



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

2015

Pracoviště: **Regionální inovační centrum elektroniky**

Výzkumná zpráva č.: **22190-052-2015**

Metoda měření a lokalizace zdrojů hluku transformátoru

Řešitelé: **Martin Sýkora, Martin Schlosser, Jan Karel, Oldřich Tureček,
Michal Svoboda, Roman Kroft**

Počet stran: **59**

Datum vydání: **prosinec 2015**

Revize: **1**

Tento projekt byl realizován z podpory státního rozpočtu prostřednictvím Technologické agentury České republiky – projekt č. TA04021700.

Obsah

1. ÚVOD.....	3
2. VOLBA KONCEPCE MĚŘICÍ METODY	3
3. PODMÍNKY MĚŘENÍ A POUŽITÉ VYBAVENÍ.....	4
1.1 Měření transformátor	4
1.2 Použité vybavení	5
4. MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU – POROVNÁVANÉ METODY.....	5
1.3 Udávané parametry.....	6
5. MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU PODLE ČSN IEC 60076-10-1 – POMOCÍ AKUSTICKÉHO TLAKU	6
1.4 Měření akustického tlaku pro určení akustického výkonu	8
1.5 Postup určení akustického výkonu	8
1.6 Naměřené hodnoty.....	9
6. MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU PODLE ČSN IEC 60076-10-1 – POMOCÍ AKUSTICKÉ INTENZITY	9
1.7 Postup určení akustického výkonu	10
1.8 Naměřené hodnoty.....	11
7. MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU – MAPOVÁNÍ AKUSTICKÉ INTENZITY	12
1.9 Postup výpočtu - metoda	12
1.10 Vypočtené hodnoty – celkový výkon	13
8. LOKALIZACE ZDROJŮ HLUKU POMOCÍ MAPOVÁNÍ AKUSTICKÉ INTENZITY	14
1.11 Měřicí metoda.....	14
1.12 Mapy akustické intenzity.....	15
1.13 Měřené parametry.....	15
9. MOŽNOST OMEZENÍ FREKVENČNÍHO ROZSAHU MĚŘENÍ A VÝBĚR VÝZNAMNÝCH KMITOČTOVÝCH PÁSEM.....	15
1.14 Určení frekvenčního rozsahu měření a mapování.....	16
1.15 Dominantní frekvence	17
1.16 Zhodnocení omezení frekvenčního rozsahu.....	17
10. LOKALIZACE ZDROJŮ HLUKU STÁVAJÍCÍHO ŘEŠENÍ TRANSFORMÁTORU	17
1.17 Volba měřicí sítě.....	18
1.18 Mapy rozložení zdrojů hluku.....	19
11. MĚŘENÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITŮ STÁVAJÍCÍHO ŘEŠENÍ TRANSFORMÁTORU	20
1.19 Výsledky měření vibrací stávajícího řešení transformátoru	22
12. ZÁVĚR	25
13. LITERATURA	25
PŘÍLOHA 1: TECHNICKÁ SPECIFIKACE TRANSFORMÁTORU POUŽITÉHO PRO OVĚŘENÍ METODY LOKALIZACE ZDROJŮ HLUKU	26

PŘÍLOHA 2: ROZLOŽENÍ ZDROJŮ HLUKU STÁVAJÍCÍHO ŘEŠENÍ TRANSFORMÁTORU	27
PŘÍLOHA 3: URČENÍ TVARŮ KMITŮ STÁVAJÍCÍHO ŘEŠENÍ TRANSFORMÁTORU LASEROVÝM VIBROMETREM.....	45

1. Úvod

V rámci řešení projektu TAČR TA04021700 „Snížení hlučnosti silových transformátorů a jejich negativního dopadu na životní prostředí“ byla na ZČU v Plzni realizována měřicí metoda, která kromě stanovení hlučnosti transformátoru umožňuje i lokalizovat jeho nejhlučnější části.

Hlučnost transformátoru je charakterizována jeho celkovým akustickým výkonem, konkrétní postup měření je uvedený v normách [1] a [2]. Pro informaci o rozložení nejhlučnějších částí transformátoru je však měření celkového akustického výkonu nedostatečné, takže bylo nutné měřicí metodu rozšířit i o mapování zdrojů hluku, které vychází z mapování akustické intenzity v bodech v kombinaci s měřením vibrací různých částí stroje. Pro ověření přesnosti realizované měřicí metody bylo provedeno srovnání několika různých metod měření akustického výkonu. U výsledné metody lokalizace zdrojů hluku pak bylo provedeno omezení frekvenčního rozsahu při zachování přesnosti celé metody, což výrazně zjednodušilo způsob vyhodnocení a vykreslení map rozložení zdrojů hluku. Všechny testované měřicí metody byly zkoušeny při měření hlučnosti transformátoru na zkušební firmě ETD Transformátory, a.s., výsledná použitá měřicí metoda byla doplněna měřením vibrací, konkrétně provozních tvarů kmitů částí transformátoru pomocí laserového vibrometru.

2. Volba koncepce měřicí metody

Parametrem určujícím hlučnost transformátoru je akustický výkon, respektive jeho frekvenční spektrum, včetně vyhodnocení významných tónových složek. Stanovením hlučnosti velkých výkonových transformátorů a tlumivek se zabývají příslušné normy [1] a [2]. Tyto normy umožňují stanovit akustický výkon jak z měření akustického tlaku, tak z akustické intenzity.

Metody popsané v uvedených normách jsou metody provozní a obsahují celou řadu zjednodušení. Prakticky se jedná o to, že normy pouze sjednocují přístup k měření a v maximální míře zohledňují omezené možnosti měření hlučnosti takového specifického stroje jakým výkonový transformátor či tlumivka jsou. Omezení spočívají především ve velikosti objektu (rozměry v řádu jednotek metrů) a v tom, že tyto stroje pracují často s vysokým až velmi vysokým napětím, což s sebou nese nutnost provádět měření ve specializované zkušební a omezuje to v provozu přístup k některým částem stroje z bezpečnostních důvodů.

Pokud se jedná o vývoj transformátoru a hodnocení hlučnosti jeho jednotlivých částí, jeví se měření podle těchto norem jako málo vypovídající.

Proto, jak bude popsáno dále, bylo v rámci návrhu optimální měřicí metody provedeno několik experimentů ohledně stanovení akustického výkonu. Nejprve byl stanoven výkon podle výše uvedených norem a to jak z akustického tlaku, tak z akustické intenzity. Výhoda použití metody měření akustické intenzity je hlavně v tom, že z rozložení akustické intenzity lze velmi jednoduše usuzovat na rozložení jednotlivých zdrojů hluku transformátoru. Byla navržena metoda měření akustické intenzity v bodech, které byly zvoleny ve vhodném rastru měřicí sítě, který je významně jemnější, než měřicí linie požadovaná normami [1] a [2]. Toto měření slouží pro lokalizaci zdrojů hluku na principu mapování akustické intenzity a vychází z normy [3]. Zároveň jako důsledek lokalizace zdrojů hluku lze určit i celkový vyzářený akustický výkon stroje. Postupně byl zkoumán vliv zvoleného množství a pozic použitých bodů v rastru měřicí sítě na přesnost výpočtu celkové hladiny akustického. Cílem takového porovnání bylo určit, jakým způsobem je možno počítat akustický výkon transformátoru s co nejmenší náročností, avšak s dostatečnou přesností.

3. Podmínky měření a použité vybavení

Měření byla prováděna ve zkušebně firmy ETD Transformátory, z důvodu omezení vlivu hlučkového pozadí vždy v nočních hodinách, tedy mimo provoz výrobní části firmy.

1.1 Měřený transformátor

Jako měřený objekt byl využíván vždy stejný transformátor:

- Specifikace: Trojfázový olejový blokový transformátor
- Typ: E29M-0
- Výkon: 16 MVA
- Napětí: NN = 10,5 kV, VN = 121 kV
- Celkové rozměry (informativní)
 - Délka: 5070 mm
 - Šířka: 2555 mm
 - Výška: 4340 mm
- Celková hmotnost (informativní): 29 100 kg



Obr. 1: Měřený transformátor na zkušebně firmy ETD Transformátory.

1.2 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

4. Měření akustického výkonu – porovnávané metody

Stanovení akustického výkonu bylo zkoumáno pomocí několika způsobů. Cílem bylo provnat standardizovaný postup podle specifických norem [1] a [2] a dále určit akustický výkon z mapování akustické intenzity, které je využito pro lokalizaci zdrojů hluku transformátoru.

Stanovením hlučnosti velkých výkonových transformátorů a tlumivek se zabývají příslušné normy (1) a (2). Tyto normy umožňují stanovit akustický výkon jak z měření akustického tlaku, tak z akustické intenzity.

1.3 Udávané parametry

Pro porovnání jednotlivých metod určení akustického výkonu jsou vyhodnocovány následující parametry:

- $L_{W,A}$ Celková hladina akustického výkonu vážená pomocí váhového filtru A na dané ploše.
- L_T Spektrum hladiny váženého (A) akustického výkonu udávané v 1/3-oktávových pásmech ve frekvenčním rozsahu 100 Hz – 2 kHz.

