



Pracoviště:Regionální inovační centrum elektronikyVýzkumná zpráva č.:22190-053-2015

Lokalizace zdrojů hluku dílčích prvků transformátoru

Řešitelé:	Martin Sýkora, Martin Schlosser, Jan Karel, Oldřich Tureček, Michal Svoboda
Počet stran:	60
Datum vydání:	prosinec 2015
Revize:	2
	Tento projekt byl realizován z podpory státního rozpoč-
	tu prostřednictvím Technologické agentury České re-
	publiky – projekt č. TA04021700.

Obsah

1	Ú٧	/OD			•••••				2
2	TE TR	STOV ANSF	′ÁNÍ FORMA	VLIVU ÁTORU	MECHANIC	KÉHO	TLUMENÍ	NÁDOBY	2
2	2.1	Lokal	izace z	drojů hluku –	mapování akustic	ké intenzi	ty		3
-	2.2	Výpo	čet aku	stického výko	nu				3
-	2.3	Určer	ní celko	vého akustick	ého výkonu trans	formátoru			4
4	2.4	Podm	ínky m	eření					5
	2.5	Použi	té vyba	avení					5
	2.6	Výsle	dky – v	výpočty akusti	ckého výkonu				5
2	2.7	Výsle	dky – a	akustický výko	on jednotlivých st	ran transfo	ormátoru		6
2	2.8	Výsle	dky – a	akustický výko	on celého transfor	mátoru			7
	2.9	Zhodi	nocení	vlivu přídavné	ho mechanického) tlumení 1	nádoby		9
3	LO	KALI	ZACE	ZDROJŮ HL	UKU SAMOTNÉ	EHO JÁDI	RA TRANSFOR	MÁTORU	. 10
	3.1	Fotod	lokume	ntace – měřen	í samotného jádra	l			. 10
	3.2	Budic	cí vinut	í – parametry .					. 11
	3.3	Měřic	rí meto	da					. 11
	3.4	Měřic	cí síť –	jádro transfori	nátoru				. 12
	3.5	Podm	ínky m	ěření a použit	é vybavení				. 13
	3.6	Použi	té vyba	vení	-				. 13
	3.7	Vypo	čtený a	kustický výko	n				. 13
	3.8	Meto	da výpo	očtu akustické	no výkonu				. 14
	3.9	Měřic	rí ploch	y jednotlivých	stran jádra trans	formátoru			. 14
	3.10	Vypo	čtený a	kustický výko	n – kostra na pod	ložkách			. 15
	3.11	Vypo	čtený a	kustický výko	n – kostra zavěše	ná			. 16
4	MÌ	ÉŘENÍ	Í VIBR	ACÍ - URČEN	IÍ TVARŮ KMIT	TŮ JÁDRA	4		. 17
2	4.1	Exper	rimentá	ilní modální ar	alýza jádra transf	formátoru			. 17
	4.1	.1 I	Použité	vybavení					. 18
	4.1	.2 N	Model	jádra transforn	nátoru				. 19
	4.1 4.1	.5 h A I	KOZlOZ(dentifi	eni vlastnich fi	ekvenci h parametrů			••••••	20
	+.1 1 2	Prove	vzní mo	vdální analýza	iádra měření las	serovým v	ibrometrem	••••••	. 21
_	4.2	.1 \	Výsledl	kv měření vvb	uzených tvarů km	itů laserov	vým vibrometren	1	
	4.2	.2 N	Měření	vibrací - shrnu	ıtí				. 33
5	ZÁ	VĚR.							. 37
6	LĽ	ΓERA	TURA						. 38
PĚ	ŔÍL(TI	OHA 1 UME1	l : ROZ NÍ	LOŽENÍ ZDF	COJŮ HLUKU - 1	NÁDOBA	TRANSFORM	ÁTORU BEZ	2 39
PĚ	λÍL(ΤΙ	OHA (2: RO2 NÍM	zložení zd	ROJŮ HLUKU	- NÁDOI	BA TRANSFOR	MÁTORU S	45
PĚ	ŔĺL	OHA 3	B: JÁD	RO TRANSFO	ORMÁTORU S U	JLOŽENÍ	M		

1 Úvod

V rámci řešení projektu TAČR TA04021700 "Snížení hlučnosti silových transformátorů a jejich negativního dopadu na životní prostředí" probíhá ve firmě ETD Transformátory a.s. vývoj nízkohlučného transformátoru. Na ZČU v Plzni byla realizována měřicí metoda, která kromě stanovení hlučnosti transformátoru umožňuje i lokalizovat jeho nejhlučnější části.

