

A MISKOLCI EGYETEM A/2 ÉPÜLETE LDV MÓDSZERREL MÉRT REZGÉSEINEK IDŐBELI VÁLTOZÁSAI

Béres Miklós 

mérnök tanár, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizika Tanszék
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: miklos.beres@uni-miskolc.hu

Jenyó Tamás 

villamosmérnök, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizika Tanszék
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: tamas.jenyo@uni-miskolc.hu

Paripás Béla 

PhD egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizika Tanszék
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: bel.paripas@uni-miskolc.hu

Absztrakt

LDV (Laser Doppler Vibrometer) interferométerrel mértük a Miskolci Egyetem A/2 épületének kereszt-irányú igen gyenge (kisebb mint 1 μm amplitúdójú) rezgéseit. A méréseket a lézertudatóriumunk belső falán végeztük mobil rezgésmentes asztalra helyezett berendezéssel. Az időbeli mérések az épület más pontjain más időpontokban végzett mérésekkel történő összehasonlíthatóság végett szükségesek. Azt találtuk, hogy a rezgések az épületbeli emberi tevékenységgel szoros kapcsolatban vannak, hétköznap erősebbek, mint hétvégén, munkaidőben erősebbek, mint azon kívül. Az órák frekvenciaspektrumok munkanapokon 9–16 óra között viszonylag stabilak, különösen az 5 Hz alatti tartományban.

Kulcsszavak: Lézer Doppler-rezgésmérés, épületrezgések, Fourier-analízis

Abstract

The very weak transversal vibrations (less than 1 μm amplitude) of A/2 building of University of Miskolc were measured by an LDV (Laser Doppler Vibrometer) interferometer. The measurements were made on an indoor wall of our laser laboratory, and the device was on an anti-vibration table. The temporal measurements are necessary to compare the measurements made at different points of the building at different dates. We found that the vibrations are in close connection with the human activity inside the building, they are more potent at workdays than at the weekend and stronger at working hours than beyond. The one-hour frequency spectra are relatively stable between 9–16 hours on workdays, mainly below 5 Hz.

Keywords: a Laser Doppler vibrometry, building vibrations, Fourier analysis

1. Bevezetés

Lézerinterferometrius módszerekkel (LIMA: Laser Interferometric Motion Analiser és LDV: Laser Doppler Vibrometer) végzett épületrezgés-méréseinkről már beszámoltunk (Béres et al., 2021). Ezekben a mérésekben a lézerfényt visszaverő falfelület relatív mozgását mértük a rezgésmentes asztalokra helyezett (ezért mozdulatlanak tekintett) lézerforráshoz képest. A fenti méréseink mindegyikét a Fizikai Tanszék lézerlaboratóriumában (A/2 épület, 3. emelet, 10. ajtó) végeztük. Mindkét módszert alkalmazásnak találtuk a falak kisfrekvenciájú (<10 Hz) rezgéseinek mérésére, de az ennél nagyobb frekvenciák mérésére az LDV módszer alkalmasabb. A LIMA-mérések másik nagy hátránya, hogy ez a berendezés csak a lézerlaboratórium nagy rezgésmentes asztalán (Nexus Breadboard (900 × 1800 × 110 mm) asztallap saját gyártmányú asztalkeretén, légrúgókon) képes működni, tehát a laboratóriumon kívül nem. A kompakt LDV-eszköz azonban egy kisebb, saját gyártmányú, mobil rezgésmentes asztalon is működőképes maradt (Béres et al., 2022). Ezen indokok miatt a későbbiekben erre a célra az LDV-módszert preferáltuk.

A mérések során az is beigazolódott, hogy az asztalok (a nagy és a mobil is) a rezonanciafrekvenciájuk környezetében egyáltalán nem rezgésmentesek, sőt egy kb. 2,5 Hz szélességű tartományban még erősítik is a környezetük rezgéseit. Ez az erősítés a nagy rezgésmentes asztal esetében a 5-6 Hz-es tartományban volt a legjelentősebb, a mobil asztal esetében ennél kb. 1-1,5 Hz-cel följebb. Ennek következtében a frekvenciaspektrumokat – egy széles csúcs formájában – ezek a tartományok dominálták. A tiszta falrezgések származtatásához ebben a tartományban csökkenteni kell a mért amplitúdókat a rezonanciagörbe menetének megfelelően. Amikor ezt megtettük, akkor a széles csúcs helyén is láthatóvá váltak az épületrezgésre jellemző vékonyabb csúcsok. Ezek közül (Béres et al., 2022)-ben az 5,7 Hz és 6,3 Hz-en látható csúcspárt emeltük ki, de 6,8 Hz és 7,3 Hz környékén is láthatók csúcsok. A 2,8 Hz-en lévő csúcst nem érinti a transzformáció, mert távol van az asztalok rezonanciatartományától. Ugyanez mondható el a 4,1-4,34 Hz környéki összetett csúcsról is.

Fontos hangsúlyozni, hogy a mért (LDV) rezgések sebességamplitúdója 1 $\mu\text{m/s}$ körüli, vagy ez alatti, amely nagyságrendekkel kisebb az ember által érezhetőnél, vagy az épületet esetleg károsító rezgésektől. Irodalmi adatok alapján (Castellini et al., 2013) úgy gondoljuk, hogy a kisebb frekvenciák (<6 Hz) inkább az egész épületet jellemzik, míg az ennél nagyobb frekvenciák inkább egyes elemek (falak, gerendák) rezgései lehetnek. A kisfrekvenciájú rezgéseknek a gerjesztő forrásai távoliak, környezeti eredetűek. Méréseink szerint (Béres et al., 2021) tanszéki aktivitással (néhány ember ugrálása a lépcsőkön, változó sebességű mozgása a folyosón) inkább a nagyobb frekvenciájú rezgéseket lehet gerjeszteni.

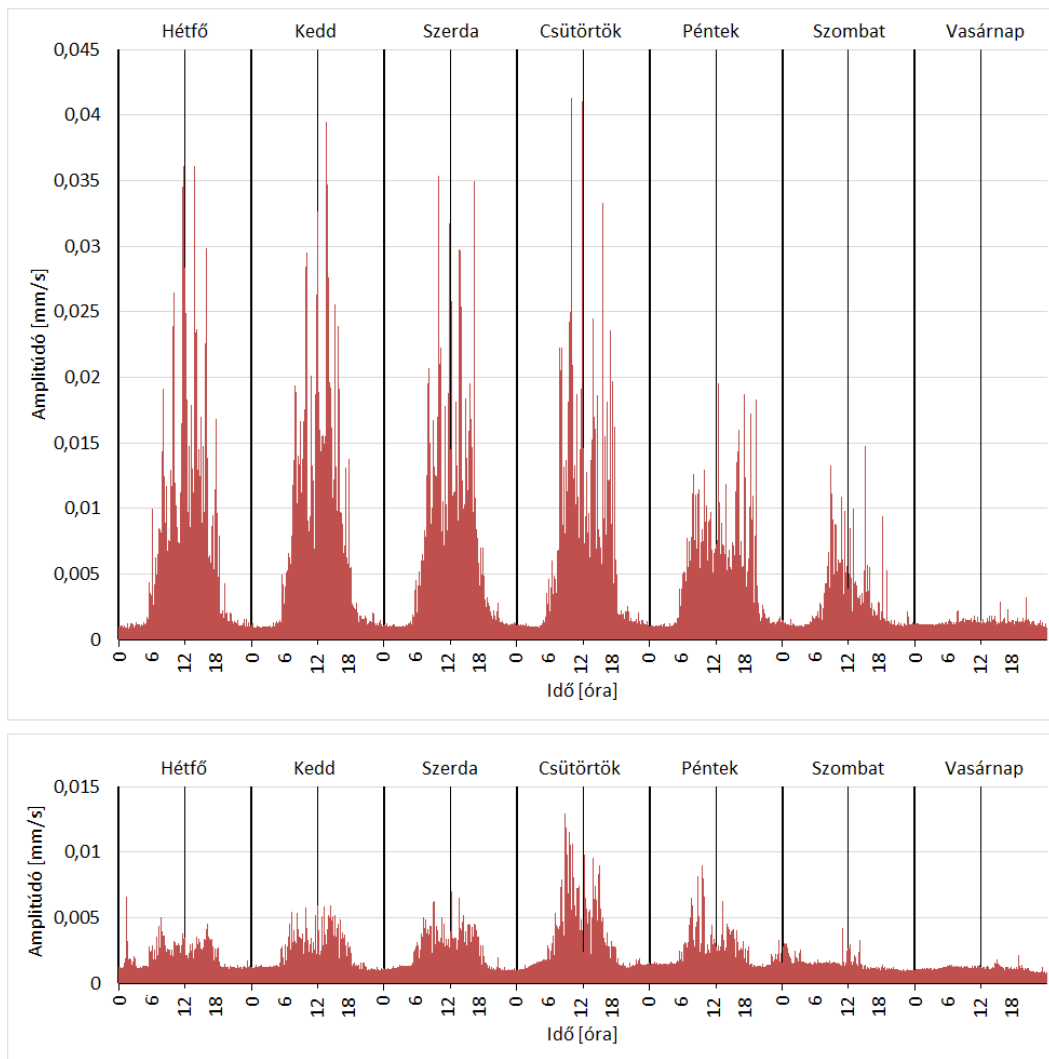
Ahogy utaltunk is rá, a fenti méréseink mindegyikét a Fizikai Tanszék lézerlaboratóriumában végeztük, többnyire az épület tengelyével párhuzamos folyosó oldali fal merőleges rezgéseit mértük 0,5-1,0 m magasságban. Ennek az egy falnak a rezgései azonban nem feltétlenül jellemzik az egész épület rezgéseit. Ehhez ki kell lépni a laboratóriumból és a mobil asztalon elhelyezett LDV-készülékkel végig kell mérni az épületet.

A rezgési módusok tanulmányozásához természetesen nem kívánjuk mesterségesen rezgetni az épületet, ez valószínűleg lehetetlen is lenne. Ebben a cikkben is, hasonlóan a korábbiakhoz, az épület természetes, környezeti hatások, nem befolyásolt emberi tevékenységek által gerjesztett rezgéseit vizsgáljuk. Ezek a hatások azonban folyamatosan változnak, a különböző időintervallumokban felvett spektrumok nagyon eltérő környezeti hatásokat tükrözhetnek. Irodalmi mérésekben (Castellini et al., 2013; Siringoringo et al., 2009) két LDV-eszköz egyidejű használatával térképezték fel egy lemez természetes rezgéseit. A szkennelő LDV-vel mért spektrumot egy fix referenciaponton mérttel vetették össze. Sajnos mi ezt a módszert nem tudjuk használni, mert egy ekkora épület LDV-vel nem szkennelhető (és nincs

két LDV eszközünk sem). Számunkra csak az egyetlen LDV-készülékkel felvett mérési sorozatok kivitelezhetőek, amelyhez pontosan ismernünk kell a rezgések időbeli változásait.

2. A rezgési amplitúdók időbeli tendenciái

Épületrezgések időbeli tendenciáival foglalkozó cikkek bőven találhatóak a nemzetközi irodalomban (Guillier et al., 2014; Guillier et al., 2016; Michel et al., 2010). 2021 júliusában már mi is mértünk egy egyhetes tendenciát, amit publikáltunk is (Béres et al., 2021).

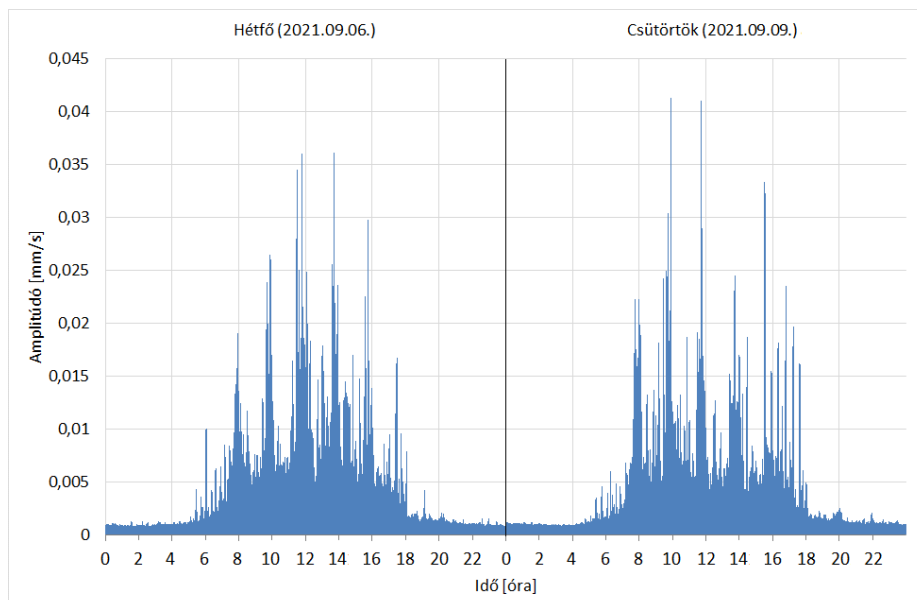


1. ábra. A tartófalrezgés LDV-spektrumainak maximális amplitúdói [mm/s] az idő függvényében. Két-perces átlagok, lent a nyári időszak (2021. augusztus 9–15.), fent a szorgalmi időszak első hetének (2021. szeptember 6–12.) adatai. A vastag függőleges segédvonalak az éjfélt, a vékonyak a delet mutatják.

A mért sebesség-idő grafikonok gyors Fourier-analízisével (FFT) a frekvenciaspektrumok maximális amplitúdóit és az ahhoz tartozó frekvenciákat jegyeztük fel 2 percenként. Ezek a frekvenciák általában a 6–7,5 Hz tartományba estek, ami a mobil asztal rezonancia görbéjének (Béres et al., 2022) ismeretében teljesen érthető. A maximális amplitúdóknak jellegzetes napi menete volt. Nappal sokkal nagyobbak voltak az amplitúdók, mint éjszaka, a minimumokat mindig hajnalban érték el. A hétkévi nappalokon (különösen vasárnap) azonban kevésbé rezgett az épület. A hétköznapi – a mobil asztal által felerősített – amplitúdók mindig elérték a 0,006 mm/s-os maximumot.

Abból az egyheti adatsorból akkor nem tudtuk eldönteni, hogy ezt a jellegzetes napi menetet, ill. a hétköznapi-hétkévi különbséget mi okozta. Az épületben lévők fizikai aktivitása (ami munkaidőben nyilván nagyobb), a járművek közlekedése az egyetemi és a környező utakon, esetleg meteorológiai tényezők (például a szél erőssége, ami napsütéses, frontmentes időben nagyon hasonló tendenciával rendelkeznek).

A kérdés eldöntése céljából a későbbi hónapokban is végeztünk ilyen jellegű méréseket. A 2021 augusztusában végzett egyhetes mérés nagyon hasonlított az egy hónappal korábbihoz. A következő hónapban – a szorgalmi időszak első hetében – megismételtük a mérést. Ekkor az épületben a fizikai aktivitás már sokkal nagyobb volt, a diákok az első órákon szinte teljes létszámban megjelennek. A mérési eredményeket és a nyári adatokkal való összehasonlításukat az 1. ábrán láthatjuk. Az ábrára pillantva elég nyilvánvaló, hogy az oktatási időben mért rezgési amplitúdók sokszorosán felülmúlják a nyári időszak megfelelő napszakjaiban mértet, miközben az éjszakai amplitúdók továbbra is kicsik maradtak. Az ábra alapján egyértelmű, hogy az épület rezgések fő oka nem a környező utakon folyó közlekedés, nem meteorológiai tényezők, hanem az épületeken belüli emberi aktivitás. Még egyértelműbben látszik ez a 2. ábrán, amelyen a szorgalmi időszak két napján mért sebességamplitúdókat időben jobban széthúzva ábrázoltuk. Jól látható, hogy a páros órák környékén, a dupla órák közötti nagy-szünetekben a rezgési amplitúdók különösen nagyok.



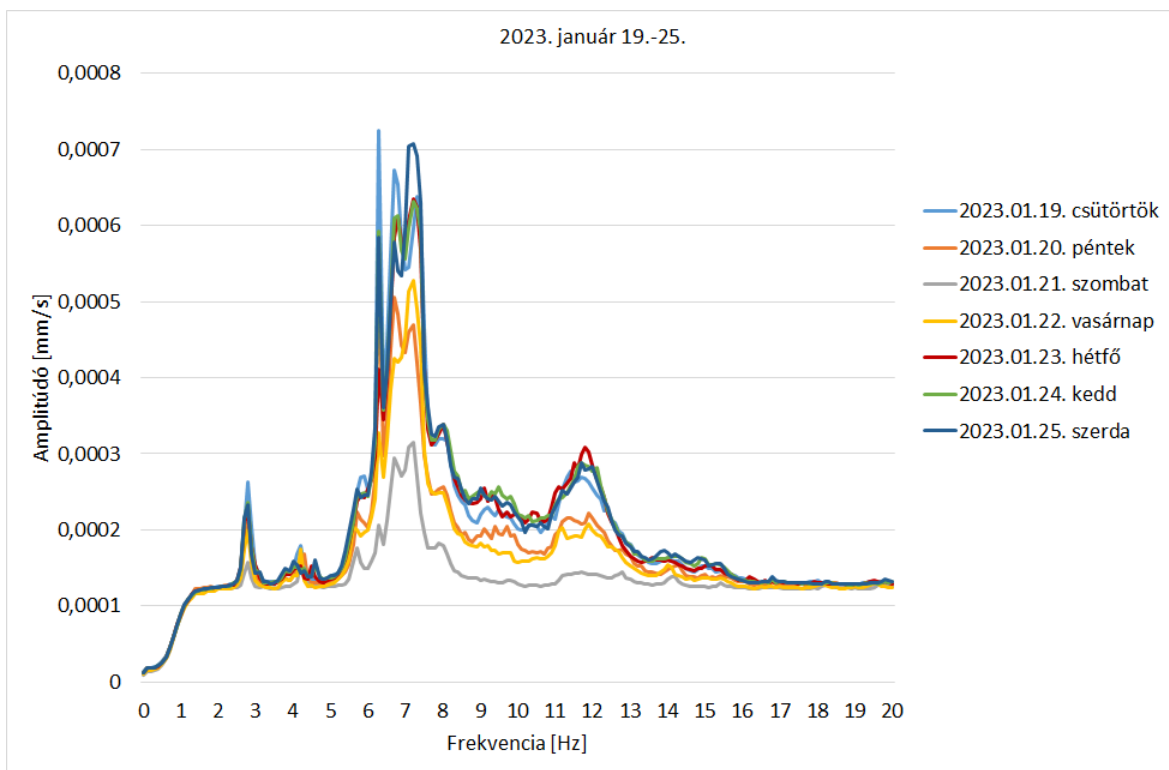
2. ábra. Az előző ábra két napjának (1. és 4. fent) adatai széthúzott időskálával. Az adatok jelentése egyezik az előző ábrával, de függőleges segédvonalak a négyel osztható egész órákat jelölik.

Ez a többi napon is megfigyelhető, de az ábrázolt két napon a legegyszerűbb. A szünetekben elsősorban az épületen belüli fizikai aktivitás növekszik, ennek pedig igen jelentős hatása van az épület rezgéseire. A nyári mérésekben ez a „páros óra hatás” nyilvánvalóan hiányzik.

3. A rezgési spektrumok időbeli tendenciái

A rezgési amplitúdókhoz hasonlóan a hét folyamán a rezgési spektrumok is jelentős változásokon mennek keresztül. Ezeket a spektrumokat az elsődlegesen mért időspektrumokból gyors Fourier-analízissel (FFT) állítjuk elő (Béres et al., 2021). Korábban – főleg a LIMA-méréseknél – adatkezelési gondot okozott az, hogy az FFT-spektrum 0 Hz környékén is tartalmazott egy magas csúcsot. Ez nem egy valódi rezgéshez tartozik, hanem az igen lassan változó rezgési középpont következménye, amit minden bizonnyal a hőtágulás okoz. Ebben a cikkben ezt a problémát úgy küszöböltük ki, hogy a Fourier-analízis során a 0–1 Hz-es tartományt letiltottuk.

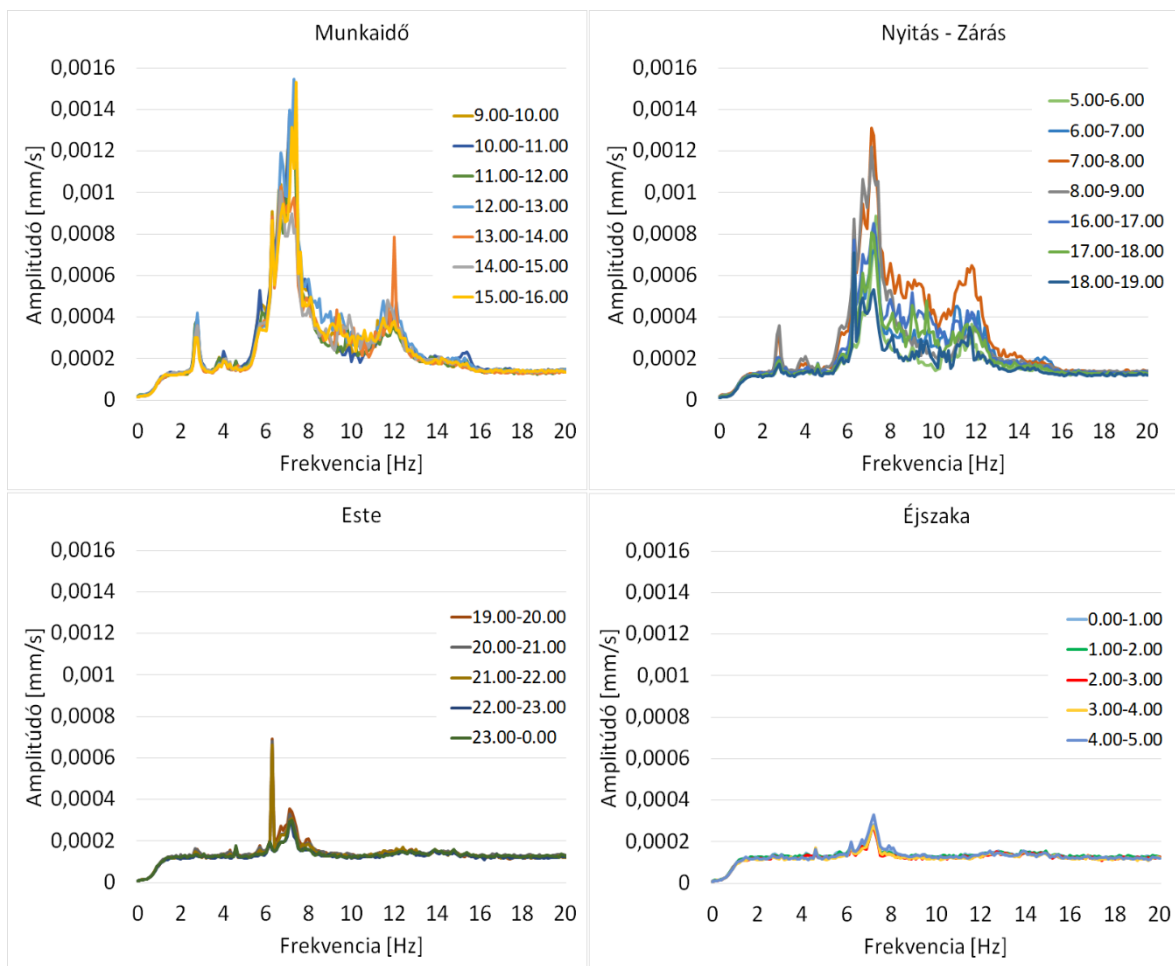
A napi rezgési spektrumok változásait a 2022/23-as tanév téli vizsgaidőszakában egy héten át tanulmányoztuk. A hét különböző napjain felvett FFT-spektrumokat a 3. ábrán láthatjuk. Ezek nem pontosan napi spektrumok, mert egy-egy mérés a megadott nap delétől másnap délig tartott. Talán nem meglepő, hogy a munkanapokon mért spektrumok sokkal nagyobb amplitúdójúak, mint a hétvégiek. Különösen igaz ez a szombati spektrumra, amely felvétele szombat déltől vasárnap délig tartott, amikor az emberek jelenléte, helyváltoztató mozgása az egyetemen (pláne a vizsgaidőszakban) minimális.



3. ábra. A tartófalrezgés FFT-frekvencia spektrumai a hét különböző napjain. A vízszintes tengelyen a frekvenciát [Hz], a függőlegesen a hozzájuk tartozó amplitúdókat [mm/s] ábrázoltuk.

A rezgési spektrumok a nap folyamán sokat változnak. Ha egészen rövid (néhány perces) időtartamú méréseket végzünk, akkor azok FFT-spektrumában nem jelenik meg a napi spektrumokban látható összes vonal, csak néhány. Azaz az épület egy adott pillanatban nyilvánvalóan nem mutatja meg az összes rezgési módusát. Minél hosszabb időtartamot tekintünk, annál több frekvencia azonosítható. Tapasztalataink szerint egy 20-perces mérésben már minden előforduló frekvencia megjelenik. A mérési idő növelésével a spektrumok jobban kisimulnak, de egy óra elteltével érdemben már alig változnak. Mindezek figyelembevételével az egyórás spektrumokat tekintettük a jó kompromisszumnak.

Az órás spektrumok napi változásaiban a munkanapokon igen hasonló tendenciákat figyeltünk meg. Ezt egyetlen nap példáján keresztül mutatjuk be (2023. 01. 25, szerda), amely a 3. ábrán szereplő mérési ciklus utolsó napja volt. Mivel egy ábrán 24 grafikon sok lenne, ezért a 4. ábrán azokat négy csoportra osztva ábrázoljuk: a munkaidőben (9–16 óra), a nyitás-zárás átmeneti időszakaisában (5–9 és 16–19 óra), este (19–24 óra) és éjszaka (0–5 óra).

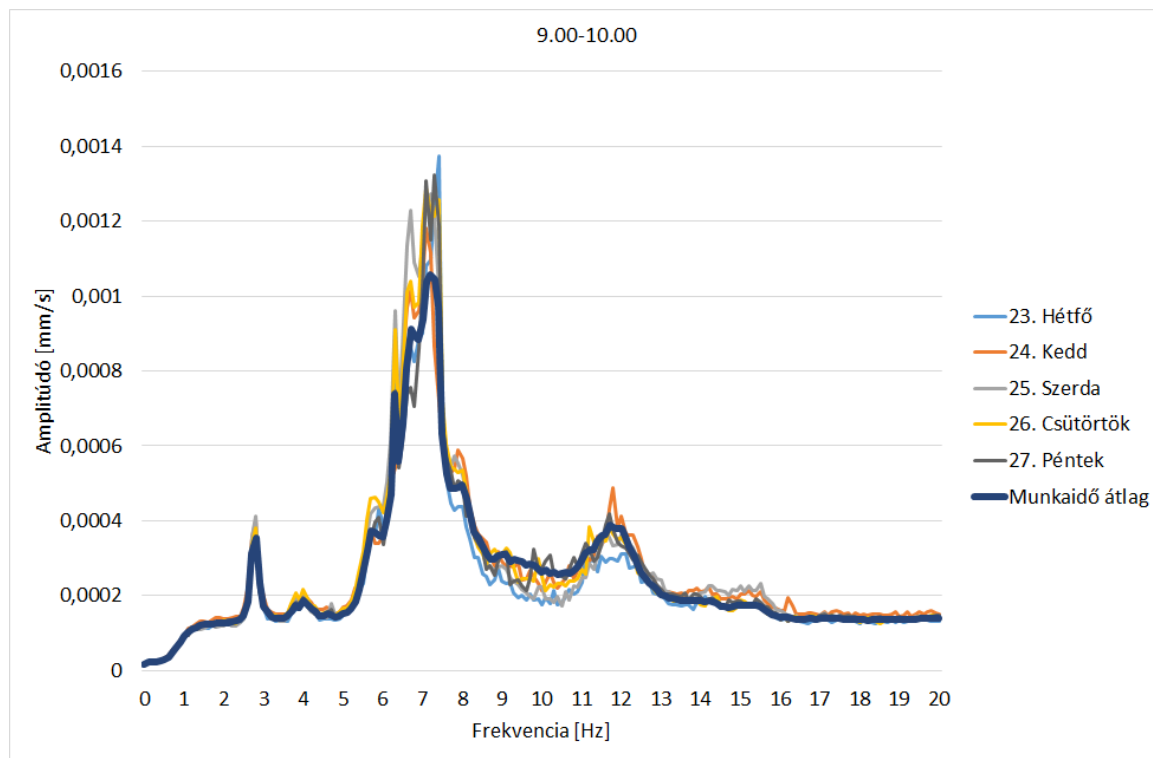


4. ábra. Az adott napon óránként felvett tartófalrezgés FFT-frekvencia spektrumok négy jellemző csoportra osztva. A vízszintes tengelyen a frekvenciát [Hz], a függőlegesen a hozzájuk tartozó amplitúdókat [mm/s] ábrázoltuk.

Mind a 4 időszak esetében a koordinátatengelyeken ugyanazt a léptéket használtuk, hogy a különbségek jól láthatók legyenek. Az ábra felső részén bemutatott, nagyobb rezgési amplitúdókkal rendelkező nappali időszakot két különböző spektrumtípus jellemzi. A szűkebben vett munkaidőben 9 és 16 óra között alig változik a spektrum. A korábban publikált spektrumokhoz hasonlóan a legkisebb frekvenciájú csúcs 2,8 Hz-en látható. Ez egyúttal az egész spektrum legstabilabb csúcsa, igen jól mérhető, távol van az asztal rezonancia tartományától. Ez elmondható a 4,1–4,34 Hz környéki kisebb, elmosódottabb összetett csúcsról is. A rezonanciatartomány szélén jól kivehető az 5,7 Hz és 6,3 Hz-en lévő csúcspár, és láthatók a tetején lévő, 6,8 Hz és 7,3 Hz környékén lévő csúcsok is. A tartomány fölött a 11,5–12 Hz szélesebb csúcs is szépen kiemelkedik a háttérből.

A nyitás-zárásnak nevezett átmeneti időszakokban (5–9 óra és 16–19 óra) a fentebb említett csúcsok mindegyike látható, de változó amplitúdóval. Érdekes, hogy ebben az időszakban a 8–11 Hz-es tartomány sem annyira üres, mint a 9–16 órás intervallumban.

Este (19–24 óra) drasztikusan lecsökkennek az amplitúdók, kivéve a 6,3 Hz-es csúcst, amelynek az amplitúdója 22 óráig a nappali szinten maradt. Éjszaka (0–5 óra) alig vagy egyáltalán nem látszanak a csúcsok. Különösen igaz ez a 2,8 Hz-es nappal nagyon éles és a 12 Hz-es szélesebb csúcsra.

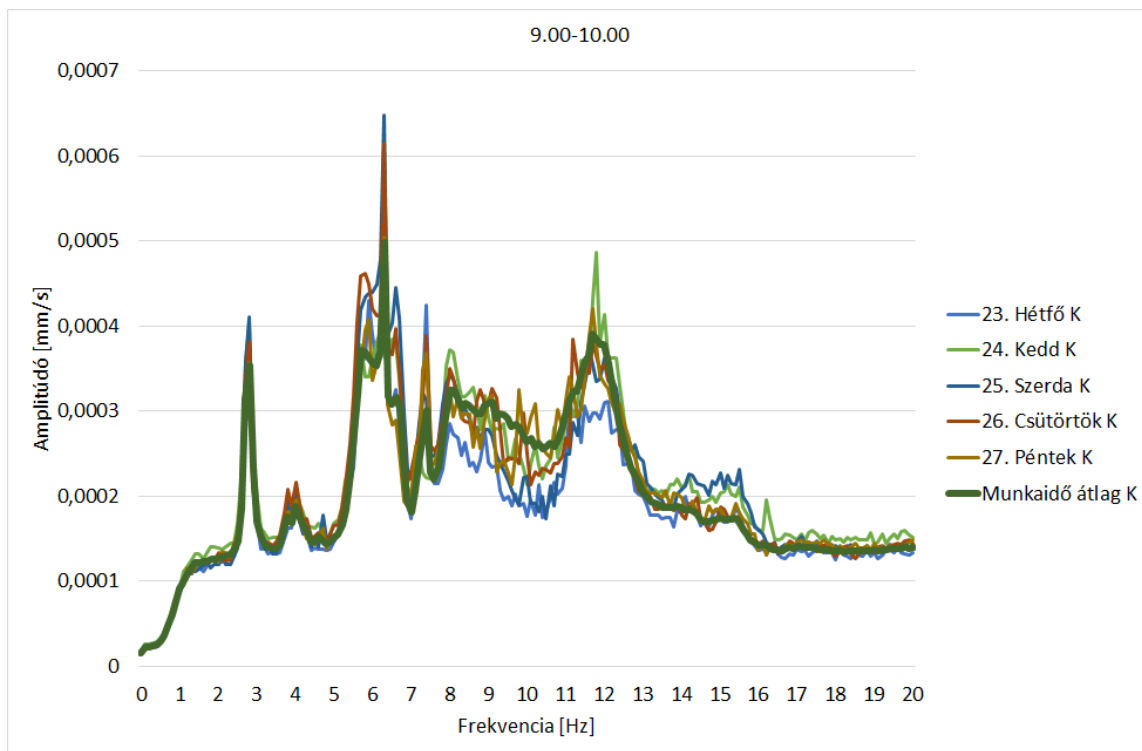


5. ábra. A tartófalrezgés FFT-frekvencia spektrumai a hét munkanapjain 9–10 óra között. A vízszintes tengelyen a frekvenciát [Hz], a függőlegesesen a hozzájuk tartozó amplitúdókat [mm/s] ábrázoltuk. Az ábrán a hét teljes munkaidejére átlagolt spektrumot is feltüntettük.

Megállapítottuk tehát, hogy a munkanapokon (legalábbis egy adott vizsgaidőszak egy hetében) a 24 órás spektrumok viszonylag keveset változnak. Ugyanez mondható el az órás spektrumokról egy adott munkanapon 9–16 óra között. Ezek alapján azt várjuk, hogy egy adott (vizsgaidőszaki) hét munkanapjain a

9–16 óra között felvett órás spektrumok viszonylag jó egyezést mutatnak. Ez a 35 spektrum azonban sok lenne egy ábrára, ezért az 5. ábrán a hét öt munkanapján az első tekintett órában (9–10 óra között) felvett öt spektrumot hasonlítjuk össze.

Az ábrán vastagabb vonallal a hét teljes munkaidejére átlagolt spektrumot is feltüntettük. Látható, hogy kb. 5,5 Hz-ig a görbék együtt futnak, az átlagot jelentő vastagabb görbe szinte teljesen letakarja a többi. Ideális az éles 2,8 Hz-es csúcs és a 4,1–4,3 Hz környéki elmosódottabb összetett csúcs is. 5,5 Hz fölött, a mérőasztal rezonanciagörbéje tartományában is minden görbén látszik minden csúcs, de a magasságaik között már vannak eltérések.



6. ábra. Ugyanaz, mint az előző ábrán, de a spektrumokat a mobil asztalra rezonanciagörbéje menetének megfelelően áttranszformáltuk (rezonanciamentesítettük) (Béres et al., 2022)

Ha az FFT-görbét a (Béres et al., 2022)-ben leírt módon rezonanciamentesítjük (azaz a spektrumokat a mobil asztalra rezonanciagörbéje menetének megfelelően áttranszformáljuk) (6. ábra), akkor a rezonanciatartományban csökkennek ezek a különbségek, de afölött, a 8,5–11 Hz-es tartományban megmaradnak.

4. Összefoglalás, következtetések

Megmértük a lézerlaboratóriumunk falának rezgéseit mobil rezgésmentes asztalra helyezett LDV-be-
rendezéssel. Méréseink alapján az egyetem A/2 épületének keresztirányú rezgéseivel kapcsolatban von-
tunk le következtetéseket. Megállapítottuk, hogy a rezgések az épületbeli emberi tevékenységgel szoros

kapcsolatban vannak. A rezgések hétköznapi munkaidőben mindig erősebbek, mint éjszaka vagy (a napszaktól függetlenül) hétvégén. Igen nagy szerepe van annak is, hogy a tanév melyik szakaszában járunk: az oktatási időben mért rezgési amplitúdók sokszorososan felülmúlják a nyári időszak megfelelő napszakjaiban mérteteket, miközben az éjszakai amplitúdók továbbra is kicsik maradtak. Azt is megfigyeltük, hogy az oktatási időben a páros órák környékén, a dupla órák közötti nagyszünetekben a rezgési amplitúdók különösen nagyok.

Megállapítottuk, hogy a munkanapokon (az adott vizsgaidőszak egy hetében) mind a 24 órás, mind 9–16 óra között mért órás frekvencia spektrumok viszonylag stabilak, különösen az 5 Hz alatti tartományban. Tehát ha az épület különböző pontjain különböző időpontokban végzett méréseket szeretnénk összehasonlítani, akkor a méréseket erre az intervallumra (hétköznapi 9–16 óra között) kell korlátoznunk. Természetesen a szorgalmi, a vizsga- és a nyári vakációs időszakokat nem szabad összehasonlítani, mert ezekben az időszakokban az egyetemi tanulmányi épületekben igen eltérő az emberi aktivitás. A szorgalmi időszakban figyelniük kell a tanulmányi órák kétórás periódusára is.

Irodalom

- [1] Béres M., Jenyó T., Majár J., Paripás B. (2021). A Miskolci Egyetem A/2 épülete rezgéseinek mérése lézerinterferometrikus módszerekkel. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye*, 11 (5), 195–205, <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.5.20>
- [2] Béres M., Jenyó T., Paripás B. (2022). Épületrezgések lézerinterferometrikus mérése rezgésmentes asztalról. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye*, 12 (2), 287–294. <http://doi.org/10.35925/j.multi.2022.2.25>
- [3] Castellini, P., Martarelli, M., Tomasini, E. P. (2013). Laser Doppler vibrometry for structural dynamic characterization of rotating machinery. *Applied Mechanics and Materials*, 415, 538–543. <https://www.scientific.net/AMM.415.538>
- [4] Siringoringo, D. M., Fujino, Y. (2009). Noncontact Operational Modal Analysis of Structural Members by Laser Doppler Vibrometer. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24 (4), 249–265, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000854](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000854)
- [5] Guillier, B., Chatelain, J. L., Machane, D., Farsi, M., Perfettini, H., Oubaiche, E. H., Bensalem, R., Hellel, M. (2014) Continuous monitoring of ambient vibration in building: time and space stability of dynamic parameters from cgs building (Algiers, Algeria). *2nd European Conf. on Earthquake Eng. and Seismology*, Istanbul.
- [6] Guillier, B., Chatelain, J. L., Perfettini, H., Oubaiche, E. H., Voisin, C., Bensalem, R., Machane, D., Hellel, M. (2016) Building frequency fluctuations from continuous monitoring of ambient vibrations and their relationship to temperature variations. *Bull Earthquake Engineering*, 14, 2213–2227, <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9901-z>
- [7] Michel, C., Gueguen, P. (2010) Time–frequency analysis of small frequency variations in civil engineering structures under weak and strong motions using a reassignment method. *Structural Health Monitoring*, 9 (2), 159–171, <https://doi.org/10.1177/1475921709352146>