Nebylo nutné udávat parametry požadované normami [1] a [2], tedy hladiny akustického výkonu naprázdno a nakrátko. Transformátor byl vždy provozován ve stavu naprázdno, pro porovnání jednotlivých měřících metod byl tento režim naprosto dostačující.

5. Měření akustického výkonu podle ČSN IEC 60076-10-1 – pomocí akustického tlaku

Jako další byl pro porovnání proveden výpočet akustického výkonu z akustického tlaku postupem dle normy [1] resp. [2]. Tato metoda předpokládá měření hladiny akustického tlaku v bodech umístěných na tzv. měřicí linii. Měřicí linií se rozumí čára ve vzdálenosti 30 cm od myšleného vyzařujícího povrchu transformátoru. Vzdálenost mezi jednotlivými body nesmí přesáhnout 1 m. Výška měřících mikrofónů při měření transformátoru do výšky nádoby 2,5 m musí být uprostřed výšky nádoby.

Výsledná plocha pro určení akustického výkonu se určí:

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

Kde S je obepínající plocha

l_m je délka měřicí linie

h je výška nádoby transformátoru

Metoda podle normy vyžaduje korekci na hluk pozadí, proto je třeba určit jak průměrnou hodnotu akustického tlaku podél měřicí linie z hladin akustických tlaků v jednotlivých bodech při zapnutém transformátoru.

$$L_{pAO} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pAi}} \right)$$

Kde N je počet měřicích bodů

L_{pAi} je hladina akustického tlaku v jednotlivých měřicích bodech

Dále je třeba určit průměrnou hodnotu hladiny tlaku pozadí při vypnutém transformátoru.

Ta se určí podle vztahu:

$$L_{bgA} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgAi}} \right)$$

Kde M je počet bodů měření hlukového pozadí

L_{bgAi} je hladina akustického tlaku hlukového pozadí v jednotlivých měřicích bodech

Výsledná hladina korigovaného akustického tlaku použitá pro výpočet akustického výkonu se potom určí ze vztahu:

$$L_{pA} = 10 \cdot \log(10^{0,1L_{pAO}} - 10^{0,1L_{bgA}}) - K$$

Kde K je korekce na vlastnosti zkušebního prostředí, která vychází mj. z velikosti a doby dozvuku použité zkušebny. Stanovení korekce je detailně popsáno v normě (1). Korekce zohledňuje především plochu měřeného objektu a pohltivost zkušebního prostoru. Vztah pro určení korekce je následující:

$$K = 10 \cdot \log \left(1 + \frac{4}{A/S} \right)$$

Kde A je pohltivá plocha vypočtená podle vztahu:

$$A = \alpha \cdot S_V$$

Kde α je střední činitel akustické pohltivosti

S_V – je plocha stěn zkušebny

Přibližné hodnoty činitele pohltivosti pro různé typy prostorů jsou tabelovány v normě. Případně norma umožňuje stanovit pohltivost z měření doby dozvuku zkušebního prostoru.

Jakmile je k dispozici korigovaná hladina akustického tlaku L_{pA} je možné provést výpočet akustického výkonu L_{WA} podle vztahu:

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

Kde S_0 je referenční plocha (1 m²).

1.4 Měření akustického tlaku pro určení akustického výkonu

Jak již bylo uvedeno, metoda stanovení akustického výkonu podle příslušné normy je běžně užívaný postup. Rovněž firma ETD Transformátory tento postup používá pro certifikaci svých výrobků. Proto byla tato metoda vzata jako základ pro srovnání s ostatními způsoby určení akustického výkonu.

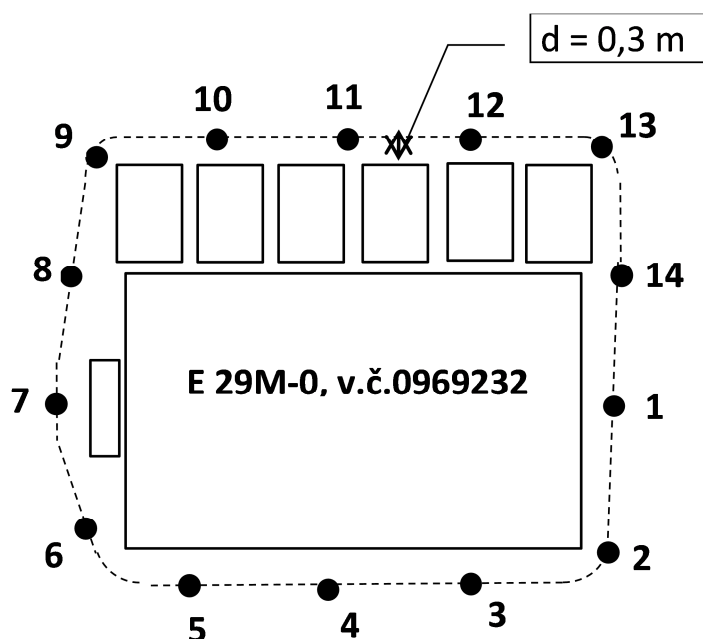
Z důvodu maximální návaznosti na praxi bylo měřením touto metodou provedeno akreditovanou zkušebnou, která tato měření pro firmu ETD Transformátory běžně provádí.

Normy [1] a [2] požadují pouze stanovení celkového výkonu L_{WA} , nikoliv třetinoktákových spekter, proto se protokol akreditované zkušebny těmito spektry nezabývá a je zde uveden pouze výpočet celkového výkonu L_{WA} z celkových hladin naměřených akustických tlaků.

Výpočet hladin akustického výkonu v jednotlivých pásmech pro metodu z akustického tlaku však byl proveden ze spekter akustického tlaku naměřených akreditovanou zkušebnou. Tato spektra byla měřicím subjektem poskytnuta jako data.

1.5 Postup určení akustického výkonu

Měření akustického výkonu pomocí hladin akustického tlaku bylo provedeno v souladu s požadavky normy [1]. Měření bylo provedeno ve 14 bodech po měřicí linii o délce $l_m=13,1$ m, jak ukazuje situační náčrtek.



Obr. 2: Geometrie a uspořádání měřicí linie pro metodu akustického tlaku

Při výšce nádoby transformátoru $h = 2,46$ m stačí jedna měřicí linie v polovině výšky nádoby. Délka linie s výškou nádoby dávají měřicí plochu pro výpočet výkonu $S = 40,3$ m². Přibližné rozměry zkušebny jsou 152 m x 24 m x 22 m, což dává plochu $S_V = 15\,086$ m². Střední činitel pohltivosti α byl odhadnut z tabulky v normě (1) na $\alpha = 0,15$. Z vypočtených ploch a stanoveného činitele pohltivosti byla určena korekce $K = 0,3$ dB.

Výše uvedené hodnoty stanovené na základě podmínek měření byly použity k výpočtu hladin akustického výkonu, které jsou uvedeny v další kapitole.

1.6 Naměřené hodnoty

Pásmo	$L_{W,A,T}$ [dB]	Pásmo	$L_{W,A,T}$ [dB]
100 Hz	62,8	500 Hz	60,9
125 Hz	46,7	630 Hz	72,6
160 Hz	47,2	800 Hz	61,9
200 Hz	69,7	1,00 kHz	66,3
250 Hz	57,9	1,25 kHz	66,4
315 Hz	72,1	1,60 kHz	56,2
400 Hz	63,7	2,00 kHz	42,6

Tab. 1: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – metoda z akustického tlaku

Celkový výkon $L_{W,A} = 77,7$ dB

6. Měření akustického výkonu podle ČSN IEC 60076-10-1 – pomocí akustické intenzity

Dále byl akustický výkon určen podle normy [1] z měření akustické intenzity. Metoda předpokládá měření akustické intenzity za stejných podmínek (počet a vzdálenost bodů, měřicí linie atd.) jako v případě metody určení akustického výkonu z měření akustického tlaku podle téže normy.

Ve vybraných bodech na měřicí linii se měří akustická intenzita. Z těchto jednotlivých intenzit se stanoví průměrná akustická intenzita podél měřicí linie podle vztahu:

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

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

N je počet měřicích bodů

Vzhledem k tomu, že měření intenzity za podmínek uvedených v normě nepotřebuje z principu korigovat hluk pozadí, lze stanovit rovnou akustický výkon podle vztahu:

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

Kde S_0 je referenční plocha (1 m^2)

1.7 Postup určení akustického výkonu

Pro výpočet akustického výkonu byly částečně využity naměřené hodnoty akustické intenzity získané při mapování. Pro potřeby porovnání obou normou dovolených způsobů by bylo vhodnější měřit ve stejných pozicích, jako při měření akustického tlaku. Avšak akustické měření takového stroje jakým je výkonový transformátor přináší celou řadu praktických a organizačních úskalí. Vzhledem k tomu, že měření byla prováděna dvěma různými subjekty, nepodařilo se zcela zkoordinovat volbu měřicích bodů.

Pro výpočet výkonu z naměřené akustické intenzity tak byly použity vybrané body naměřené při mapování akustické intenzity. Z celé sítě bodů bylo vybráno několik takových, které splňují požadavky normy na jejich vzájemnou vzdálenost. Taková volba bodů, omezená použitým rastrem sítě ($30\text{cm} \times 30\text{cm}$) potom znamená, že rozdělení bodů podél měřicí linie není zcela rovnoměrné, nicméně požadavek normy na minimální vzdálenost mezi body ($\leq 1 \text{ m}$) byl dodržen. Konkrétně byly vybrány na jednotlivých stěnách následující body:

Plocha čelní stěny s rozvaděčem (stěna 1)

Body: 1, 3, 5, 8

Plocha boční stěny s chladicími radiátory (stěna 2)

Body: 2, 5, 8, 11, 14

Plocha boční stěny (stěna 3)

Body: 2, 5, 8

Plocha zadní stěny s olejovou nádrží (stěna 4)

Body: 2, 5, 8, 11, 14

S rozdílnou volbou měřicích bodů vychází i odlišná měřicí linie. Ta v tomto případě vychází o délce $l_m=15,42$ m. Výška nádoby transformátoru zůstává samozřejmě stejná jako v případě metody měření akustického tlaku, tedy $h = 2,46$ m. Délka měřicí linie a výška nádoby pak dávají měřicí plochu $S = 47,42$ m².

Další drobnou odlišností je výška měřicí linie. Opět vzhledem k pevnému rastru měřicí sítě vychází střed výšky nádoby transformátoru mezi linie dané rastrem měřicí sítě. Proto byl akustický výkon stanoven dvakrát. Pro obě měřicí linie rastru (jedna pod a jedna nad) v bezprostředním okolí středu výšky transformátorové nádoby. Konkrétně se jedná o měřicí linie č.5 a č.6.

1.8 Naměřené hodnoty

Pásmo	L_T [dB]	Pásmo	L_T [dB]
100 Hz	60,3	500 Hz	57,5
125 Hz	43,7	630 Hz	69,1
160 Hz	48,5	800 Hz	60,0
200 Hz	71,1	1,00 kHz	63,2
250 Hz	58,2	1,25 kHz	64,9
315 Hz	71,8	1,60 kHz	55,4
400 Hz	62,1	2,00 kHz	40,3

Tab. 2: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – měřicí linie ř.5.

Celkový výkon $L_{w,A} = 76,7$ dB

Pásmo	L_T [dB]	Pásmo	L_T [dB]
100 Hz	60,7	500 Hz	60,6
125 Hz	43,9	630 Hz	71,0
160 Hz	47,4	800 Hz	61,5
200 Hz	70,1	1,00 kHz	63,5
250 Hz	56,7	1,25 kHz	64,7
315 Hz	69,9	1,60 kHz	54,2
400 Hz	63,1	2,00 kHz	39,3

Tab. 3: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – měřicí linie ř.6.

Celkový výkon $L_w = 76,5$ dB

7. Měření akustického výkonu – mapování akustické intenzity

Pro stanovení váženého akustického výkonu ($L_{w,A}$) byly použity změřené hodnoty akustické intenzity, které byly získány při mapování – viz kapitola „Mapování akustické intenzity“

Při mapování akustické intenzity v bodech je akustický výkon $W = \iint_S \bar{I} d\vec{S}$ možné určit při-

mým 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 plochách S_i , na které je rozdělena zvolená měřicí plocha obepínající transformátor. Pro dané měření byla zvolena kvádrová plocha, kdy hodnoty akustické intenzity jsou stanoveny v blízkém poli. Výsledná hladina je pak určena

$L_{w,A} = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{ref}}$ [dB] s použitím váhového filtru A, kde $W_{ref} = 10^{-12}$ W.

1.9 Postup výpočtu - metoda

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:

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

Kde $L_{I_{avg,f}}$ 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 transformátoru.

Vzhledem k tomu, že transformátor vyzařuje i směrem nahoru a není technicky možné změřit intenzitu na myšlené horní stěně (výška, vysoké napětí) je výpočet výkonu prováděn pouze z průměrných hodnot bočních stěn s uvažováním zvětšení plochy respektující vyzařování horní stěnou. Plocha každé boční stěny je proto násobena koeficientem 1,25. Plochy jednot-

livých stěn jsou stanoveny z rozměrů transformátoru a po vynásobení koeficientem 1,25 vychází následující velikosti ploch.

Plocha čelní stěny s rozvaděčem (stěna 1)

$$S_1=9,01 \text{ m}^2$$

Plocha boční stěny s chladicími radiátory (stěna 2)

$$S_2=14,70 \text{ m}^2$$

Plocha boční stěny (stěna 3)

$$S_3=14,70 \text{ m}^2$$

Plocha zadní stěny s olejovou nádrží (stěna 4)

$$S_4=9,01 \text{ m}^2$$

Protože cílem bylo zjistit citlivost výpočtu akustického výkonu na volbu bodů, resp. hustotu měřicí sítě, byl výpočet proveden pro stejnou geometrii celkem dvakrát. V prvním kroku byly pro výpočet průměrných intenzit použity všechny měřené body. V druhém případě byly vynechány body tak, aby rastr měřicí sítě byl 60 cm x 60 cm. Tj. v každém směru byl do výpočtu zahrnut pouze každý druhý bod.

1.10 Vypočtené hodnoty – celkový výkon

Pásmo	L_T [dB]	Pásmo	L_T [dB]
100 Hz	61,4	500 Hz	61,0
125 Hz	44,6	630 Hz	70,5
160 Hz	47,5	800 Hz	60,8
200 Hz	70,3	1,00 kHz	65,1
250 Hz	55,8	1,25 kHz	65,8
315 Hz	68,1	1,60 kHz	55,5
400 Hz	62,0	2,00 kHz	41,0

Tab. 4: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech – měřicí síť 30 x 30 cm.

Celkový výkon $L_{w,A}=76,2$ dB

Pásmo	L_T [dB]	Pásmo	L_T [dB]
100 Hz	61,7	500 Hz	61,6
125 Hz	44,9	630 Hz	71,0
160 Hz	47,6	800 Hz	60,8
200 Hz	70,4	1,00 kHz	65,4
250 Hz	55,7	1,25 kHz	65,4
315 Hz	67,8	1,60 kHz	55,6
400 Hz	61,6	2,00 kHz	41,1

Tab. 5: Hladiny akustického výkonu v třetinooktávných pásmech – měřicí síť 60 x 60 cm.

Celkový výkon $L_{W,A} = 76,4$ dB

Jak je patrné z tabulek, vliv velikosti rastru je v tomto případě nepatrný. Odchytky výkonů v jednotlivých zkoumaných třetinooktávných pásmech jsou minimální (řádově desetiny decibelu), rovněž rozdíl celkových výkonů je v podobných relacích.

8. Lokalizace zdrojů hluku pomocí mapování akustické intenzity

1.11 Měřicí metoda

Metoda měření akustické intenzity v bodech byla použita z několika důvodů. Jako první lze uvést určitá omezení, která plynou z nutnosti měřit transformátor na zkušebně, která není optimalizovaná pro akustická měření. Dále bylo cílem provést mapování celého stroje a určit tak potenciální významné zdroje hluku a jejich příspěvek k celkové hlučnosti stroje.

Nedílnou součástí měření je i následné stanovení celkového akustického výkonu, resp. frekvenčního spektra akustického výkonu. Tyto parametry jsou nezbytné pro určení hlučnosti stroje jako celku, respektive pro posouzení jeho kvalit s ohledem na obtěžování hlukem

Mapování akustické intenzity bylo provedeno v diskrétních bodech s pevným rastrem 30 cm x 30 cm, ve vzdálenosti 30 cm od myšlené hrany stroje, která je dána nejzazším bodem vystupujícím v daném směru. V tomto smyslu jsou uvažovány rozměry nádoby transformátoru, včetně chladicích radiátorů, pomocného rozvaděče apod. Naopak obklopující plocha nezahr-

nuje olejovou nádrž, izolátory přívodů apod. Myšlenka vychází z toho, že obklopující plocha pro měření akustického výkonu a mapování intenzity je kvádr daný rozměry transformátoru.

Rastr 30 cm x 30 cm byl zvolen jako kompromis mezi únosným počtem bodů (desítky až stovky 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.

1.12 Mapy akustické intenzity

Získané mapy jsou zobrazeny pomocí barevné škály v rozsahu 35 dB (modrá) až 75 dB (červená), přičemž mapy zobrazují pouze akustickou intenzitu v kladném směru (tj. reprezentující akustickou energii šířící se od transformátoru). Hodnoty intenzity v opačném směru jsou vynechány a na mapě jsou zobrazována jako bílá místa. Barevná mapa je pro lepší orientaci průhledně překryta s fotografií měřené stěny.

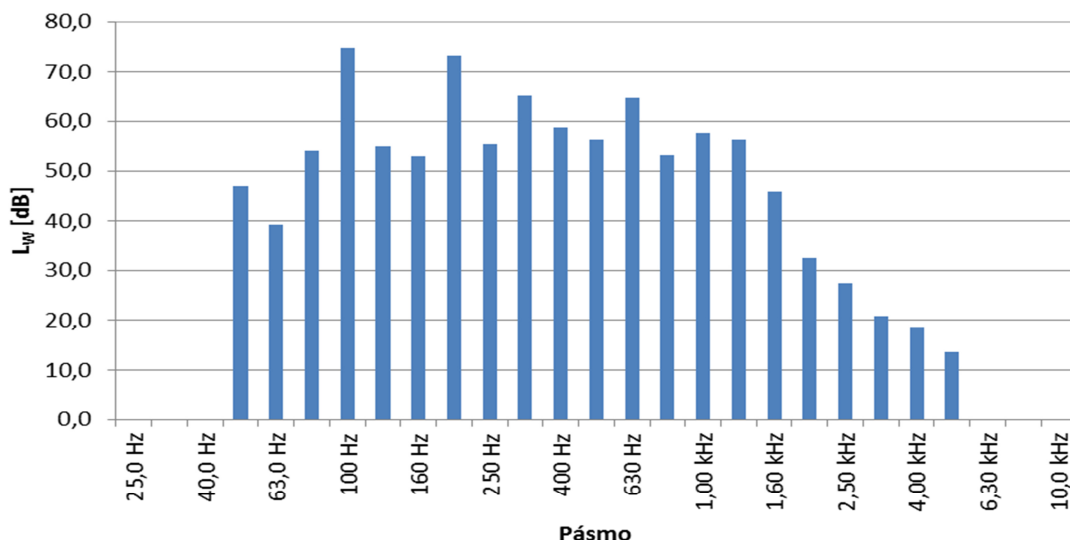
1.13 Měřené parametry

$L_{T,i}$ Spektrum hladiny akustické intenzity udávané v 1/3-oktávních pásmech ve frekvenčním rozsahu 100 Hz – 2 kHz pro jednotlivé měřicí body.

9. Možnost omezení frekvenčního rozsahu měření a výběr významných kmitočtových pásem

Omezení frekvenčního rozsahu stanovení akustického výkonu, resp. mapování akustické intenzity, má dvě roviny. Tou první je použitá měřicí technika. Intenzitní sonda má s použitou distanční vložkou (12 mm) za uvedených podmínek frekvenční rozsah 50 Hz až 5 kHz.

Druhým ovlivňujícím faktorem je charakter hluku produkovaného transformátorem. Dominantním zdrojem hluku u transformátoru je magnetosrikce jádra. Ta se výrazně projevuje na dvojnásobku napájecí frekvence a dalších harmonických kmitočtech. V případě síťového kmitočtu 50 Hz potom vznikají výrazná maxima akustického výkonu v pásmech 100, 200 a 400 Hz. Přičemž tato zmíněná maxima výrazně převyšují hladinu akustického výkonu v ostatních pásmech (až o desítky dB), což implikuje skutečnost, že ostatní pásma přispívají k celkovému akustickému výkonu naprosto nepatrně. Příklad spektra měřeného hluku transformátoru je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 3: Měřené spektrum akustického výkonu transformátoru.

1.14 Určení frekvenčního rozsahu měření a mapování

Jako již bylo uvedeno výše, v hlukovém spektru transformátoru jsou dominantní určité frekvence a příspěvek ostatních pásem k celkovému hluku je minimální. Proto byl zjišťován vliv omezení frekvenčního rozsahu měření na vypočtený celkový akustický výkon. Respektive byl počítán celkový akustický výkon transformátoru z příspěvků jednotlivých třetinooktávních pásem. Detaily ohledně výpočtu akustického výkonu jsou předmětem samostatné kapitoly. Postupně byl frekvenční rozsah shora i zdola omezován a byly porovnávány hladiny vypočtených výkonů. Jednotlivé výsledky jsou zřejmé z následující tabulky.

Frekvenční rozsah	50 Hz až 5 kHz	100 Hz až 2 kHz	100 Hz až 1,25 kHz	100 Hz až 1,0 kHz
$L_{w,A}$ [dB]	76,2	76,2	76,1	75,7

Tab. 6: Vliv frekvenčního rozsahu na celkovou hladinu akustického výkonu.

Jak je patrné z tab. 6, nepatrný rozdíl v celkové hladině akustického výkonu se projeví až při velkém omezení frekvenčního rozsahu (rozsah 100 Hz až 1,0 kHz) a i tak je rozdíl v řádu desetin decibelu. Konkrétně mezi frekvenčním rozsahem, který je dán omezením měřicí sondy (50 Hz až 5 kHz) a zúženým rozsahem 100 Hz až 1 kHz je rozdíl pouhých 0,5 dB.

1.15 Dominantní frekvence

Kromě výpočtu výkonu pro určitý zúžený frekvenční rozsah byl výkon vypočten i jako příspěvek pouze těch třetinooktávních pásem, ve kterých leží druhá harmonická napájecího kmitočtu a její další násobky. Pro porovnání byly vybrány dvě skupiny pásem.

Vybraná pásma A: 100 Hz, 200 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz a 1kHz

Vybraná pásma B: 100 Hz, 200 Hz, 315 Hz, 630 Hz

Frekvenční rozsah	Pásma A	Pásma B	Rozsah 100 Hz – 2kHz
$L_{w,A}$ [dB]	75,7	74,7	76,2

Tab. 7: Vliv vybraných třetinooktávních pásem na celkovou hladinu $L_{w,A}$.

V tab. 7 jsou pro porovnání uvedeny vypočtené hodnoty celkové hladiny váženého akustického výkonu ($L_{w,A}$) pro obě vybrané skupiny třetinooktávních pásem a pro celý frekvenční rozsah 100 Hz až 2 kHz. Z hodnot v tabulce je zřetelně vidět, že většina emitovaného akustického výkonu se nachází v pásmech 100 Hz, 200 Hz, 315 Hz a 630 Hz (vybraná pásma A), protože rozdíl hladiny akustického výkonu v těchto několika pásmech oproti rozsahu celému rozsahu 100 Hz až 2 kHz činí pouze 1,5 dB.

1.16 Zhodnocení omezení frekvenčního rozsahu

Provedená porovnání celkové hladiny váženého akustického výkonu pro různá frekvenční pásma potvrdila předpoklad, že u transformátoru této koncepce většina vyzařovaného výkonu spadá pouze do několika třetinooktávních frekvenčních pásem. Příspěvek ostatních pásem je potom vzhledem k absolutním velikostem celkových hladin prakticky zanedbatelný.

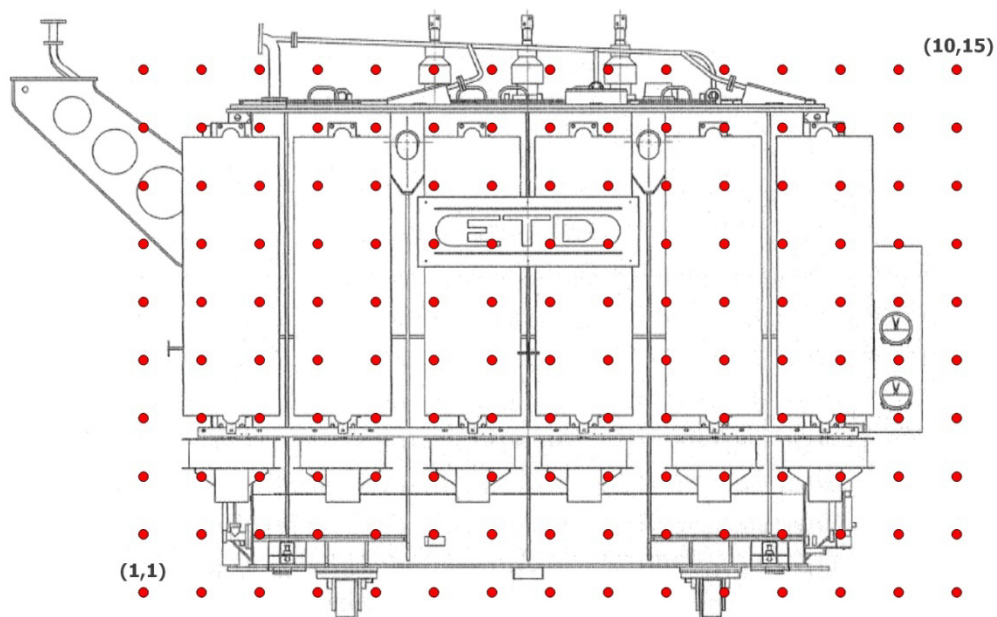
Konkrétně se ukázalo, že pro další porovnání dílčích akustických výkonů a mapování akustické intenzity stačí uvažovat redukováný frekvenční rozsah 100 Hz až 2 kHz.

10. Lokalizace zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

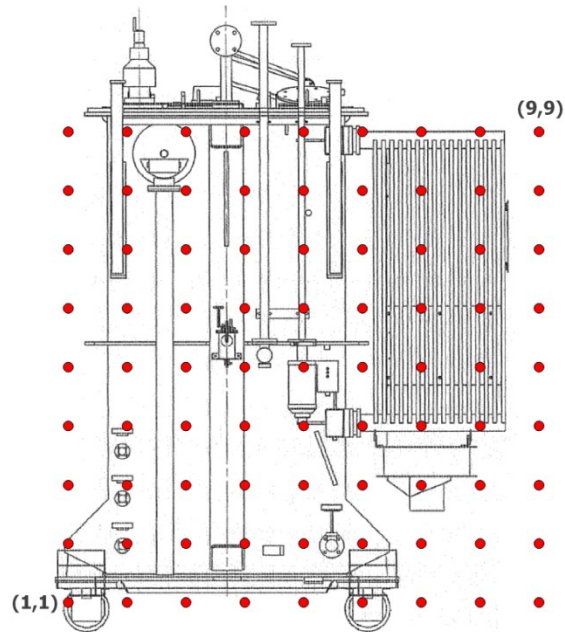
Lokalizace zdrojů hluku pomocí mapování akustické intenzity byla provedena pro kompletní stávající řešení transformátoru (viz. Kap. 3) včetně příslušenství (ovládací výzbroj, olejové hospodářství atd.). Transformátor byl provozován ve stavu naprázdno.

1.17 Volba měřicí sítě

Představu o rozmístění měřicích bodů a použitém rastru sítě dávají obr. 4 a 5. Měřicí síť je znázorněna jako červené tečky ve výkresech. Je zřejmé, že mapování bylo omezeno především na samotnou nádobu transformátoru. Rovněž je na první pohled patrná hustota rastru v porovnání s rozměry celého transformátoru.



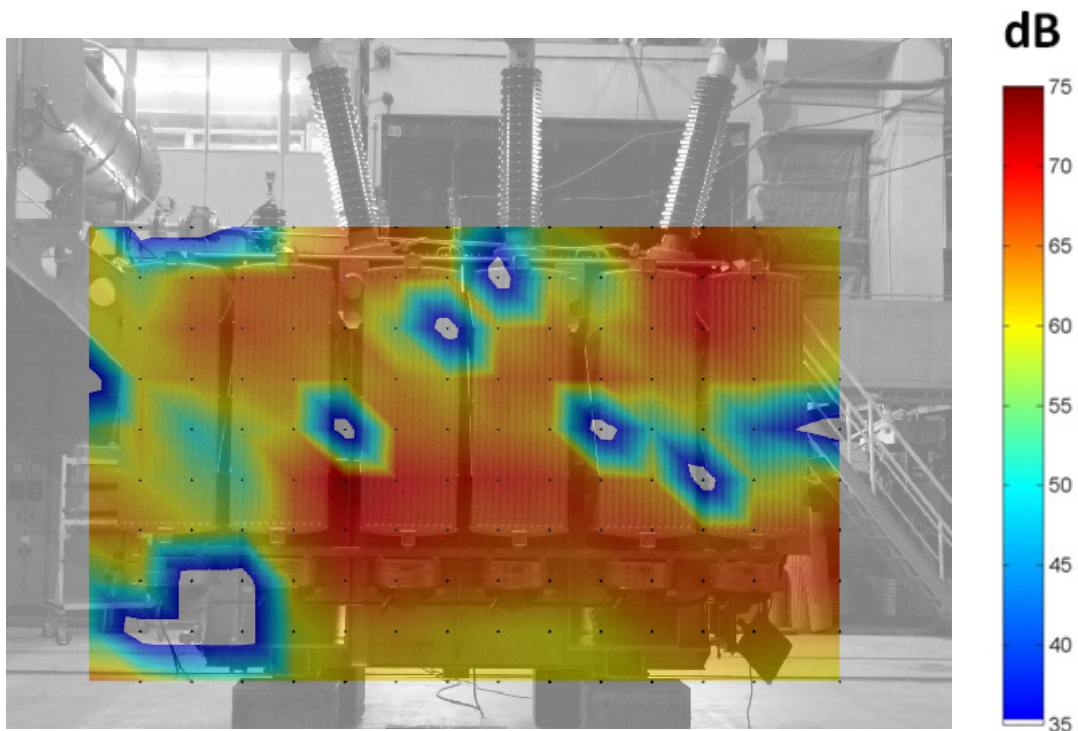
Obr. 4: Měřicí síť - boční stěna celého transformátoru.



Obr. 5: Měřicí síť - čelní stěna celého transformátoru.

1.18 Mapy rozložení zdrojů hluku

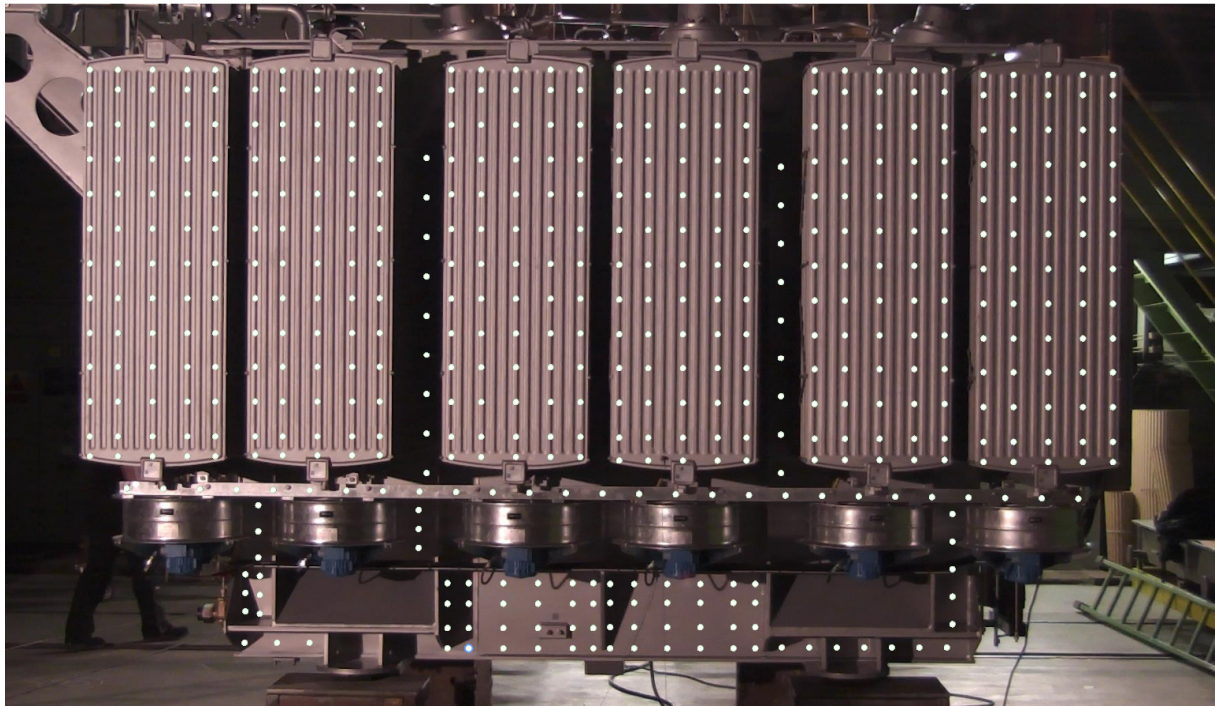
Výsledné mapy rozložení zdrojů hluku jsou uvedené v Příloze 2. Ukázka rozložení zdrojů hluku v pásmu 200 Hz u strany transformátoru, na které jsou umístěné chladiče, je na obr. 6.



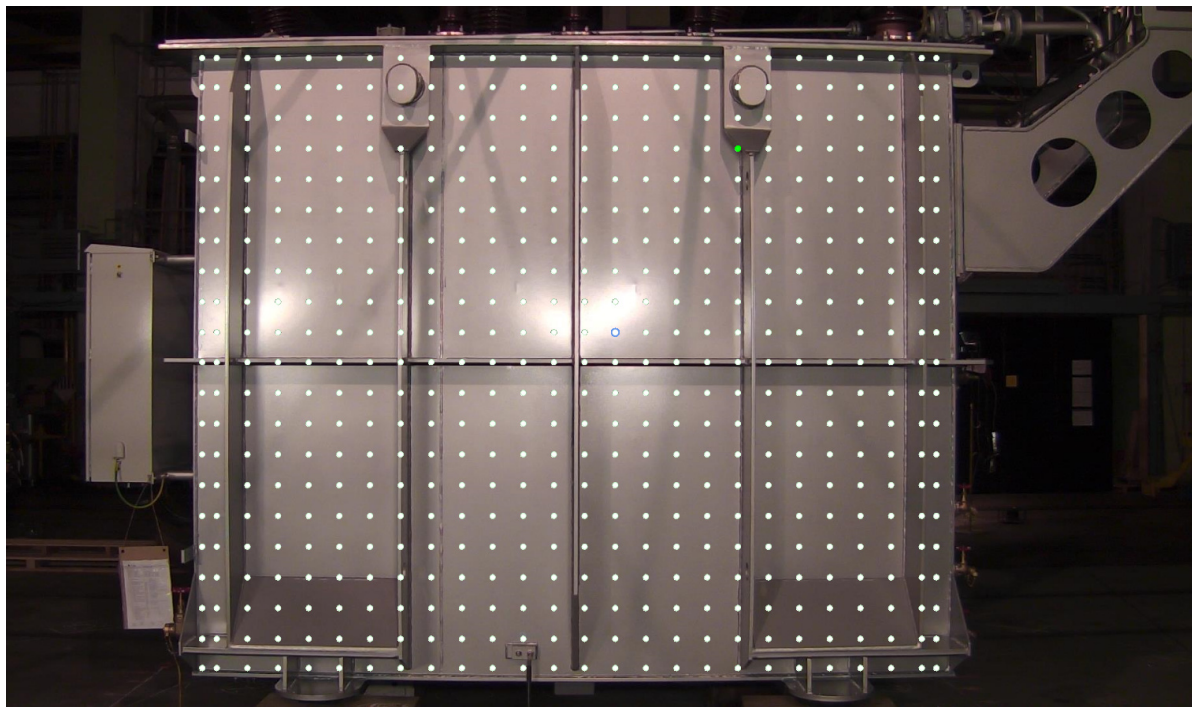
Obr. 6: Ukázka rozložení zdrojů hluku na straně transformátoru, pásmo 200 Hz.

11. Měření provozních tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru

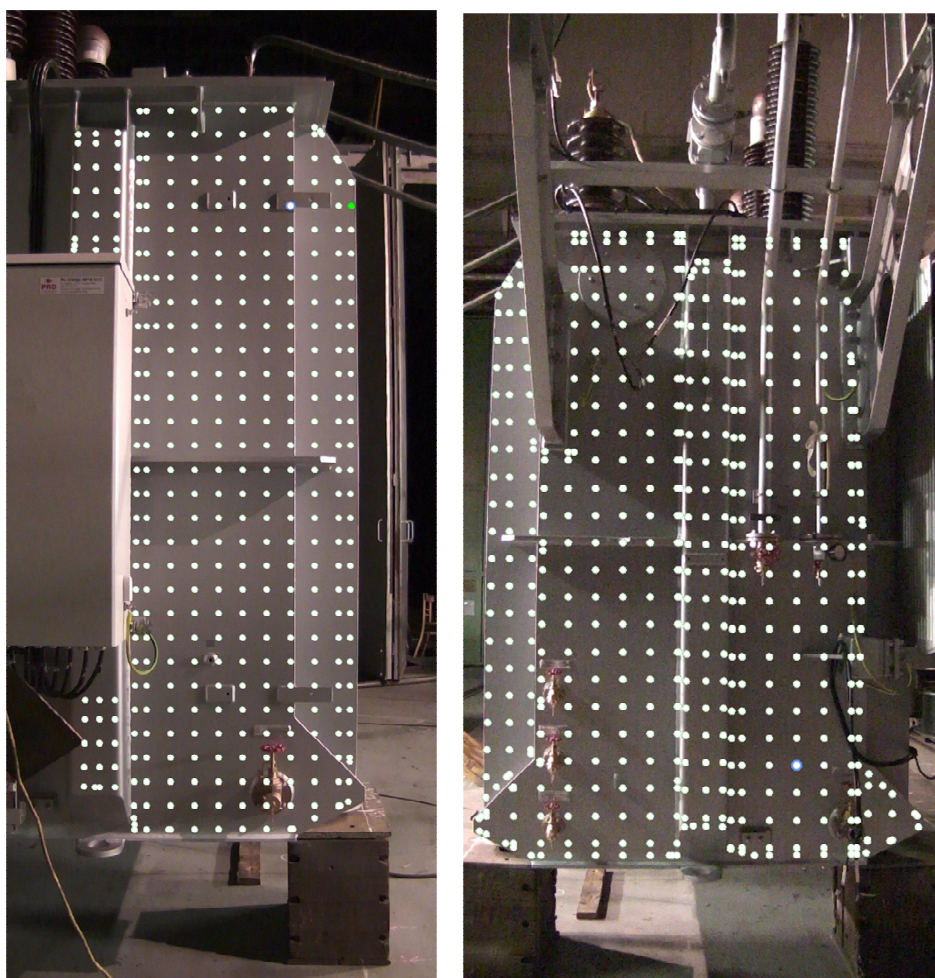
Vibrace transformátoru byly postupně změřeny na všech dostupných stěnách nádoby transformátoru a na chladících radiátorech. Transformátor byl nabuzen v režimu naprázdno, tedy s nominálním napětím. Na obrázcích níže jsou zobrazeny jednotlivé plochy, stěny nádoby transformátoru s vyznačenými měřenými body. Transformátor měl chladící radiátory pouze na jedné straně nádoby. Referenční snímač vibrací byl připevněn na stěně nádoby pod radiátorem.



Obr. 7: Měřené body na boční stěně transformátoru s radiátory.

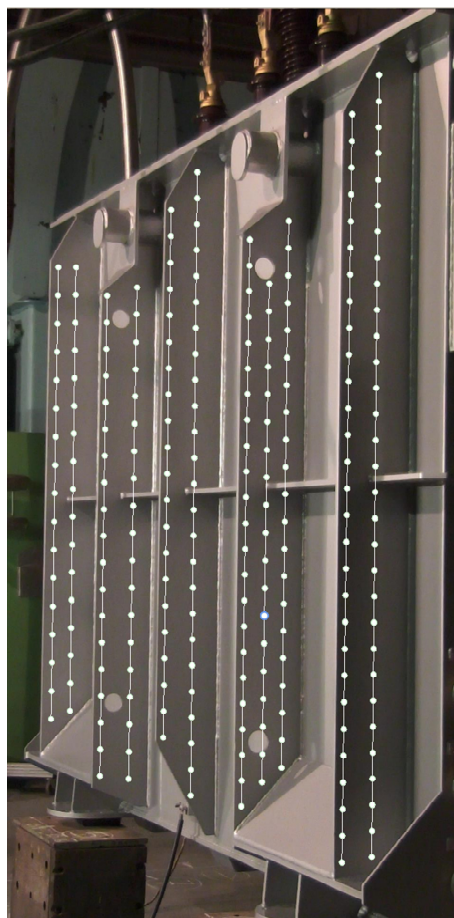


Obr. 8: Měřené body na boční stěně transformátoru bez radiátorů.



Obr. 9: Měřené body na přední a zadní stěně transformátoru.

Dále byly změřeny vibrace vyztužujících žeběr na boční stěně bez radiátorů, viz obr. 10.



Obr. 10: Měřené body na vyztužných žebrech.

1.19 Výsledky měření vibrací stávajícího řešení transformátoru

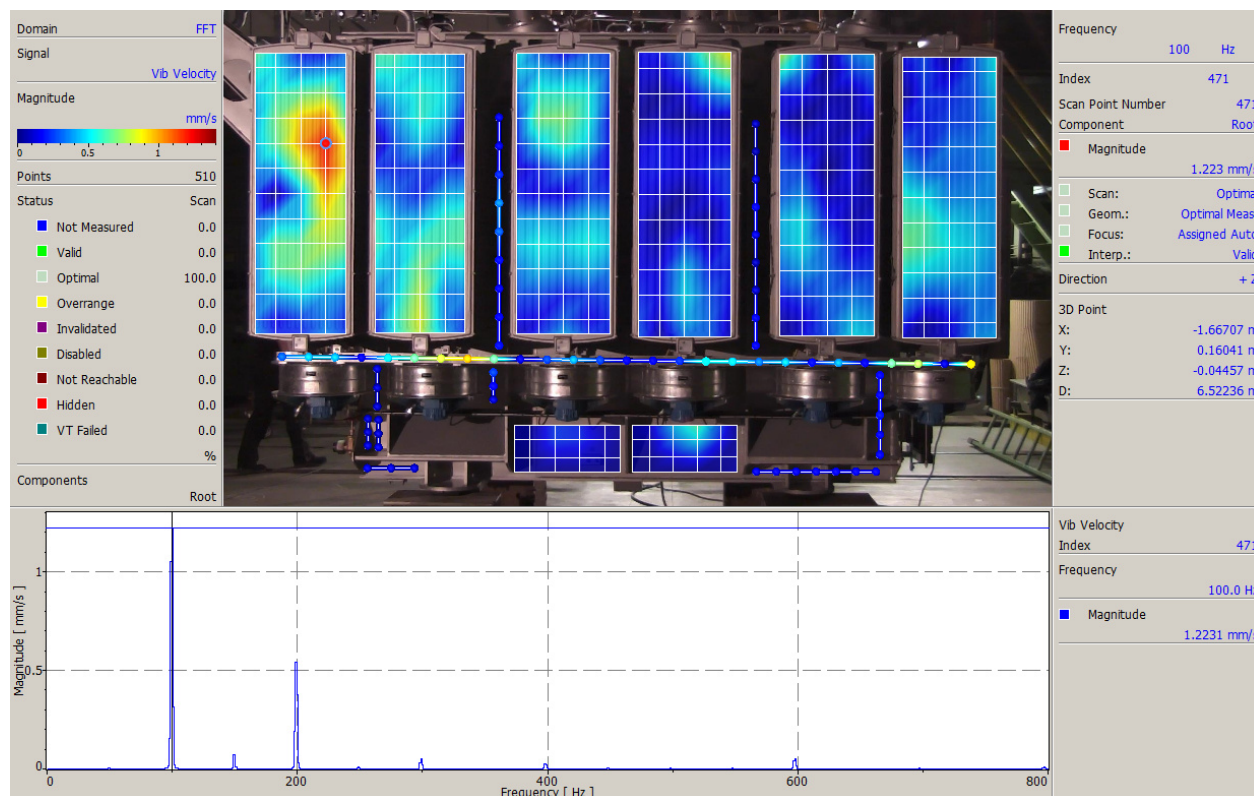
Ukázky výsledků měření provozních tvarů kmitů boční stěny s radiátory laserovým vibrometrem na dominantních frekvencích 100 Hz a 200 Hz jsou uvedené na obr. 11 a 12, všechny výsledky měření jsou v příloze 3. Maximální a průměrné hodnoty (průměrované spektrum ze všech měřených bodů a celková efektivní hodnota v pásmu 5-800 Hz) ze všech měřených bodů na jednotlivých stěnách jsou v tab. 8.

Měřená plocha / stěna	Maximum pro 100 Hz [mm/s]	Maximum pro 200 Hz [mm/s]	Průměrná hodnota 5-800 Hz [mm/s]
Stěna s radiátory	1,22	3,07	0,57
Stěna bez radiátorů	1,07	1,42	0,21
Zadní stěna	1,53	1,08	0,26
Přední stěna	0,83	0,72	0,22
Žebrování	0,37	1,71	0,32

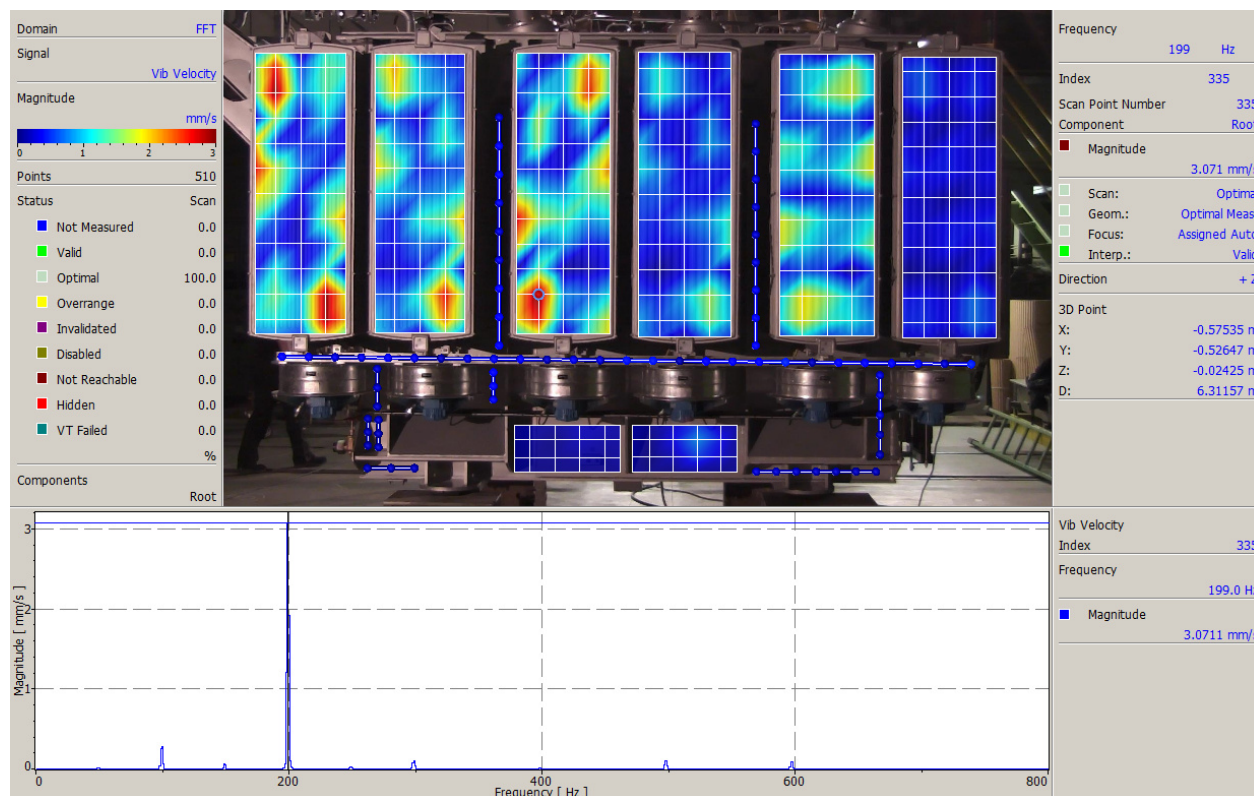
Tab. 8: Maximální a průměrné hodnoty vibrací ze všech měřicích bodů.

Maximálních hodnot vibrací je dosaženo na frekvenci 100 Hz a 200 Hz. Absolutně nejvyšší hodnota 3 mm/s byla naměřena na chladících radiátorech v několika bodech na frekvenci 200 Hz, viz snímek s tvarem. Z vizualizovaných tvarů je patrné nerovnoměrné kmitání konstrukce, například radiátory více kmitají na straně u expanzní nádoby (levá strana při pohledu na snímky).

To je způsobeno několika faktory. Vliv má vlastní frekvenčně-modální naladění konstrukce, kdy existují rozdíly pro každý svařený panel nebo radiátor, dále pak vliv buzení elektromagnetickými silami a usazení vnitřní sestavy vůči nádobě, teplotní rozdíl na panelech.



Obr. 11: Boční stěna - provozní tvar kmitu na 100 Hz – maximum 1,22 mm/s.



Obr. 12: Boční stěna - provozní tvar kmitu na 200 Hz – maximum 3,07 mm/s.

12. Závěr

Z porovnání naměřených celkových hladin akustického výkonu získané různými měřicími metodami je patrné, že hodnoty získanými různými metodami se mírně odlišují. Ukazuje se, že celková hladina váženého akustického výkonu se ve všech případech neodlišuje více než o 1 dB. V rámci jednotlivých metod jsou potom odchylky v řádu desetin decibelu.

Provedená porovnání ukazují, že výsledky všemi metodami jsou použitelné, avšak je zřejmá citlivost na volbu měřicích bodů. Z toho důvodu se jeví jako účelné pro výpočet akustického výkonu používat metodu měření akustické intenzity, resp. její mapování. Přitom se ukazuje, že pro účely stanovení akustického výkonu stačí mapování provádět s hrubším krokem, tedy v rastru 60 x 60 cm.

Všechna další měření tedy budou realizovaná metodou měření akustické intenzity v rastru 30 x 30 cm z důvodu lokalizace zdrojů hluku, výběr bodů ve zjednodušeném rastru 60 x 60 cm pak bude využitý pro výpočet hladiny akustického výkonu jako veličiny charakterizující hlučnost transformátoru.

Zjišťování tvarů kmitů je podstatným doplněním metody lokalizace zdrojů zvuku a přináší zásadní informace o rozložení zdrojů zvuku pomocí rozložení míst s dominantními vibracemi.

13. Literatura

- [1] ČSN EN 60076-10. Výkonové transformátory - Část 10: Stanovení hladin hluku.
- [2] ČSN IEC 60076-10-1. Výkonové transformátory - Část 10-1: Stanovení hladin hluku - Směrnice pro používání.
- [3] ČSN ISO 9614-1. Akustika – Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity – Část 1: Měření v bodech.
- [4] 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.
- [5] TUREČEK, O. Realizace a porovnání metod měření akustického výkonu. ZČU v Plzni. Výzkumná zpráva. 2008.

Příloha 1: Technická specifikace transformátoru použitého pro ověření metody lokalizace zdrojů hluku

TECHNICKÁ SPECIFIKACE

Trojfázový olejový blokovaný transformátor

Zákazník:	Slovenské Elektrárny a.s., pro Lipovec	Provedení	venkovní
R.č.:	99-02938/42	Počet kusů	1
Základní technické parametry:			
Typ:		E29M-0	
Provedení dle:		STN EN 60076	
VN		NN	
Výkon [MVA]	16		16
Napětí [kV]	121		10,5
Proud [A]	76,5		880
Počet stupňů (±) krok		2 2,50%	
Upm	123		12
L _I	550		75
AC	230		28
ACn	95		-
Počet fází		3	
Frekvence	50		Hz
Napětí nakrátko	10,5	%	tolerance +-7,5% (pro 16 MVA)
Proud naprázdno	0,5	%	tolerance +30%
Skupina spojení		YNd1	
Chlazení	ONAN/ONAF	:(10 / 16 MVA)	Plný výkon na všech odbočkách.
Ventilátory jsou spouštěny podle teploty oleje v horní vrstvě			
Ztráty:	Po [kW]	Pk [kW]	Pcelk [kW]
17	90		107
tolerance	max.	max.	max.
Hladina akustického tlaku:		< 65 dB(A)	
Dovolené oteplení:	Olej horní vrstva	60	K
Vinutí střední	65		K
Max.teplota okolí:	40		°C
Max.nadmořská výška:	1000		m.n.m.
Magnetický obvod z orientovaných plechů; šikmé řezy			
Vinutí :		měděné	
Olej:		splňuje podmínky normy IEC 296, inhibovaný, neobsahuje PCB	
Přepínací zařízení :		- bez mechanického přepínače.	
Přepojování odboček na straně 121 kV realizováno pomocí klem umístěných pod víkem transformátoru.			
Transformátor přepojován ve vypnutém stavu.			
Připojení průchodek:			
napětí	typ		připojení
121	kV	kondenzátorová	lany
10,5	kV	porcelánová	pasovinou
121 kV nulový bod	porcelánová		přímo uzemněn
Transformátor bude vybaven svorkovou skříní			