Tato zpráva se zabývá měřením hlučnosti a lokalizací zdrojů hluku dílčích prvků, které byly průběžně vyvíjeny a zkoumány v rámci vývoje nízkohlučného transformátoru. Pro měření byla použita metoda, která je popsána ve výzkumné zprávě [1] a která hodnotí hlučnost transformátoru v souladu s běžně používanými normami [2] a [3].

Byly testovány tyto prvky transformátoru:

- Mechanické tlumení nádoby transformátoru.
- Konstrukce jádra včetně způsobu mechanického uložení.

2 Testování vlivu mechanického tlumení nádoby transformátoru

Jako mechanické tlumení byla testována přídavná vrstva polyuretanové pěny, která byla aplikována na povrch transformátorové nádoby. Byly použity dva druhy pěny. Pěna byla aplikována na všechny svislé stěny transformátorové nádoby. Vzhledem k použití dvou druhů pěny současně byla tato aplikována tak, že každý druh byl nanesen na kratší stěnu (přední/zadní) a rozhraní mezi použitými materiály (pěnami) tak vzniklo zhruba uprostřed obou bočních stěn. Toto rozhraní je patrné na následující fotografii.



Obr. 1: Mechanické tlumení nádoby nástřikem pěny.

2.1 Lokalizace zdrojů hluku – mapování akustické intenzity

Měření bylo provedeno jako mapování akustické intenzity v bodech, podrobnosti jsou uvedené v [1]. Z těchto hodnot byl postupně stanoven akustický výkon jednotlivých stěn pro stav s pěnou a bez ní. Dále bylo provedeno měření intenzity v několika bodech podél bočních stěn, aby bylo možné určit výkon celého transformátoru v souladu s normou [2] a [3].

Mapování akustické intenzity bylo provedeno v diskrétních bodech s pevným rastrem 30 cm x 30 cm, ve vzdálenosti 30 cm od myšlené hrany nádoby transformátoru. Rastr 30 cm x 30 cm byl zvolen jako kompromis mezi únosným počtem bodů (desítky bodů na jedné stěně) a tudíž časovou náročností měření, resp. jeho proveditelností za daných podmínek na straně jedné a dostatečnou jemností pro rozlišení jednotlivých zdrojů zvuku na straně druhé. Volba rastru tak zůstává stejná jako pro ostatní podobná měření realizovaná na výkonových transformátorech, jak je popsáno v [1].

Frekvenční rozsah měření je omezen použitou intenzitní sondou. Frekvenční rozsah použité sondy s 12 mm distanční vložkou je 100 Hz až 5 kHz. Vzhledem k tomu, že charakter hluku transformátoru má poměrně specifické frekvenční spektrum, byl frekvenční rozsah mapování z praktických důvodů dále zúžen na třetinooktávová pásma v rozsahu 100 Hz až 1 kHz. Volba frekvenčního rozsahu měření taktéž vychází ze zkušeností získaných při podobných měřeních na výkonových transformátorech, jak je blíže popsáno ve zprávě [1].

Mapy rozložení zdrojů hluku na nádobě bez tlumení jsou uvedené v Příloze 1, na zatlumené nádobě pak v Příloze 2.

2.2 Výpočet akustického výkonu

Pro stanovení akustického výkonu byla využita data naměřená při mapování akustické intenzity. Celkový akustický výkon byl určen z příspěvku jednotlivých třetinooktávových pásem ve zvoleném frekvenčním rozsahu. Akustický výkon byl určován pro příslušné stěny jak s pěnou, tak bez pěny. Při mapování akustické intenzity v bodech je akustický výkon $W = \oiint \vec{I} d\vec{S}$ mož-

né určit přímým měřením akustické intenzity v konečném počtu bodů, takže $W = \sum_{i=1}^{N} I_i \cdot S_i$,

kde I_i jsou hodnoty akustické intenzity určené na ploše stěny S_i , Výsledná hladina je pak určena $L_{W,A} = 10.\log \frac{W}{W_{ref}}$ [*dB*] s použitím váhového filtru A, kde $W_{ref} = 10^{-12}$ W.

Plocha stěny vychází z rozměru nádoby a byla stanovena na $S = 6,3 \text{ m}^2$.

2.3 Určení celkového akustického výkonu transformátoru

Určení akustického výkonu celého transformátoru vychází z doporučení norem [2] a [3]. Tento způsob určení akustického výkonu předpokládá měření akustické intenzity v bodech po měřicí linii kolem zkoušeného transformátoru. Výška měřicí linie se předpokládá uprostřed výšky transformátorové nádoby. Vzdálenost jednotlivých bodů na měřicí linii mezi sebou nesmí být větší než 1 m. Z naměřených intenzit v bodech se stanoví průměrná akustická intenzita podél měřicí linie podle vztahu:

$$L_{IA} = 10 \cdot log\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} sign(L_{i,f}) \cdot 10^{0,1 \cdot |L_{IAi}|}\right)$$

Kde *L_{IA}* je průměrná hladina akustické intenzity podél měřicí linie

N je počet měřicích bodů

Délka měřicí linie byla z rozměru transformátorové nádoby stanovena I = 11,9 m. Počet bodů byl zvolen N = 14. Na kratších stěnách transformátorové nádoby byly využity body naměřené již při mapování akustické intenzity (na každé stěně 3 body v polovině výšky transformátorové nádoby). Na delších stranách byly pro tento účel změřeny navíc další body. Vždy 4 body na každé delší stěně, uprostřed výšky transformátorové nádoby. Zvolený počet bodů a jejich rozmístění tak splňují požadavek normy na minimální počet bodů a jejich vzájemnou vzdálenost. Obklopující plocha pro výpočet akustického výkonu se stanoví podle vztahu:

$$S = 1,25 \cdot h \cdot l_m$$

Kde **S** je obepínající plocha

 I_m je délka měřicí linie

h je výška nádoby transformátoru

Při výšce transformátorové nádoby h = 2,5m, pak vychází obklopující plocha $S = 36,5 \text{ m}^2$.

Následně lze z obklopující plochy a vypočtené průměrné intenzity stanovit akustický výkon podle vztahu:

$$L_{WA} = L_{IA} + 10 \cdot \log \frac{S}{S_0}$$

Kde S_0 je referenční plocha (1 m²)

2.4 Podmínky měření

Měření bylo provedeno ve zkušebně společnosti ETD Transformátory. Z důvodů zajištění přijatelné nízkého hlukového pozadí bylo prováděno vždy v noci, mimo provozní dobu vý-robní části firmy. Měření stavu s pěnou bylo provedeno 27.8.2015, měření bez pěny potom 31.8.2015.

2.5 Použité vybavení

- Zvukoměr B&K 2260, výr. č. 2426360, se softwarem pro měření akustické intenzity BZ7205 verze 2.1
- Intenzitní sonda B&K 3599, výr. č. 2344797 (2 x mikrofon 4197, výr. č. 2225984)
- Laserový dálkoměr BOSCH DLE70, výr. č. 101952931
- Kalibrátor intenzitní sondy B & K 4297, výr. č. 2378506
- Teploměr, vlhkoměr Omega HH311, výr. č. 050202152
- Barometr Greisinger GTH 1100

2.6 Výsledky – výpočty akustického výkonu

V této kapitole jsou uvedeny vypočtené hodnoty akustického výkonu v jednotlivých frekvenčních pásmech pro každou stěnu. Jsou uvedeny hodnoty jak pro stav bez pěny tak s pěnou. Pokud v nějakém pásmu není hodnota uvedena, vychází v tomto pásmu výkon záporný.

Dále jsou uvedeny hodnoty určeného akustického výkonu v jednotlivých pásmech pro celý transformátor, opět jak pro situaci s pěnou, tak i bez pěny.

Poslední součástí vyhodnocení je potom grafické porovnání stavů s pěnou a bez pěny pro oba druhy pěny (obě stěny) a porovnání stavu s pěnou a bez pěny pro celý transformátor.

2.7 Výsledky – akustický výkon jednotlivých stran transformátoru

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	50,8	500 Hz	54,8
125 Hz	34,6	630 Hz	61,2
160 Hz	41,6	800 Hz	54,7
200 Hz	64,7	1,00 kHz	58,1
250 Hz	49,0	1,25 kHz	54,9
315 Hz	59,8	1,60 kHz	45,5
400 Hz	55,9	2,00 kHz	30,7

Tab. 1: Stěna 1 – bez tlumení.

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A,S1}= 68,7 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,T} [dB]
100 Hz	52,3	500 Hz	52,9
125 Hz	35,5	630 Hz	59,8
160 Hz	42,3	800 Hz	51,8
200 Hz	64,6	1,00 kHz	56,4
250 Hz	51,0	1,25 kHz	51,7
315 Hz	63,3	1,60 kHz	40,4
400 Hz	59,5	2,00 kHz	

Tab. 2: Stěna 1 – tlumení pěnou.

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A,S1}= 69,1 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	55,7	500 Hz	56 <i>,</i> 5
125 Hz	39,1	630 Hz	61,8
160 Hz	40,2	800 Hz	54,4
200 Hz	63,1	1,00 kHz	57,3
250 Hz	48,2	1,25 kHz	56,0
315 Hz	59,6	1,60 kHz	45,2
400 Hz	54,1	2,00 kHz	30,5

Tab. 3: Stěna 2 – bez tlumení.

Celkový výkon – stěna 2 L_{W,A,S2}= 68,4 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	54,8	500 Hz	55,3
125 Hz	38,0	630 Hz	64,0
160 Hz	38,0	800 Hz	54,9
200 Hz	59,7	1,00 kHz	54,2
250 Hz	48,8	1,25 kHz	53,2
315 Hz	63,0	1,60 kHz	44,9
400 Hz	55,6	2,00 kHz	26,1

Tab. 4: Stěna 2 – tlumení pěnou.

Celkový výkon – stěna 2 L_{W,A,S2}= 68,7 dB

2.8 Výsledky – akustický výkon celého transformátoru

Pásmo	L _{,т} [dB]	Pásmo	L _{,T} [dB]
100 Hz	59,7	500 Hz	62,9
125 Hz	43,2	630 Hz	73,5
160 Hz	50,7	800 Hz	61,8
200 Hz	73,8	1,00 kHz	63,1
250 Hz	58,4	1,25 kHz	64,4
315 Hz	69,5	1,60 kHz	54,6
400 Hz	60,5	2,00 kHz	40,1

Tab. 5: Hladina akustického výkonu celého transformátoru – bez tlumení.

Celkový výkon bez pěny *L_{W,A}*= 78,3 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,T} [dB]
100 Hz	59,6	500 Hz	65,1
125 Hz	42,7	630 Hz	75,5
160 Hz	50,1	800 Hz	63,5
200 Hz	72,8	1,00 kHz	61,4
250 Hz	61,5	1,25 kHz	57,7
315 Hz	75,7	1,60 kHz	49,5
400 Hz	61,7	2,00 kHz	-

Tab. 6: Hladina akustického výkonu celého transformátoru tlumení pěnou.



Celkový výkon s pěnou L_{W,A}= 80,1 dB





Obr. 3: Porovnání akustického výkonu - stěna 2.



Obr. 4: Porovnání akustického výkonu - celé trafo

2.9 Zhodnocení vlivu přídavného mechanického tlumení nádoby

Provedená měření bohužel neprokazují významný účinek tohoto řešení. Rozdíly naměřených hodnot pro stav s pěnou a bez pěny jsou minimální, v některých pásmech vychází dokonce akustický výkon vyšší s aplikovanou pěnou, než bez ní. Tyto rozdíly mohou být způsobeny nejistotou měření. Pro účinné tlumení by musel být použitý materiál, který by svojí hmotností významně zvýšil i hmotnost celého transformátoru.

3 Lokalizace zdrojů hluku samotného jádra transformátoru

V této části zprávy je popsáno mapování akustické intenzity samotného jádra transformátoru. To byla pro účely měření upraveno. Pro mechanické vybuzení bylo jádro vybaveno dočasným pomocným vinutím. Uspořádání je zřejmé z fotodokumentace. Na každém sloupku jádra je navinuto 10 závitů. Jednotlivé sekce vinutí jsou zapojeny do trojúhelníka.

Měřicí metoda je v tomto případě obdobná jako při mapování celého transformátoru. Zůstal stejný jak frekvenční rozsah (100 Hz až 1 kHz), tak rozteč mezi měřicími body (rastr 30 x 30 cm). Mapy rozložení zdrojů hluku jádra transformátoru jsou uvedené v Příloze 3.

3.1 Fotodokumentace – měření samotného jádra

Obr. 5: Uspořádání pomocného vinutí na jádru transformátoru.



Obr. 6: Játro transformátoru.

3.2 Budicí vinutí – parametry

- Počet závitů: 10 na každém sloupku kostry
- Zapojení vinutí: Trojúhelník
- Parametry budicího proudu
 - \circ f = 50 Hz
 - \circ U_f = 544 V
 - o I_f = 24 A

3.3 Měřicí metoda

Měřicí metoda mapování akustické intenzity je podobná jako v případě měření celého transformátoru. Byl zachován rastr měřicí sítě (30 cm x 30 cm) a vzdálenost od myšlené vnější hrany objektu (30 cm). Rovněž byl zachován frekvenční rozsah měření.

Počet měřicích bodů je při zvoleném rastru i v tomto případě značný a to i přes to, že rozměry samotné kostry jsou samozřejmě menší než rozměry celého transformátoru. Proto bylo zavedeno určité zjednodušení, kdy se těleso kostry považuje za osově symetrické a bylo provedeno pouze mapování jedné podélné strany a jedné příčné strany. Navíc byl v tomto případě proveden experiment ohledně vlivu umístění kostry, resp. celého transformátoru při měření. Objevilo se podezření, že použité tlumící pryžové bloky podložené pod kostru transformátoru nedostatečně tlumí. V důsledku nedostatečného tlumení pak dochází k přenosu vibrací z kostry či transformátoru do podlahy. Podlaha potom může za jistých okolností působit jako další zdroj zvuku, který ovlivňuje prováděné měření.

Proto byl proveden experiment, kdy jednou bylo provedeno měření a mapování akustické intenzity ve standardním uspořádání, kdy kostra stála na zmiňovaných pryžových blocích a podruhé byla kostra volně zavěšena na portálovém jeřábu. Výška zavěšení byla zvolena tak, aby výška kostry nad podlahou byla stejná jako v prvním případě a bylo možné aplikovat stejný měřicí rastr. Takto bylo zajištěno přerušení eventuálního přenosu vibrací z provozovaného transformátoru (resp. kostry) do podlahy.

3.4 Měřicí síť – jádro transformátoru

Na následujících obrázcích je znázorněna měřicí síť mapování akustické intenzity pro samotnou kostru. Měřicí síť je znázorněna jako červené tečky ve výkresech.



Obr. 7: Měřicí síť - delší stěna kostry.



Obr. 8: Měřicí síť - kratší stěna kostry.

3.5 Podmínky měření a použité vybavení

Měření bylo provedeno ve zkušebně firmy ETD Transformátory. Z důvodu omezení vlivu hlukového pozadí bylo měření provedeno v noci, tedy mimo provoz výrobní části firmy.

3.6 Použité vybavení

- Zvukoměr B&K 2260, výr. č. 2426360, se softwarem pro měření akustické intenzity BZ7205 verze 2.1
- Intenzitní sonda B&K 3599, výr. č. 2344797 (2 x mikrofon 4197, výr. č. 2225984)
- Laserový dálkoměr BOSCH DLE70, výr. č. 101952931
- Kalibrátor intenzitní sondy B & K 4297, výr. č. 2378506
- Teploměr, vlhkoměr Omega HH311, výr. č. 050202152
- Barometr Greisinger GTH 1100

3.7 Vypočtený akustický výkon

Mapy akustické intenzity dávají určitý přehled o rozložení vyzařované akustické energie v jednotlivých místech, avšak pro přesnější porovnání např. jednotlivých stěn je vhodnější vyjádření pomocí čísel. Proto byl počítán akustický výkon v jednotlivých pásmech pro jednot-

livé stěny obklopující plochy. Určení akustického výkonu transformátoru je detailně rozebráno ve zprávě [1] a vychází z příslušných norem [2], [3] a [4].

3.8 Metoda výpočtu akustického výkonu

Pro stanovení akustického výkonu byla využita data naměřená při mapování akustické intenzity. Celkový akustický výkon byl určen z příspěvku jednotlivých třetinooktávových pásem ve zvoleném frekvenčním rozsahu. Akustický výkon byl určován po jednotlivých stěnách. Vždy byla určena průměrná intenzita v jednotlivých pásmech přes jednu stěnu:

$$L_{lavg,f} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} sign(L_{i,f}) \cdot 10^{0,1 \cdot |L_{i,f}|}\right)$$

Kde $L_{lavg,f}$ je průměrná hladina intenzity v daném frekvenčním pásmu $L_{i,f}$ je hladina intenzity v daném pásmu pro daný konkrétní bod N je počet bodů

Jednotlivé dílčí plochy stěn vychází, z celkové kvádrové obepínající plochy, tj. pro každou stěnu vychází obdélníková plocha daná rozměry jádra transformátoru.

3.9 Měřicí plochy jednotlivých stran jádra transformátoru

Vzhledem k osové symetrii kostry a časové náročnosti měření bylo mapování kostry provedeno pouze pro jednu kratší a jednu delší stěnu myšleného kvádru obklopující plochy. Pro výpočet celkového výkonu jsou proto tyto plochy násobeny dvěma. Celková vyzařovací plocha je potom násobena opět koeficientem 1,25 pro zohlednění vyzařování horní stranou.

Plocha kratší stěny (stěna 1)

*S*₁= 3,24 m2

Plocha delší stěny (stěna 2)

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,T} [dB]
100 Hz	49,7	500 Hz	52,4
125 Hz	33,1	630 Hz	59,9
160 Hz	36,9	800 Hz	54,1
200 Hz	60,4	1,00 kHz	52,8
250 Hz	50,3	1,25 kHz	47,1
315 Hz	65,2	1,60 kHz	40,8
400 Hz	54,9	2,00 kHz	31,9

3.10 Vypočtený akustický výkon – kostra na podložkách

Tab. 7: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – kratší stěna.

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A,S1}= 62,8 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	48,7	500 Hz	58,7
125 Hz	31,9	630 Hz	66,7
160 Hz	34,2	800 Hz	59,6
200 Hz	58,7	1,00 kHz	56,0
250 Hz	52,9	1,25 kHz	48,7
315 Hz	68,2	1,60 kHz	43,3
400 Hz	59,2	2,00 kHz	36,1

Tab. 8: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech - delší stěna.

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A,S2}= 71,9 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	56,2	500 Hz	63,6
125 Hz	39,5	630 Hz	71,5
160 Hz	42,8	800 Hz	64,6
200 Hz	66,6	1,00 kHz	61,7
250 Hz	58,8	1,25 kHz	55,0
315 Hz	74,0	1,60 kHz	49,3
400 Hz	64,5	2,00 kHz	41,5

Tab. 8: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – celkový akustický výkon.

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A}= 77,4 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	50,2	500 Hz	51,8
125 Hz	33,5	630 Hz	60,4
160 Hz	36,9	800 Hz	57,3
200 Hz	60,2	1,00 kHz	54,8
250 Hz	50,4	1,25 kHz	47,3
315 Hz	65,3	1,60 kHz	41,3
400 Hz	54,6	2,00 kHz	32,1

3.11 Vypočtený akustický výkon – kostra zavěšená

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A,S1}= 68,5 dB

Pásmo	L _{,т} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	51,3	500 Hz	58,7
125 Hz	34,6	630 Hz	67,1
160 Hz	36,8	800 Hz	60,2
200 Hz	60,4	1,00 kHz	57,1
250 Hz	53,7	1,25 kHz	49,8
315 Hz	69,0	1,60 kHz	46,4
400 Hz	59,7	2,00 kHz	36,7

Tab. 10: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech - delší stěna.

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A,S2}=72,5 dB

Pásmo	L _{,T} [dB]	Pásmo	L _{,т} [dB]
100 Hz	57,8	500 Hz	63,5
125 Hz	41,1	630 Hz	71,9
160 Hz	43,8	800 Hz	66,0
200 Hz	67,3	1,00 kHz	63,1
250 Hz	59,4	1,25 kHz	55,7
315 Hz	74,5	1,60 kHz	51,6
400 Hz	64,9	2,00 kHz	41,9

Tab. 11: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – celkový akustický výkon.

Tab. 9: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – kratší stěna.

Celkový výkon – stěna 1 L_{W,A}=78 dB

4 Měření vibrací - určení tvarů kmitů jádra

Pro určení tvarů kmitů byla provedena jednak experimentální modální analýza jádra jednak zavěšeného, jednak umístěného na pryžových podložkách. Dále byla provedena provozní modální analýza tvarů kmitů jádra nabuzeného pomocným vinutím (viz. kapitola 3).

4.1 Experimentální modální analýza jádra transformátoru

Zkoušené jádro transformátoru bylo usazeno na zemi na měkkých pryžových podložkách, podložky byly umístěny pod krajními patkami jádra.



Obr. 9: Měřené jádro transformátoru



Obr. 10: Uložení jádra na pryžových podložkách

Na měřeném jádru byla vyznačena síť bodů, viz. obr. 11. Do referenčního bodu číslo dva byl připevněn snímač vibrací. Jádro bylo postupně buzeno údery velkého modálního kladiva (s hmotností hlavice 1,5 kg) ve všech 55 měřených bodech. Odezvy na buzení byly měřeny snímačem vibrací v referenčním bodě č. 2. Z naměřených FFT spekter jsou vypočítané frekvenční přenosové funkce FRF H1. Tyto data byla importována do programu pro modální analýzu MeScope VES, kde byl vytvořen model měřeného jádra a provedena identifikace vlastních frekvencí, příslušných tvarů kmitu a modálního tlumení.



Obr. 11: Vyznačená síť měřených bodů, referenční bod č. 2 (vlevo dole, červený bod).

4.1.1 Použité vybavení

- Analyzátor B&K Pulse 3560C
- Software pro modální analýzu MeScope
- Modální kladivo Kistler, typ 9728

4.1.2 Model jádra transformátoru

V programu MeScope VES byl vytvořen model jádra, obr. 12, obr. 13.



Obr. 12: Model jádra transformátoru, červená šipka vyznačuje směr buzení jádra.



Obr. 13: Model jádra transformátoru – řezy.

4.1.3 Rozložení vlastních frekvencí

Frekvenční přenosové funkce H1 (Frequency response function, FRF H1) jsou na obr. 14 a 15. Následně byla provedena identifikace modálních parametrů. Identifikace byla provedena na vybraných základních tvarech, vyšší tvary nebyly vybuzeny.



Obr. 14: Naměřené odezvy - Frekvenční přenosové funkce H1



Obr. 15: Naměřené odezvy - Frekvenční přenosové funkce H1, detail oblasti do 100 Hz.

4.1.4 Identifikace modálních parametrů

Tvar číslo	Frekvence [Hz]	Útlum [%]
1	7,5	19,7
2	12,6	2,6
3	23,2	3,1
4	26,5	2,7
5	44,9	2,0
6	56,8	2,5
7	64,9	2,3

Tab. 12: Tabulka identifikovaných tvarů a modálního útlumu.



Obr. 16: *Tvar na frekvenci 7,5 Hz – kývání na závěsu.*



Obr. 17: Tvar kmitu na frekvenci 12,6 Hz – ohyb spodního příčníku, postranice.



Obr. 18: Tvar kmitu na frekvenci 23,2 Hz – základní ohyb sloupků, příčníky ohyb ve fázi.



Obr. 19: Tvar kmitu na frekvenci 26,5 Hz – torzní tvar.



Obr. 20: Tvar kmitu na frekvenci 26,5 Hz – torzní tvar, detail 3D.



Obr. 21: Tvar kmitu na frekvenci 56,8 – ohyb spodního příčníku, kmitání konců postranice.



Obr. 22: Tvar na frekvenci 64,9 Hz – vyšší ohybový tvar prostředního sloupku.

Výsledek měření při buzení sloupů z boku. Vybuzeny pouze tvary sloupků, viz následující tabulka a obrázky tvarů.

Tvar číslo	Frekvence [Hz]	Útlum [%]
1	181	1,22
2	319	1,33
3	330	1,53

Tab. 13: Frekvence vlastních kmitů a hodnoty modálního útlumu – buzení z boku.



Obr. 23: Měřené body na sloupcích, vyznačený směr buzení.



Obr. 24: Naměřené odezvy při bočním buzení sloupků.



Obr. 25: Tvar kmitu na frekvenci 320 Hz – krajní sloupky kmitají 1. ohybovým tvarem v protifázi.



Obr. 26: *Tvar kmitu na frekvenci 330 Hz – krajní sloupky 1. ohybovým tvarem ve fázi, pro-střední sloupek v protifázi.*

4.2 Provozní modální analýza jádra – měření laserovým vibrometrem

Na sloupky jádra bylo umístěno zkušební vinutí a jádro bylo nabuzeno v režimu naprázdno. Tím se vybudí a rozkmitají pakety plechů, z nichž je jádro složeno. Laserovým vibrometrem bylo provedeno měření vibrací na postranicích a na sloupcích jádra, viz obr. 27 s vyznačenými body měření. K určení fáze signálů byl použit referenční snímač vibrací, který byl umístěn na spodní postranici vlevo ve stejné pozici jako při modální analýze. Jádro bylo měřeno zavěšené na jeřábu a podruhé usazené na gumových blocích na podlaze. Je tedy možné porovnat vliv kontaktu.



Obr. 27: Zkoušené jádro a vyznačené body měřené laserovým vibrometrem, červený bod vpravo dole je pozice referenčního snímače pro určení fáze signálů.

4.2.1 Výsledky měření vybuzených tvarů kmitů laserovým vibrometrem

Barevně zobrazené maximální amplitudy vibrací pro frekvence 100, 200 a 300 Hz jsou níže na obr. 28 - 33. Je provedeno porovnání pro oba stavy. Zavěšené versus posazené na podlahu zkušebny.



Obr. 28: Jádro zavěšené – rozložení amplitud na frekvenci 100 Hz.



Obr. 29: Jádro na zemi - rozložení amplitud na frekvenci 100 Hz.



Obr. 30: Jádro zavěšené – rozložení amplitud na frekvenci 200 Hz.



Obr. 31: Jádro na zemi - rozložení amplitud na frekvenci 200 Hz.



Obr. 32: Jádro zavěšené – rozložení amplitud na frekvenci 300 Hz.



Obr. 33: Jádro na zemi - rozložení amplitud na frekvenci 300 Hz.



Obr. 34: Jádro zavěšené – průměrné spektrum ze všech měřených bodů.



Obr. 35: Jádro na zemi – průměrné spektrum ze všech měřených bodů.



Obr. 36: Jádro zavěšené – spektrum v bodě č. 174, maximální hodnota 1,94 mm/s na frekvenci 200 Hz.



Obr. 37: Jádro na zemi – spektrum v bodě č. 173, maximální hodnota 1,66 mm/s na frekvenci 200 Hz

4.2.2 Měření vibrací - shrnutí

Vliv usazení jádra na gumové tlumící podložky má jen malý efekt na vibrace. Shodně jsou maxima na plechách horního příčníku, v blízkosti prostředního sloupku. Nejvyšší hodnoty v bodech č 174 a 173 usazením na zem mírně klesly z 1,94 mm/s na 1,66 mm/s na frekvenci 200 Hz. Celkové efektivní hodnoty pro měřené body č. 174 a 173 ve frekvenčním pásmu 5-800 Hz se snížily z hodnoty 1,69 mm/s na 1,39 mm/s.

Z průměrovaných spekter byla určena průměrná efektivní hodnota v pásmu 5-800 Hz. Tato hodnota zůstala prakticky shodná, tedy bez vlivu usazení jádra na zem. Pro zavěšené jádro je zprůměrovaná (ze všech měřených bodů je vypočítáno průměrné spektrum a z něho je určena efektivní hodnota v pásmu 5-800 Hz) celková efektivní hodnota 0,31 mm/s a pro jádro na zemi je 0,32 mm/s.



Obr. 38: Spektrum ze všech měřených bodů na jádře.



Obr. 39: Tvar na frekvenci 100 Hz – kmitání horní postranice a paketu plechů kolem středního sloupku.



Obr. 40: Tvar na frekvenci 200 Hz – kmitání paketu plechů kolem středního sloupku.



Obr. 41: Tvar na frekvenci 300 Hz – kmitání paketu plechů podél horní postranice.



Obr. 42: Tvar na frekvenci 400 Hz – kmitání paketu plechů u horní postranice.



Obr. 43: Tvar na frekvenci 500 Hz – kmitání paketu plechů u středního sloupku.

5 Závěr

V této zprávě je popsáno provedené mapování akustické intenzity a výpočet akustického výkonu jak jedné varianty mechanického tlumení nádoby transformátoru, tak jádra transformátoru, které bylo měřené jednak upevněné na pružných podložkách, tak zavěšené ve zvolených závěsných bodech. Výsledkem jsou mapy akustické intenzity, které dávají představu o rozložení jednotlivých zdrojů hluku. Pro zjištění tvarů kmitů byly provedeny i dvě varianty měření vibrací.

Provedená měření, získané výsledky a naměřené hodnoty jsou výchozími informacemi pro probíhající návrh a konstrukci nízkohlučného transformátoru.

6 Literatura

- [1] Sýkora, M.; Schlosser, M.; Karel, J.; Tureček, O.; Svoboda, M. Metoda měření a lokalizace zdrojů hluku transformátoru. ZČU v Plzni. Výzkumná zpráva. 2015.
- [2] ČSN EN 60076-10. Výkonové transformátory Část 10: Stanovení hladin hluku.
- [3] ČSN IEC 60076-10-1. Výkonové transformátory Část 10-1: Stanovení hladin hluku Směrnice pro používání.
- [4] ČSN ISO 9614-1. Akustika Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity – Část 1: Měření v bodech.
- [5] ČSN ISO 3744. Akustika Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Technická metoda pro přibližně volné pole nad odrazivou rovinou.

75

70

65

60

55

50

45

40

35

Příloha 1: Rozložení zdrojů hluku - nádoba transformátoru bez tlumení

Strana 1



100 Hz



125 Hz





200 Hz



250 Hz





315 Hz





630 Hz





dB

800 Hz

500 Hz





50 Hz



100 Hz





125 Hz





200 Hz



250 Hz



dB

75

315 Hz





75

70

65

60

55

50

45

40

35

Příloha 1: Rozložení zdrojů hluku - nádoba transformátoru bez tlumení Strana 2

500 Hz



630 Hz



800 Hz



1000 Hz



dB

100 Hz





125 Hz

50 Hz



160 Hz



© RICE FEL ZČU Stránka 45

200 Hz



250 Hz



315 Hz





500 Hz



630 Hz



800 Hz







100 Hz



125 Hz

50 Hz



160 Hz



© RICE FEL ZČU Stránka

dB

75

70

65

60

55

50

45

40

35

Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku - nádoba transformátoru s tlumením Strana 2

200 Hz



250 Hz



315 Hz





630 Hz





800 Hz

500 Hz







Strana 1





Strana 1



prosinec 2015

Příloha 3: Jádro transformátoru s uložením



Strana 1





Strana 1

400 Hz



prosinec 2015

Příloha 3: Jádro transformátoru s uložením



Strana 1



prosinec 2015

Příloha 3: Jádro transformátoru s uložením



Strana 1





50 Hz





Strana 2







200 Hz







315 Hz







500 Hz

Strana 2

630 Hz



800 Hz



