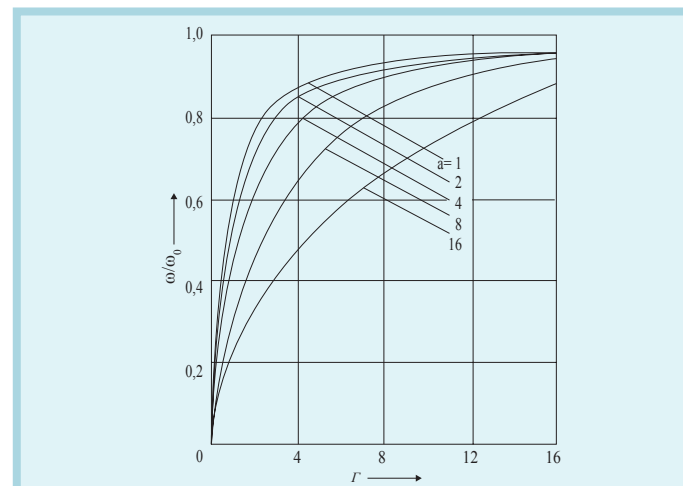
és ezzel megkapjuk az

$$\omega_r = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{MK}}$$

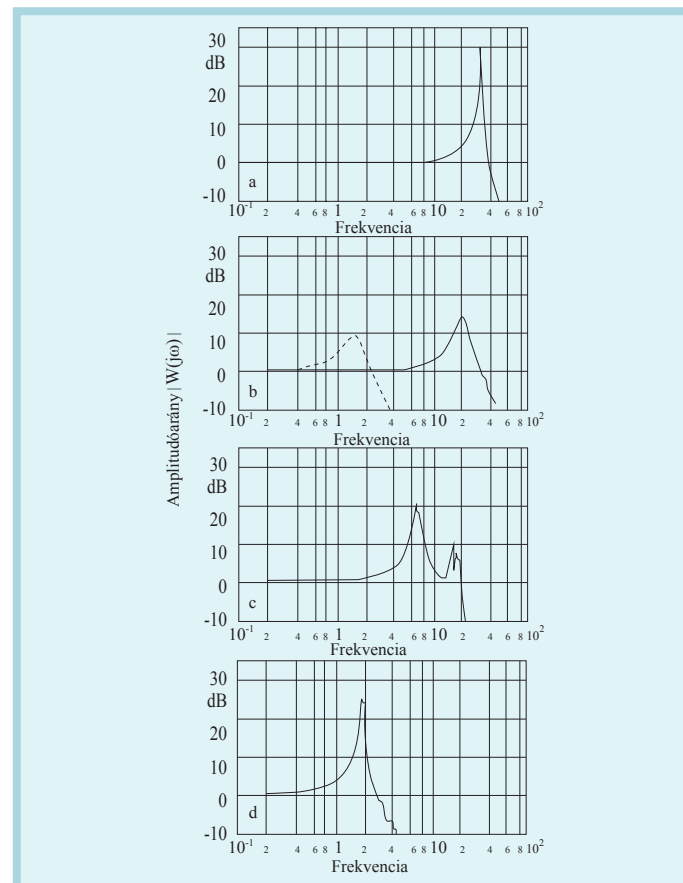
jól ismert határértéket, amelyben a csillapítatlan rendszer rezonanciafrekvenciáját meghatározó elem a rezgésmérő M tömege és a K rugómerevsége.

A rezgésmérő és a mérendő – rezgést végző – test közötti, ideálistól elért kapcsolat csökkenti a rezonanciafrekvenciát. Ez a hatás jól megfigyelhető a 6. ábrán, amelyen az rezonanciafrekvencia-arány olvasható le az $r=K/K_B$ rugómerevség- és a különböző $a=M_B/M$ tömegarány függvényében. Az elméleti vizsgálatokat jól támasztja alá a 7. ábrásor, amelyen ugyanazon gyorsulásmérő amplitúdókarakterisztikáit láthatjuk különböző, a mérési gyakorlatban sokszor alkalmazott csatlakoztatási módok esetén.

Az ideálisnak tekinthető **a**-jelű megoldáshoz képest a többi (**b**, **c** és **d** jelű) csatlakoztatás csökkenti a rezonanciafrekvenciát, és ezzel a sávzélességet is, ami a hiba növekedéséhez vezethet.



6. ábra A gyorsulásmérő és a mérendő objektum ideálistól eltérő kapcsolatának hatása a rezonanciafrekvenciára



7. ábra A különböző csatlakozási megoldások hatása egy és ugyanazon gyorsulásmérő amplitúdókarakterisztikájára (Brüel & Kjaer cég mérései alapján)

- A rezgésmérő acélsavarral van felerősítve, a csatlakozó felületek pedig szilikonzírral, méhviasszal vagy cynanoacryllal vannak bekenve
- Vékony (vagy szaggatott görbe esetén vastag) kétoldalas ragasztószalaggal történő rögzítés
- A rezgésmérőre egy állandó mágnessel csavaroztak és a mérendő objektumra ezzel a mágnessel rögzítették
- A rezgésmérőbe egy tapintócsúcsot csavaroztak, és kézi erővel nyomták a mérendő objektumhoz

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu