

prof. Ing. Stanislav ŽIARAN, CSc.
Ing. Ondrej CHLEBO, PhD.
prof. Ing. Miloš MUSIL, CSc.
STU Bratislava, Strojnícka
fakulta, Ústav aplikovanej
mechaniky a mechatroniky

Analýza kmitania a hluku inštalovaných kogeneračných jednotiek v kotolniciach na sídliskách

Analysis of Vibration and Noise of Cogeneration Units Installed in Boiler Houses at Housing Estates

Recenzent
Ing. Miroslav Kučera, Ph.D.

Cieľ článku je pre inštalovanú KGJ identifikovať a analyzovať príčiny jej nadmerného dynamického zaťaženia, nežiaduci prenos generovaného nízkofrekvenčného vlnenia do okolitých konštrukcií a následného vyžarovania do blízkych obytných priestorov, kde rezidenti sa sťažujú, a to počas duševnej práce, relaxu a v nočných hodinách. Vnem má charakter dunivého hluku, ktorý výrazne znižuje najmä kvalitu nočného odpočinku. Vykonala sa frekvenčná analýza agregátu KGJ v mieste jeho uloženia a v jej rekuperačnej časti. Meral a analyzoval sa prenos kmitania cez silentbloky a cez vibroizoláciu základu ako aj akustická účinnosť krytu KGJ. Identifikovali sa príčiny a na základe teoretickej a experimentálnej analýzy sa navrhli účinné opatrenia.

Kľúčové slova: spaľovací motor, nízkofrekvenčné vlnenie, prenos, meranie, zdravie, opatrenia, hluk

The goal of the article is to identify and analyse the causes of excessive dynamic loading of CGU's, their transmission of low-frequency waves into surrounding structures, and the subsequent radiation to nearby residential areas, where residents are expressing annoyance during mental work, relaxation and throughout the evening. The character of the noise manifests itself as a constant rumbling noise, which may greatly reduce quality of life of nearby dwellings. Frequency analysis of the CGU mountings and reciprocating parts were performed. The vibration transmission through the silentblocks and via vibro-isolation of the base as well as the acoustic efficiency of the CGU covering were measured and analysed. Causes of vibration and noise were identified and effective measures were proposed based on the theoretical and experimental analysis.

Keywords: combustion engine, low-frequency waves, transmission, measurement, health, measures, noise

ÚVOD

Inštalácia kogeneračných jednotiek (KGJ) do kotolní prináša zisk z predaja elektrickej energie a využitia odpadového tepla na vykurovanie, či výrobu teplej úžitkovej vody. Neodborná inštalácia KGJ však prináša nežiaduce dynamické zaťaženie okolitého prostredia kmitaním a hlukom. Kotolne sa spravidla umiestňujú v areály sídlisk, či v blízkosti bytových domov a v niektorých prípadoch aj v samotnom obytnom bloku alebo je kotolňa pripojená k obytnému bloku. Pri nedostatočnej vibroizolácii a hlukoizolácii kogeneračných jednotiek (KGJ) z priestoru kotolne, cez technologické otvory a stavebné konštrukcie, dochádza k nežiaducemu vyžarovaniu a prenosu vibroakustickej energie, ktorá najmä vo forme hluku obťažuje obyvateľov okolitých bytov a tí sa sťažujú. Toto obťažovanie hlukom je najmä v čase relaxu a spánku. Prejavy od tohto špecifického hluku, podľa vyjadrenia sťažovateľov, sú spravidla tlak v hlave, podráždenosť, migrény, únava, prebúdzenie, stres, depresie. Prejavuje sa aj zníženou produktivitou duševnej práce. Nízkofrekvenčné kmitanie komponentov KGJ a následne generovaný nízkofrekvenčný hluk aj vo vzdialených bytových priestoroch môže zvýšiť hladinu akustického tlaku, a to najmä v dôsledku vzniku stojatého vlnenia v bytových priestoroch [3, 7, 11, 12].

Povinnosťou prevádzkovateľa takýchto zariadení je znížiť hluk vyžarovaný do vonkajšieho prostredia tam, kde je to potrebné, a najmä tam, kde expozícia hluku môže mať škodlivé vplyvy na zdravie človeka. Pri inštalácii KGJ a návrhu vibroakustických opatrení je treba aplikovať najnovšie teoretické poznatky s efektívnym využitím nevyhnutných prostriedkov na zachovanie bezpečnosti človeka, jeho zdravia, ale aj spoľahlivosti, životnosti a hospodárnosti prevádzky tak, aby nedochádzalo k obťažovaniu hlukom ľudí v blízkom obytnom prostredí od KGJ. Je žiaduce, aby generované dynamické zaťaženie (najmä mechanické kmitanie) nega-

tívne neovplyvňovalo technologické a stavebné konštrukcie kotolne. Takéto dynamické zaťaženie spôsobuje najmä únavové poškodenie spojov konštrukcií, samotných zdrojov kmitania a môže ovplyvňovať aj riadiace a kontrolné systémy kotolne ako celku [4, 5, 13, 16].

CIEĽ, METODOLÓGIA A MERACIA TECHNIKA

Cieľ štúdie

Cieľom štúdie bolo preskúmať a analyzovať príčiny a zdroje generovania nežiaducej vibroakustickej energie, štruktúrny prenos vibroakustickej energie od deterministického budenia, jeho vplyvy na okolité konštrukcie a blízke akusticky chránené prostredie z kotolne po nainštalovaní kogeneračnej jednotky. Analyzuje aj vplyv nízkofrekvenčného vibroakustického vlnenia na zdravie a pohodlie dotknutých osôb. Cieľ je aj naznačiť aplikovanie teórie správnej inštalácie KGJ a jej komponent z hľadiska minimalizácie dynamického zaťaženia okolitého prostredia, ako aj samotnej KGJ.

Metodológia a meracia technika

Meranie parametrov charakterizujúcich prenos vibroakustickej energie sa vykonalo na KGJ a v mieste jej vplyvu na človeka. Primárnym zdrojom nadmerného kmitania a hluku bol plynový spaľovací motor (PSM), ktorého prevádzkové otáčky boli 1 500 ot/min. Analyzoval sa silný deterministický signál generovaný PSM a jeho ozva na okolité konštrukcie FFT analyzátorom PULSE Bruel & Kjaer. Tento prenosný analyzátor predstavuje systém, ktorý zaručuje spoľahlivosť merania, analýzu a vyhodnotenie. Systém pozostáva z piezoelektrických akcelerometrov typu B&K 4533 a B&K4534 s využiteľným frekvenčným rozsahom od 1 Hz do 10 kHz a displejového a pamäťového modulu. K analýze prenosu kmitania sa použil aj seizmický senzor B&K8340. K identifikácii energeticky dominujúcich frekvencií sa vykonala frek-

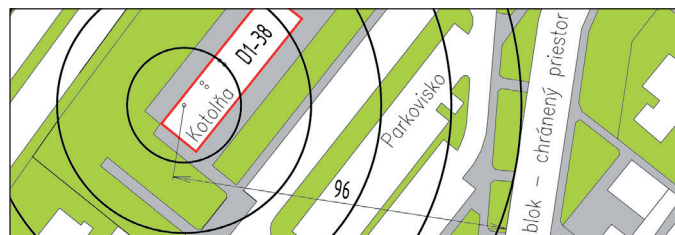
venčná analýza pomocou rýchlej Fourierovej transformácie (FFT) s využitím analyzátoru PULSE. Pripevnenie senzorov na konštrukčné prvky analyzovaných objektov bolo v súlade s požiadavkami ISO 5348 s využitím doterajších skúseností operátorov [5, 14, 17, 18, 20]. Cieľom bolo zabezpečiť, aby senzor zrýchlenia správne reprodukoval pohyb analyzovanej zložky bez vplyvu jej ozvy. Okrem vymedzenia sledovaného frekvenčného pásma, pre zistený druh signálu, je veľmi dôležité vybrať vhodné spriemerovanie, počet spriemerovaní, ako aj vhodné časové okno [16]. Hladina akustického tlaku sa analyzovala zvukomerom Bruel & Kjaer 2250 a mikrofónom B&K 4189 pripojeným k meraciemu systému PULSE a pri akustických meraniach sa použilo váženie Z, ktoré zodpovedá skutočným hodnotám akustickej energie. Cieľom frekvenčnej analýzy bolo určiť frekvenčné rozloženie nežiaduceho dynamického zaťaženia a jeho príčiny a určiť príslušný frekvenčný rozsah pre maximálnu dynamickú ozvu PSM. Metodika prezentovaná v článku môže byť použitá aj pre iné zdroje nízkofrekvenčného budenia.

Meranie prenosového útlmu silentblokov a pružných prvkov predpokladá, že sa materiál správa lineárnym spôsobom a má zanedbateľnú hmotnosť v porovnaní s jej celkovým zaťažením. Metodika k určenie prenosového útlmu využíva reálne budenie motorom KGJ (vstup) a jej reálne uloženie, či začlenenie jednotlivých prenosových komponentov (výstup). Dva akcelerometre merajú súčasne kmitanie na vstupe a výstupe vibroizolačného prvku.

IDENTIFIKÁCIA ZDROJOV NÍZKOFREKVENČNÉHO VLNENIA A JEHO VPLYVY NA ČLOVEKA A KONŠTRUKCIE

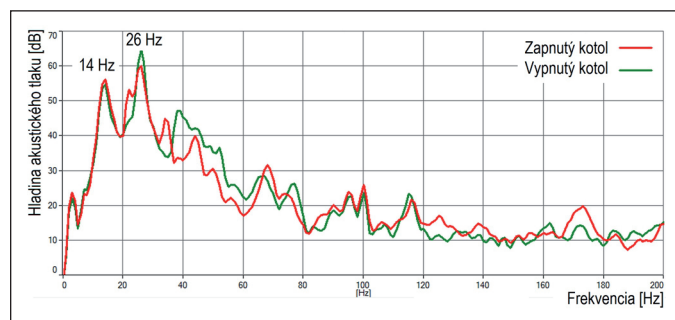
Nízkofrekvenčné zdroje kmitania a následného vibroakustického vlnenia reprezentujú spaľovacie motory KGJ, a to ich vratné hmoty, nevyváženosť, nesúosové spojenie s generátorom, vôle, ale aj nepresné tvary a poškodenie konštrukčných prvkov motora, ktoré sa vyznačujú veľkou amplitúdou a veľkou energetickou mohutnosťou kmitania, pričom takto generované vibroakustické vlnenie sa šíri do relatívne veľkých vzdialeností. Kotelne s KGJ sú jedným z hlavných zdrojov nízkofrekvenčného vibroakustického vlnenia [6, 8, 9, 15, 17]. Akustické vlnenie od týchto zdrojov pri nízkootáčkových strojových zariadeniach je spravidla v oblasti infrazvuku, ktorý je pre sluchový orgán človeka nepočuteľný (do 16 Hz), ale vyššie hladiny pôsobia na bubienok nepríjemným pulzujúcim tlakom [7, 12]. Na druhej strane však tieto zdroje vybudzujú aj relatívne silné nízkofrekvenčné vibroakustické vlnenie, ktorého energia od určitej intenzity ohrozuje zdravie človeka, podobne ako energeticky silný infrazvuk, znižuje jeho pohodlie a produktivitu. Intenzita nízkofrekvenčného hluku od 16 Hz do 80 Hz je pre necitlivosť sluchového orgánu človeka značne redukovaná, ale pri vyšších hladinách je takýto hluk z hľadiska psychického zaťaženia obťažujúci, rušivý a škodlivý (dunivý hluk) [1, 2, 7, 16]. Nízkofrekvenčné vlnenie môže negatívne ovplyvňovať spoľahlivosť a životnosť najmä riadiacich jednotiek kotlov a KGJ. Aj napriek krytovaniu a vibroizolácii KGJ, časť vibroakustickej energie sa konštrukciami prenáša do okolitého prostredia a zasahuje aj akusticky chránené priestory. Na obr. 1 je situovanie potenciálneho zdroja hluku na sídlisku, ktorý môže ohrozovať zdravie a pohodlie človeka nachádzajúceho sa v akusticky chránených priestoroch [17, 18].

Nízkofrekvenčné kmitanie komponentov kogeneračných jednotiek a následne generovaný nízkofrekvenčný hluk aj vo vzdialených uzatvorených priestoroch budov môže zvýšiť hladinu akustického tlaku, a to najmä v dôsledku vzniku stojatého vlnenia v akusticky chránených priestoroch [7, 12]. Z frekvenčného spektra hluku získaného z meraní v byte sťažovateľa je zrejmé, že dominujúci nežiaduci hluk generujú nie kotlové jednotky, ale nainštalovaná KGJ, a to v celom nízkofrekvenčnom rozsahu tak, ako to prezentuje obr. 2.



Obr. 1 Situovanie bytového bloku sťažovateľa vzhľadom na zdroj hluku (kotelňu)

Fig. 1 Situation of the apartment block of the complainer with respect to the source of noise (boiler house)



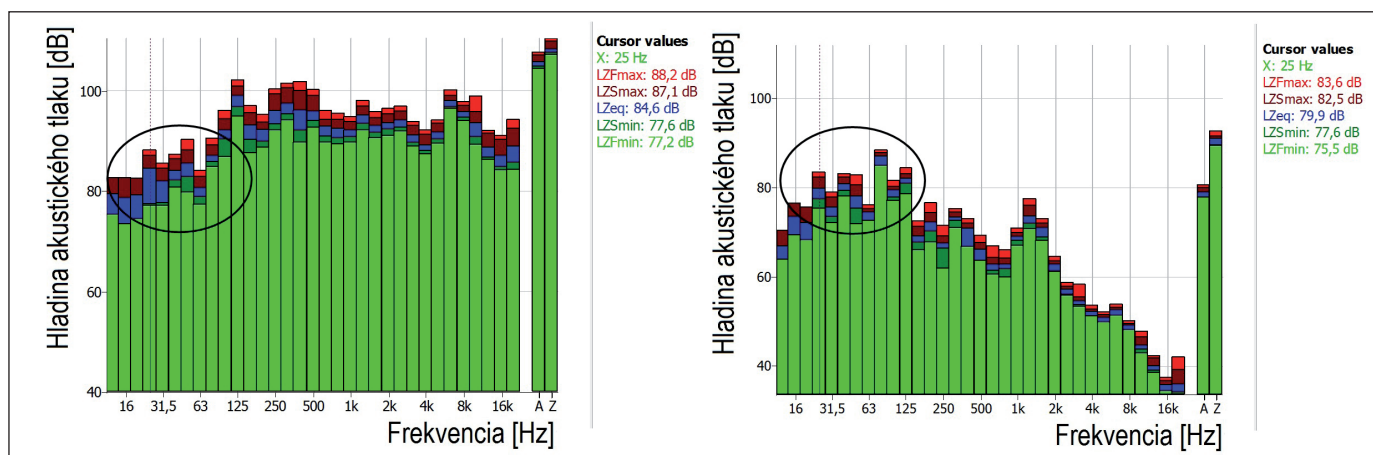
Obr. 2 Spektrum hluku vyžarované kogeneračnou jednotkou pri zapnutých a vypnutých kotloch

Fig. 2 Spectrum of noise emitted by cogeneration unit when the boilers are switched on and off

Frekvenčná analýza hluku kogeneračnej jednotky

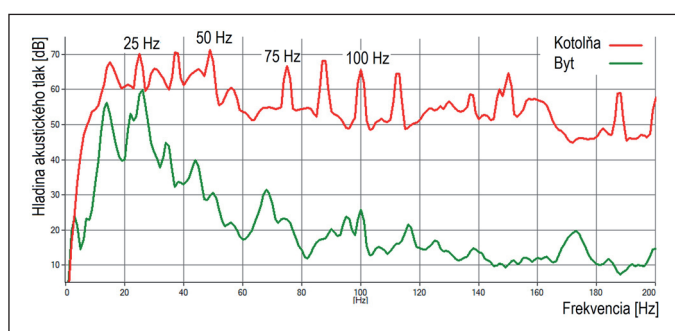
Účinnosť útlmu krytu v tretinovo-octákových pásmach analyzovanej KGJ, pri použití váženia Z, je zobrazený na obr. 3. Toto váženie reprezentuje skutočné pôsobenie akustickej energie na človeka a prostredie na rozdiel od váženia A reprezentujúce vnemové vyjadrenie akustickej energie, ktorá je nižšia a nezodpovedá skutočnosti. Z porovnania amplitúd je vidieť, že pri nízkych frekvenciách je útlm krytu KGJ veľmi malý, a to pri strednej frekvencii 25 Hz, čo je otáčková frekvencia spaľovacieho motora, je útlm len 4,7 dB, zatiaľ čo pri frekvencii 500 Hz je to 29,7 dB, či pri frekvencii 4 kHz, kde je sluchový orgán najcitlivejší, je útlm krytu 37 dB. Z uvedeného vyplýva, že útlm nízkofrekvenčného akustického vlnenia krytom je pri nízkych frekvenciách veľmi malý, čo vyplýva z teórie a potvrdili to aj merania v kotolni (vo vzdialenosti $\lambda/4$ pri frekvencii 25 Hz, čiže 3,5 m od krytu) a v akusticky chránenom priestore vzdialenom približne 100 m od kotolne (obr. 4). Energia nízkofrekvenčného vlnenia sa cez konštrukcie a technické otvory kotolne šíri do relatívne veľkých vzdialeností a za určitých podmienok generuje v chránených priestoroch stojaté vlnenie, čo zvyšuje hustotu akustickej energie. Aj na vzdialenosť približne 100 m je útlm konštrukciou kotolne a vzduchom malý a je 10 dB, zatiaľ čo útlm od 30 dB vyššie sa dosahuje už od frekvencie 50 Hz (obr. 4). Možno konštatovať, že analyzovaný kryt má nízku tlmiacu účinnosť energie nízkofrekvenčného hluku, zatiaľ čo pri vyšších frekvenciách je tento útlm akustickej energie podstatne vyšší.

Samotné mechanické kmitanie, ktoré sa v interakcii s plynným prostredím transformuje na akustické kmitanie (hluk), sa od mechanickej sústavy tvorenej spaľovacím motorom a generátorom (agregát – hlavný zdroj vibroakustickej energie) šíri cez jej uloženie a napojenú potrubnú sústavu do okolitého prostredia, a to najmä cez stavebné a technologické konštrukcie. Intenzita šírenia sa vibroakustickej energie od agregátu KGJ závisí najmä od kvality vibroizolácie od jeho základu a od stavebných konštrukcií, ako aj od vibroizolácie rekuperačnej sústavy KGJ. Účinnou vibroizoláciou sa výrazne redukuje aj nízkofrekvenčný hluk [5, 10, 16].



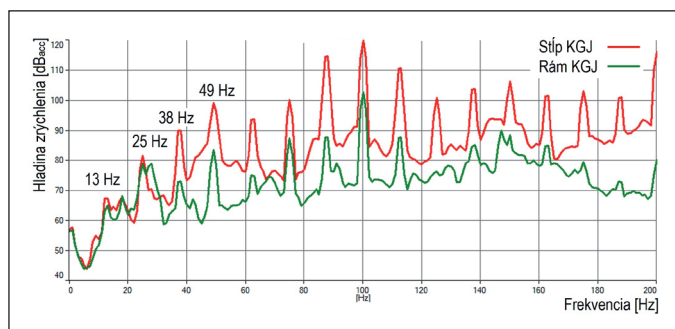
Obr. 3 Tretinooktávová analýza vo vnútri krytu KGJ (vľavo) a 0,5 m za krytom (vpravo)

Fig. 3 One-third octave analysis inside the CGU housing (left) and 0.5 m behind the housing (right)



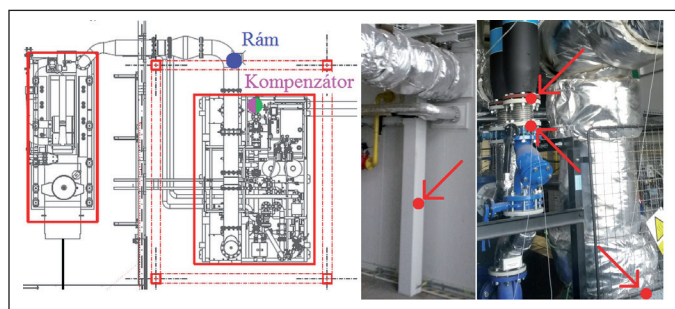
Obr. 4 Spektrum hluku vyžarované kotolňou v jej priestore a v byte

Fig. 4 Spectrum of noise emitted by boiler into its enclosure and into the apartment



Obr. 5 Frekvenčné spektrum kmitania podperných konštrukcií KGJ

Fig. 5 Frequency spectrum of vibrations of CGU support structures



Obr. 6 Schéma rekuperačnej časti KGJ (vľavo) a meracie miesta na stĺpe podpernej konštrukcie (v strede) a vodorovného rámu výmenníka (vpravo) pri kryte motora KGJ

Fig. 6 Diagram of the recuperative part of CGU (left) and measuring points at the support structure (in the center) and at the horizontal frame of the exchanger (right) by the CGU casing

Analýza prenosu nízkofrekvenčného vlnenia

Spaľovací motor, ktorý sa používa v analyzovanej sústave KGJ, je rozhodujúci zdroj veľmi intenzívneho nízkofrekvenčného deterministického vibroakustického vlnenia. Šírenie vibroakustického vlnenia do blízkeho okolia v rozhodujúcej miere ovplyvňuje okrem technického stavu mechanickej rotujúcej sústavy KGJ aj jej vibroizolácia vzhľadom na základovú dosku [17, 19], vibroizolácia základovej dosky vzhľadom na okolité prostredie a vibroizolácia spájacích častí KGJ medzi mechanicou rotujúcou sústavou a rekuperačnou časťou. Frekvenčné spektrum meraného zrýchlenia z dvoch meracích miest na podperných konštrukciách výmenníkovej časti KGJ je na obr. 5. Účinky šíriaceho sa vibroakustického vlnenia od takýchto zdrojov sa môžu prejavovať aj kmitaním stavebných konštrukcií a predmetov v chránených priestoroch. Pri dlhšom pôsobení zdroja dochádza k narušeniu stavebných konštrukcií (pukliny v stenách). Relatívne malé amplitúdy pri otáčkovej frekvencii a jej blízke harmonických sú ovplyvnené zvolenými meracími miestami na podperných konštrukciách výmenníkovej časti KGJ, ktoré sú v tesnej blízkosti zdroja kmitania KGJ (obr. 6).

Vychádzajúc z frekvenčných spektier nameraného kmitania, mimo hlavného zdroja kmitania, vyplýva, že vibroizolácia primárneho zdroja KGJ nebola vykonaná v súlade s teóriou prezentovanou napr. v literatúre [5]. Treba poznamenať, že pri zvolení meracieho miesta vo vzdialenosti $\lambda/4$, teda v štvrtine vlnovej dĺžky najnižšej sledovanej frekvencie, sú amplitúdy kmitania podstatne vyššie ako sú prezentované na obr. 5. Cieľom tohto merania však nebolo sledovať vplyv energie kmitania na kotlové sústavy a stavebné konštrukcie výhrevne, ale potvrdiť frekvenčnú zhodu medzi akustickým vlnením v byte a vlnením mechanickeho kmitania v kotolni.



Obr. 7 Meracie miesta na kogeneračnej jednotke: (vľavo) silentblok, (v strede) podperný rám potrubnej sústavy, (vpravo) vlnovec v potrubí chladiacej vody

Fig. 7 Measuring points on the cogeneration unit: (left) silentblock, (in the center) supporting frame of the piping system, (right) bellows in the cooling water pipe

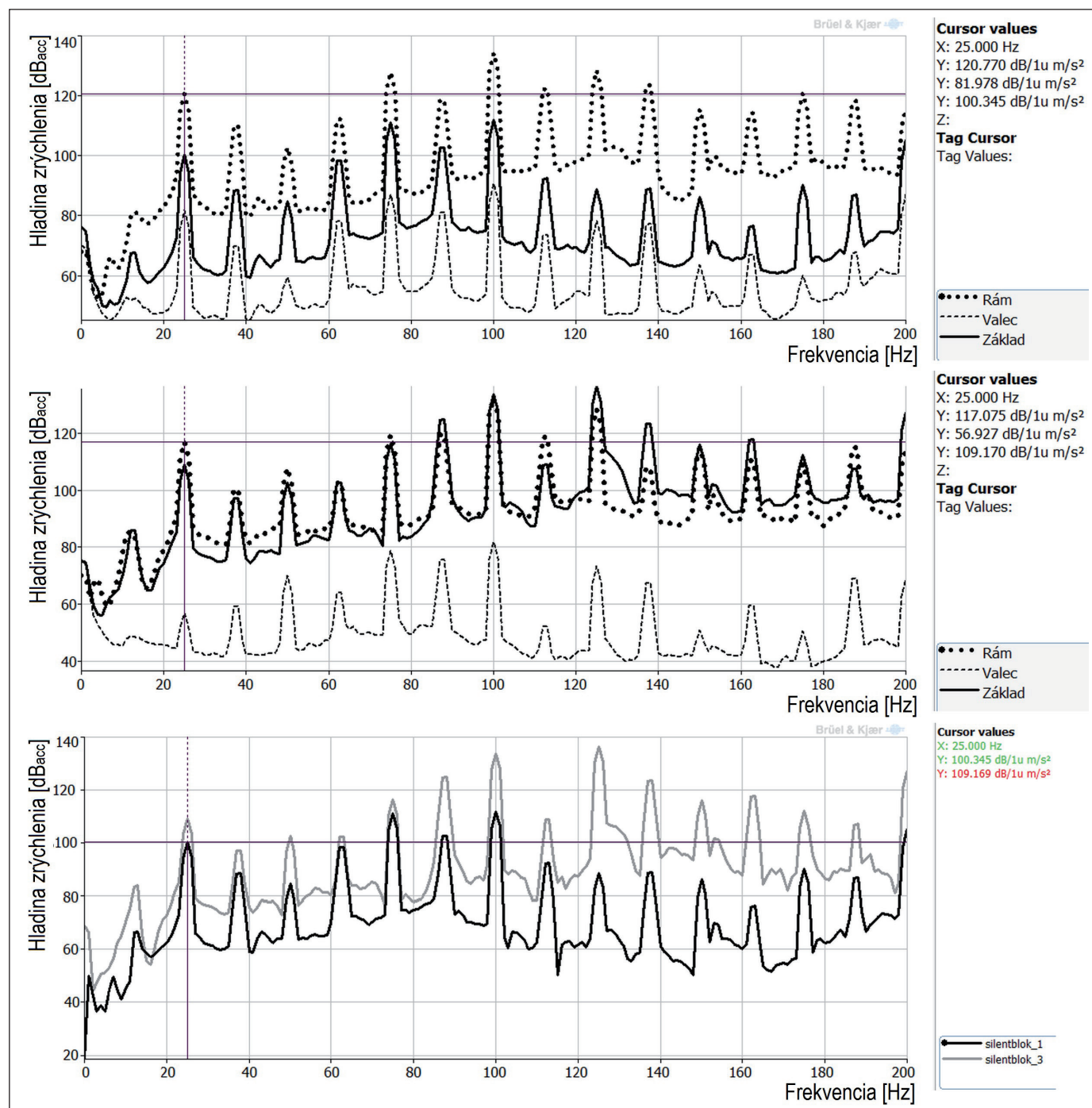
Dominantným zdrojom energeticky silného vibroakustického vlnenia je už spomínaný spaľovací motor KGJ. Jeho otáčky sa v čase merania pohybovali v blízkosti 1 500 ot/min, čo zodpovedá frekvencii v blízkosti 25 Hz. Počas merania sa zaznamenalo mierne kolísanie otáčok spaľovacieho motora, a preto aj hodnoty generovaných tónových frekvencií mierne kolísali. Vzhľadom na hodnoty snímaného zrýchlenia kmitania mimo spaľovacieho motora KGJ možno konštatovať výrazné dynamické zaťaženie samotného strojového zariadenia a jeho blízkych konštrukcií a prostredia nízkofrekvenčným kmitaním. Z hľadiska hlukovej analýzy v chránenom priestore je rozhodujúca otáčková frekvencia motora 25 Hz a preto sa pozornosť sústreďuje predovšetkým na analýzu a redukciu mohutnosti kmitania pri tejto frekvencii.

Frekvenčná analýza prenosu kmitania v uložení KGJ

Vykonal sa frekvenčná analýza snímaného dynamického namáhania

(kmitania) mechanickej sústavy KGJ ako celku, a to pomocou rýchlej Fourierovej (FFT) analýzy generovaného kmitania, použitím najmodernejšej meracej techniky [9]. Sledovali sa možné vibračné mosty, ako sú silentbloky uloženia motora a generátora na základ, samotné uloženie základu tejto mechanickej sústavy vzhľadom na stavebné konštrukcie a podlažie, či prepojenie potrubných sústav chladiacej vody a spalín s rekuperačnou sústavou KGJ. Meracie miesta sa vybrali v miestach predpokladaného maximálneho toku energie kmitania do okolitých konštrukcií (obr. 7).

Prenos energie kmitania cez silentbloky a pružné komponenty závisí aj od ich zaťaženia a spôsobu ich pripevnenia. Frekvenčný prenos cez dva náhodne vybrané silentbloky a prenos do vibroizolovanej stavebnej konštrukcie je na obr. 8. Porovnaním frekvenčných amplitúdových charakteristík pre tieto silentbloky vidieť výrazné rozdiely v účtne energie



Obr. 8 Prenos energie kmitania cez silentbloky

Fig. 8 Transfer of vibration energy through silentblocks

kmitania. Ak silentblok 1 (obr. 8 hore) plní funkciu tlmíča, kde útlm v sledovanom frekvenčnom pásme (do 200 Hz) je 21,4 dB a pri otáčkovej frekvencii je to 20,4 dB, potom silentblok 3 (obr. 8 v strede) má v tomto pásme funkciu zosilňovača kmitania, a teda jeho útlm má zápornú hodnotu rovnajúcu sa -4,3 dB. Pri otáčkovej frekvencii je však útlm amplitúdy kmitania, ktorý je len 7,9 dB oproti 20,4 dB pri silentbloku 1. Zrejme je, že tento silentblok nie je nastavený podľa požiadaviek teórie maximálnej blokovej sily (dynamickej tuhosti), čím nastáva nežiaduca kontaktná rezonancia. Vo všeobecnosti platí, že izolátory kmitania sú účinné len medzi konštrukciami relatívne veľkej dynamickej tuhosti na oboch stranách izolátora [5]. Porovnanie frekvenčných amplitúdových charakteristík tlmenia konštrukčne rovnakých silentblokov 1 a 3 na ich výstupe je na obr. 8 dole. Pri otáčkovej frekvencii 25 Hz je rozdiel v prenose energie kmitania 9 dB a pre sledovaný frekvenčný rozsah 200 Hz je rozdiel v prenose energie kmitania až 23,6 dB. Neutlmené kmitanie silentblokmi sa prenáša do železobetónového základu uloženia spaľovacieho motora a generátora a cez vibroizoláciu (korok) a podloží sa prenáša na okolité kotle a stavebné a technologické konštrukcie.

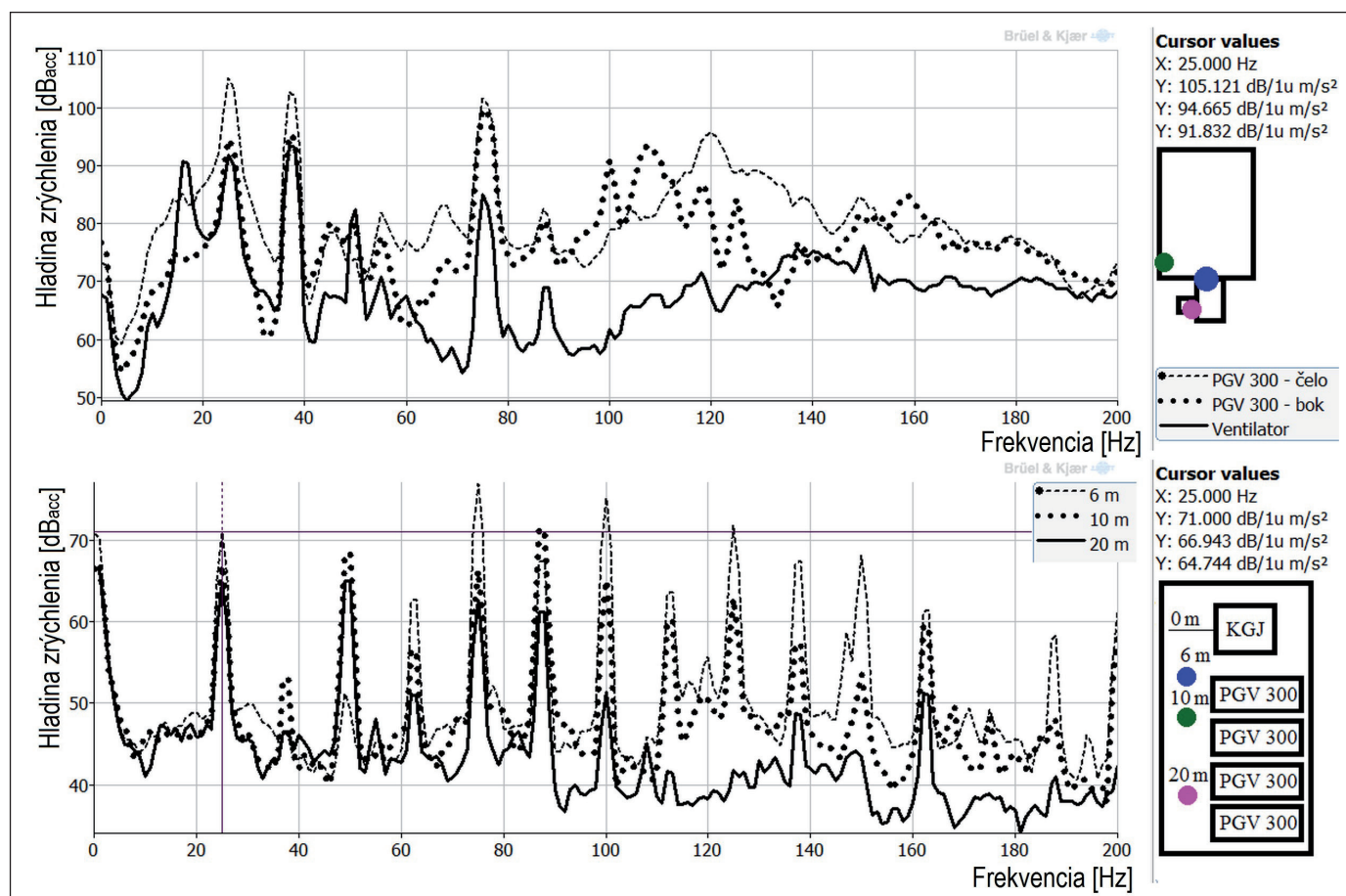
Výrazná otáčková frekvencia KGJ sa namerala na kotle vo vzdialenosti približne 8 m, čo je v blízkosti $\lambda/4$ tejto základnej otáčkovej frekvencie pri danom podloží (obr. 9 hore). Aj merania na podlahe kotolne ukázali nežiaduci prenos nízkofrekvenčného vlnenia podloží (obr. 9 dole). Podlozie pod kotolňou sú ílovité štrkopiesky (fluviálne sedimenty) a teda fázová rýchlosť priečného vlnenia pre toto podložie je približne 600 m/s, čiže $\lambda/4 \approx 6$ m a pre hustý betón je to 34 m. Toto nízkofrekvenčné vlnenie šíriace sa podloží, stavebnými a technologickými konštrukciami sa transformuje na nízkofrekvenčné akustické vlnenie (dunivý hluk), ktoré obťažuje obyvateľov blízkych rezidencií. Šírenie vibroakustického vlnenia do blízkeho okolia teda v rozhodujúcej miere ovplyvňuje okrem

technického stavu KGJ aj jej vibroizolácia, či už jej základov vzhľadom na okolité prostredie, ďalej jednotlivých mechanických častí KGJ vzhľadom na ich základy a spájanie jednotlivých častí KGJ medzi jednotlivými mechanickými sústavami [5, 21]. Frekvenčná analýza potvrdzuje, že vibroizolácia základu motora a generátora nie je dostatočná. Možno konštatovať, že nežiaduce nízkofrekvenčné vlnenie v kotolni a v chránenom priestore je spôsobené človekom, ktorý neodborným postupom ovplyvňuje zdravie a pohodlie iného človeka.

Frekvenčná analýza prenosu kmitania cez potrubnú sústavu KGJ

Iná cesta prenosu vibroakustickej energie analyzovaného nízkofrekvenčného vlnenia od agregátu KGJ je cez potrubnú sústavu chladiacej vody a výfukových plynov, ktoré vedú do výmenníkovej stanice KGJ (pozri obr. 6). Z frekvenčných spektier je zrejme, že prenos nízkofrekvenčného kmitania nie je zanedbateľný a môže negatívne vibroakusticky ovplyvňovať nielen okolie, ale aj samotnú výmenníkovú časť KGJ. Frekvenčné spektrum na obr. 10 hore charakterizuje prenos kmitania potrubnou sústavou chladiacej vody, kde amplitúdy NFV dosahujú výrazných a pre rekuperačnú časť nežiaducich hodnôt.

Analogicky aj nosný rám výfukového potrubia je dynamicky zaťažený od kmitania tohto potrubia (obr. 10 dole). Treba poznamenať, že rámy nosných konštrukcií sú vzájomne spojené, čím sa energia kmitania prenáša do celej výmenníkovej časti KGJ a kontaktných stavebných konštrukcií. Nadmerné dynamické namáhanie tejto výmenníkovej jednotky znižuje jej životnosť a spoľahlivosť a súčasne jej povrch generuje nízkofrekvenčný hluk šíriaci sa do okolitého prostredia kotolne a cez technologické otvory aj do blízkych akusticky chránených priestorov. Tak ako v iných meracích miestach, aj v tomto meracom bode dominuje otáčko-



Obr. 9 Prenos energie kmitania cez podložie na kotle, stavebné a technologické konštrukcie

Fig. 9 Transfer of vibration energy through the boiler base, construction and technological structures

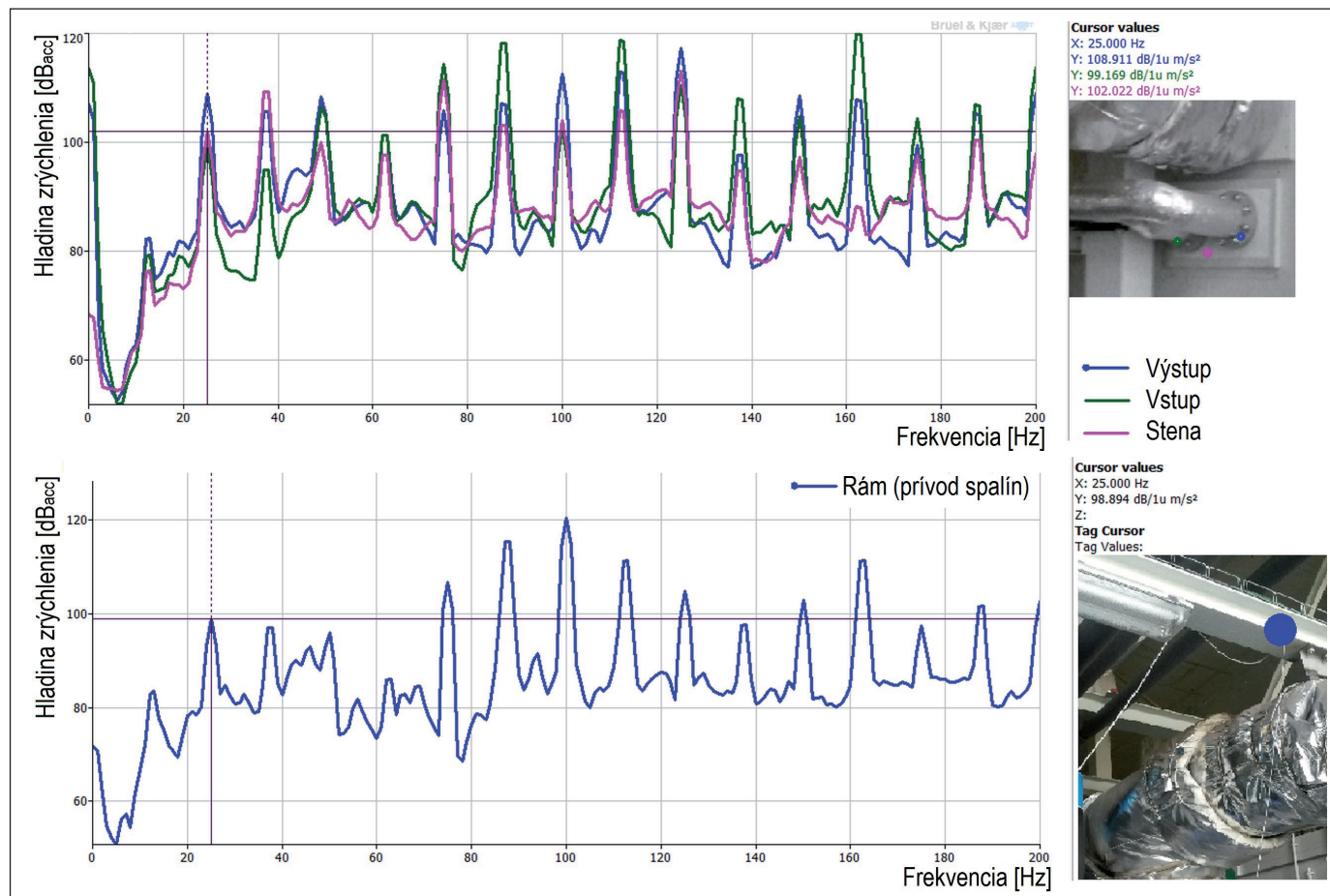
vá frekvencia a jej harmonické. Teda potrubie chladiacej vody a potrubie spalín nie sú dostatočne vibroizolované od spaľovacieho motora KGJ a vibroakustická energia sa týmito potrubiami prenáša do výmenníkovej časti KGJ a tým aj do priestoru kotolne a následne do okolia kotolne.

Frekvenčná analýza kmitania na vlnovcovom kompenzátore

Predpokladá sa, že vlnovcový kompenzátor sleduje len dilatáciu potrubnej sústavy a nie redukciu prenosu energie kmitania od zdroja do výmenníkovej sústavy KGJ. Pri danom zaradení tohto kompenzátora do potrubnej sústavy dochádza spravidla k zosilneniu energie kmitania. Ak má vlnovec splňať aj funkciu redukcie kmitania, je nevyhnutné

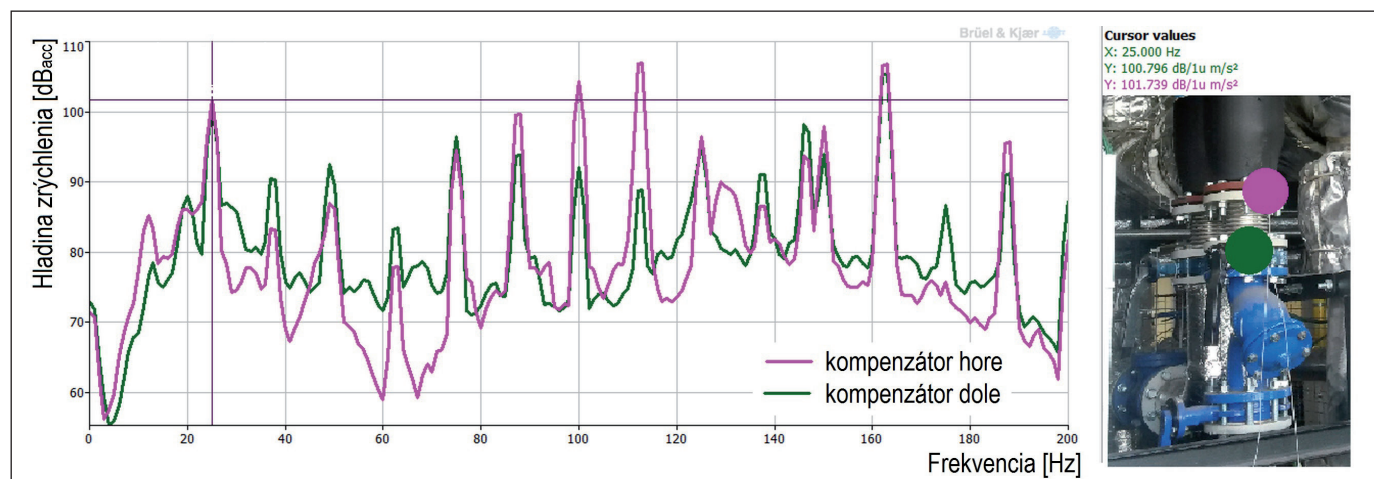
prírubby jeho vstupu a výstupu zabezpečiť vysokou dynamickou tuhosťou, čiže výchylka prírub sa má v ideálnom prípade rovnať nule [5, 19, 21]. V opačnom prípade vlnovec pôsobí ako generátor kmitania, teda vstupné kmitanie sa na výstupe zosilňuje, čo potvrdzujú aj frekvenčné spektrá na obr. 11.

Záverom treba povedať, že frekvenčná analýza kmitania potrubných sústav KGJ, v oblasti nízkych frekvencií, ukazuje na ich relatívne silné dynamické zaťaženie a teda aj dynamické zaťaženie výmenníkovej časti KGJ. Vychádzajúc z kvalitatívnej a kvantitatívnej analýzy KGJ stojí za zváženie vhodnými vibroizolačnými prvkami redukovať tok energie



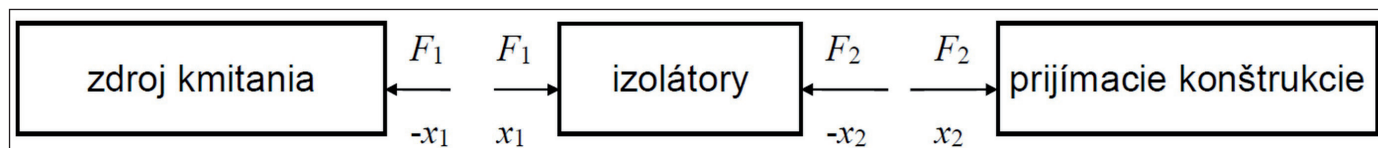
Obr. 10 Frekvenčná analýza na potrubnej sústave chladiacej vody (hore); frekvenčná analýza na ráme prívodu spalín do výmenníka (dole)

Fig. 10 Frequency analysis of cooling water pipe system (top); frequency analysis of frame of combustion gasses supply to the exchanger (bottom)



Obr. 11 Frekvenčná analýza na vlnovcovom kompenzátore teplej úžitkovej vody

Fig. 11 Frequency analysis of bellows compensator of domestic hot water



Obr. 12 Bloková schéma sústavy zdroj – izolátor – prijímač

Fig. 12 Block diagram of the source – insulator – receiver system

kmitania potrubnými sústavami do výmenníkovej časti KGJ. Teda vstup a výstup tohto prvku musí byť fixovaný vzhľadom na konštrukciu vysokej dynamickej tuhosti.

ZÁVER A OPATRENIA

Vykonala sa frekvenčná analýza prenosu kmitania od motora KGJ do okolitého prostredia vrátane jej rekuperačnej časti. Vibroakustické merania naznačujú, že od hlavného zdroja vibroakustickej energie (agregát KGJ) sa výrazná časť tejto energie dostáva do okolitého prostredia, a to v dôsledku nedostatočnej vibroakustickej izolácie. Potvrdzuje to aj výrazný rozdiel prenosu vibroakustickej energie cez náhodne analyzované dva rovnaké silentbloky a cez potrubnú sústavu KGJ. Neefektívnu vibroizoláciu základu motora od stavebnej konštrukcie a podlažia dokumentuje aj nežiaduci prenos nízkofrekvenčného kmitania na neďalekú kotlovú jednotku a na podlahu haly kotolne. Zvlášť výrazný je prenos nízkofrekvenčného vlnenia pri otáčkovej frekvencii, ktoré nielenže zvyšuje dynamické namáhanie samotnej strojovej sústavy a blízkych okolitých konštrukcií, ale sa aj transformuje na nežiaduce akustické vlnenie a v neďalekých akusticky chránených priestoroch pôsobí negatívne na zdravie a pohodlie človeka [1, 2, 7, 16].

Treba konštatovať, že frekvenčná analýza kmitania potrubných sústav KGJ, v oblasti nízkych frekvencií, ukazuje na ich relatívne silné dynamické zaťaženie a teda aj dynamické zaťaženie výmenníkovej časti KGJ. Pri redukcii kmitania šíriaceho sa potrubím stojí za zváženie zaradiť do týchto potrubných sústav vhodné vibroizolačné prvky rešpektujúc závery všeobecne platnej teórie [5, 19, 21]. Znamená to, že v každom spojení medzi zdrojom a izolátorom a medzi izolátorom a prijímačom (obr. 12) sa predpokladá bodový kontakt a blokovaná prenosová tuhosť $k_{2,1}$, čiže pre pomer medzi silou na blokovanej strane a výchylkou na budenej strane musí platiť (platí to aj opačne):

$$k_{2,1} = \frac{F_{2,\text{blocking}}}{x_1} \Big|_{x_1 \approx 0}$$

Inými slovami, akékoľvek izolátory kmitania sú účinné len medzi konštrukciami relatívne veľkej dynamickej tuhosti na oboch stranách izolátora. Teda opatrenia treba vidieť v rešpektovaní základov teórie vibroizolácie a hlukoizolácie [5]. Takto sa vyhneme sťažnostiam dotknutých osôb a my budeme mať pocit dobre vykonanej práce.

Kontakt na autory: stanislav.ziaran@stuba.sk, Ondrej.Chlebo@stuba.sk, milos.musil@stuba.sk



Európska únia
Európsky fond regionálneho rozvoja



Podakovanie: Článok je publikovaný s podporou Vedeckej grantovej agentúry VEGA 1/0544/16 a 1/0742/15. Tento projekt bol vytvorený za pomoci výsledkov projektu „Zvyšovanie bezpečnosti jadrovej energetických zariadení pri seizmickej udalosti“ (ITMS kód Projektu: 26220220171), na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Metodika a meracie prístroje zakúpené z tohto projektu sa využili v aplikovanom výskume aj vo verejnom a mimovládnom sektore, čoho dôkazom je tento výstup.

Literatúra:

- [1] ARGALASOVA, L., LEKAVICIUTE, J., JERAM, S., SEVCIKOVA, L., JURKOVIČOVA, J. Environmental Noise and Cardiovascular Disease in Adults: Research in Central, Eastern and South-Eastern Europe and Newly Independent States. *Noise Health*. 2013, 62:22-31.
- [2] BALAZIKOVA, M., SINAY, J. Implementation of Auditory and Non-auditory Effects of Noise in the Risk Assessment Process in Mechanical Engineering [online]. *Procedia Engineering*. 2012, No. 48, p. 621-628. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/18777058/48>
- [3] DARULA, R., ŽIARAN, S. Noise Exposition in Protected Rooms at Faculty of Mechanical Engineering Slovak University of Technology. In: *13th International conference Mechanical Engineering*. Bratislava: 2010, 30-37.
- [4] IZRAEL, G., BUKOVECZKY, J., GULAN, L. Influence of nonstandard loads onto life of chosen modules of mobile working machines. *Machine Design*. 2011, č. 3 (1), s. 13-16.
- [5] ŽIARAN, S. *Kmitanie a akustika. Znižovanie kmitania a hluku v priemysle*. Monografia. Vyd. STU Bratislava 2006.
- [6] ŽIARAN, S. Redukcia obťažujúceho nízkofrekvenčného hluku kotlových sústav. In: *Vykurovanie 2008. Zborník prednášok zo 16. medz. konferencie*. Tatranské Matliare 2008, s. 109-112.
- [7] ŽIARAN, S. *Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom*. STU Bratislava, 2008.
- [8] ŽIARAN, S. Prenos hluku z kotolní do chráneného priestoru a jeho redukcia. In: *Vykurovanie 2009. Zborník prednášok zo 17. medz. konferencie*. Tatranské Matliare 2009, s. 109-113.
- [9] ŽIARAN, S. Analysis of Annoying Low Frequency Noise Boiler-rooms, In: *InterNoise2009*. Ottawa/Canada.
- [10] ŽIARAN, S. Vibro- and Sound-isolation of the Low-frequency Noise of the Building Equipment. In: *InterNoise2010*. Lisbon/Portugal, 3263-3272(10).
- [11] ŽIARAN, S. Effects of Low-frequency Noise in Closed Space on the Human. In: *InterNoise2011*. Osaka/Japan.
- [12] ŽIARAN, S. Potential Health Effects of Standing Waves Generated by Low Frequency Noise. *Noise Health*. 2013, č. 15, s.237-45.
- [13] ŽIARAN, S. Low Frequency Vibration and Noise Generated by Seismic Sources and their Effects on Surroundings. In: *InterNoise2013*. Innsbruck/Austria.
- [14] ŽIARAN, S. *Technická diagnostika*. Monografia. Nakladateľstvo STU Bratislava. 2013, str. 332.
- [15] ŽIARAN, S. Nízkofrekvenčné vlnenie generované kotlovými sústavami. In: *Vykurovanie 2015. Recenzovaný zborník z 23. vedeckej konferencie*. Stará Ľubovňa, s. 119-125.
- [16] ŽIARAN, S. *Nízkofrekvenčný hluk a kmitanie*. Monografia. STU Bratislava. 2016, str. 316.
- [17] ŽIARAN, S., CHLEBO, O. Príčiny nežiaduceho kmitania a hluku kotlov a kogeneračných jednotiek vo výhrevniach. Časť 1: Prenos kmitania uložením. In: *Vykurovanie 2016. Zborník z 24. vedeckej konferencie*. Stará Ľubovňa, s. 125-129.
- [18] ŽIARAN, S., CHLEBO, O. Príčiny nežiaduceho kmitania a hluku kotlov a kogeneračných jednotiek vo výhrevniach. Časť 2: Prenos kmitania potrubnou sústavou. In: *Vykurovanie 2017. Zborník z 25. vedeckej konferencie*. Podbanské, s. 171-178.
- [19] ISO 10846-1:1998. Acoustics and Vibration. Laboratory Measurement of Vibro-acoustic Transfer Properties of Resilient Elements. Part 1: Principles and Guidelines.
- [20] ISO 5348. Mechanical vibration and shocks. Mechanical mounting of accelerometers.
- [21] ŽIARAN, S., CHLEBO, O. Noise Control Transmission Methods of the Combustion Engine by Means of Reduction of the Vibration. *Archives of Acoustics*. 2016, Vol. 41, No.2, pp. 277-2840.