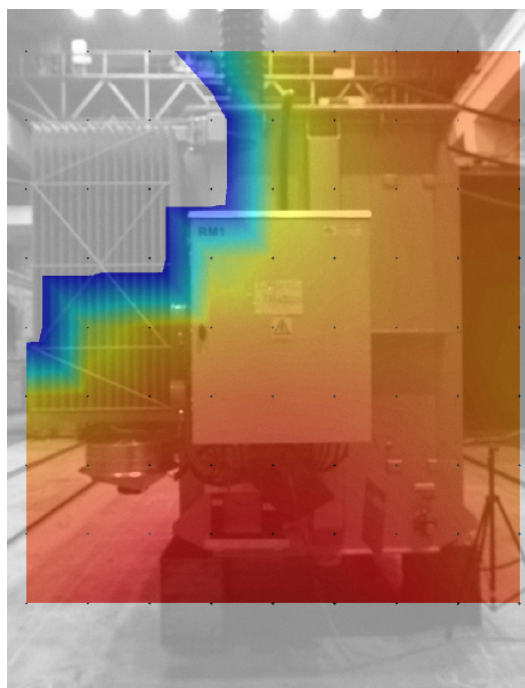
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 1

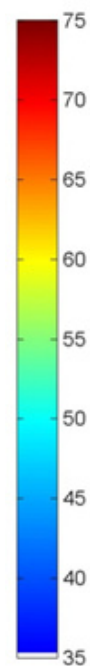
80 Hz



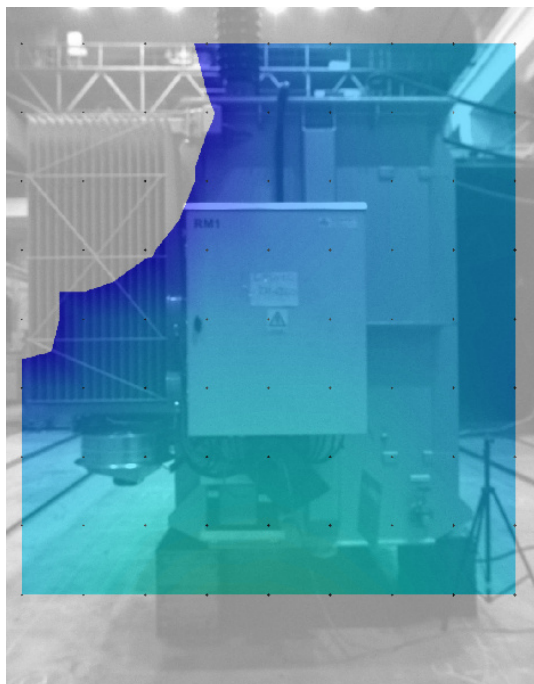
100 Hz



dB



125 Hz



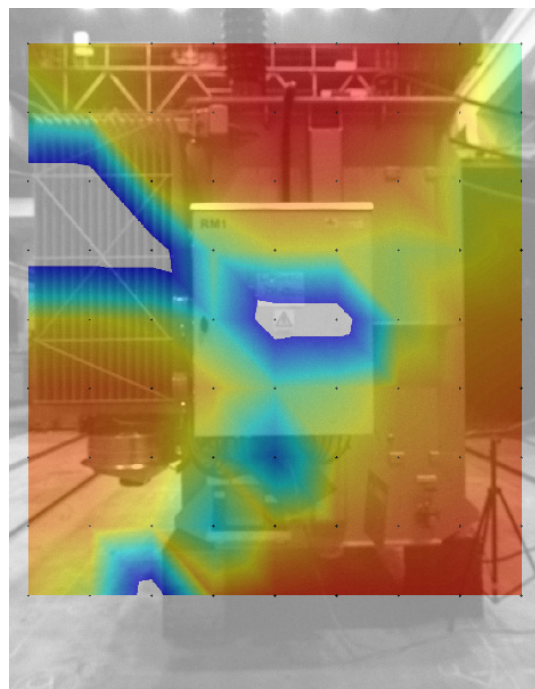
160 Hz



Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 1

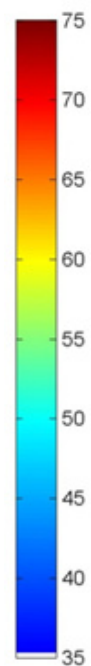
200 Hz



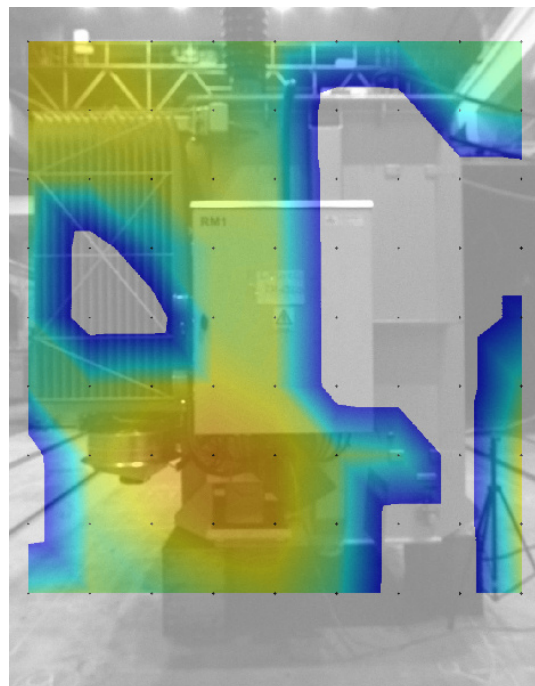
250 Hz



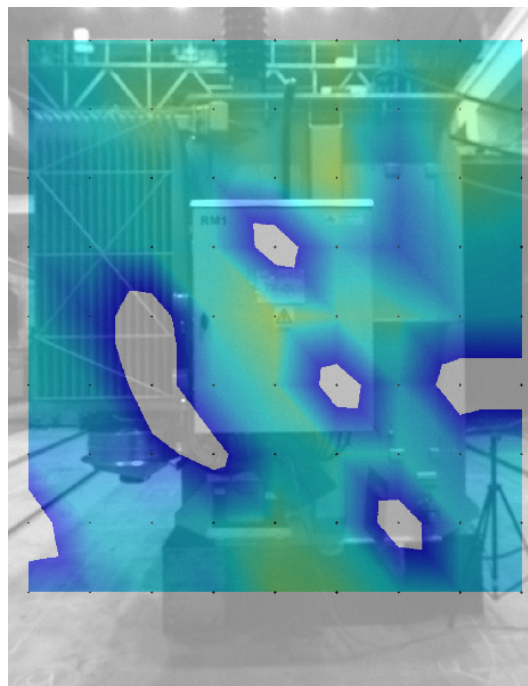
dB



315 Hz



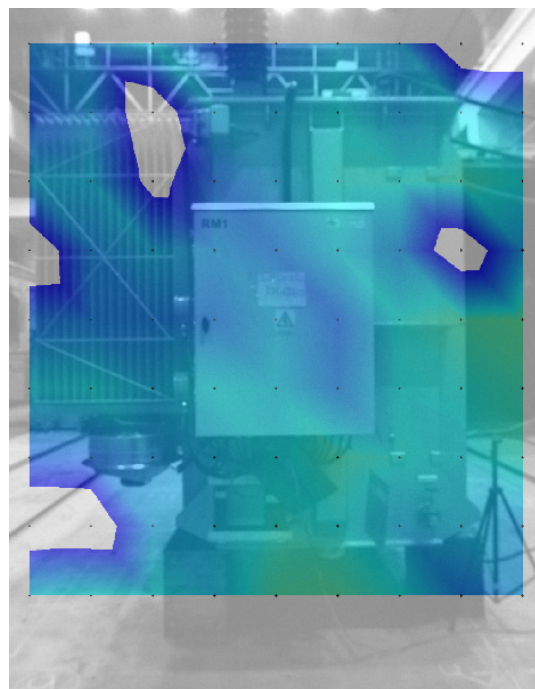
400 Hz



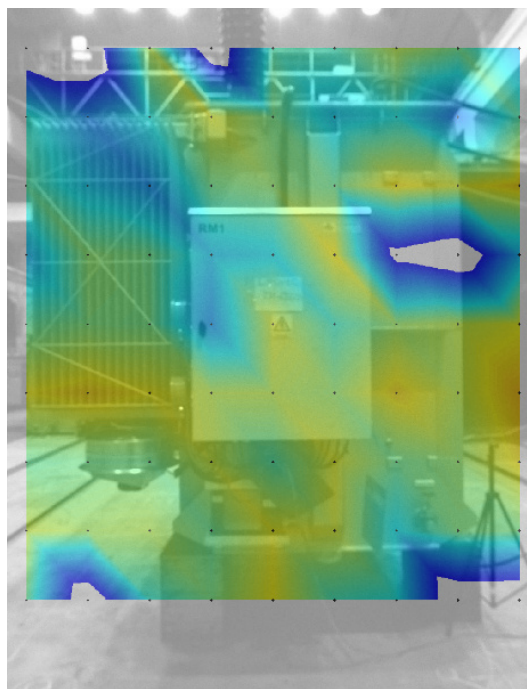
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 1

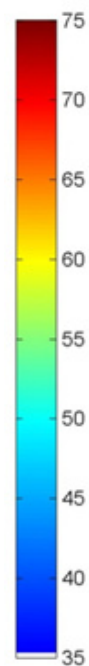
500 Hz



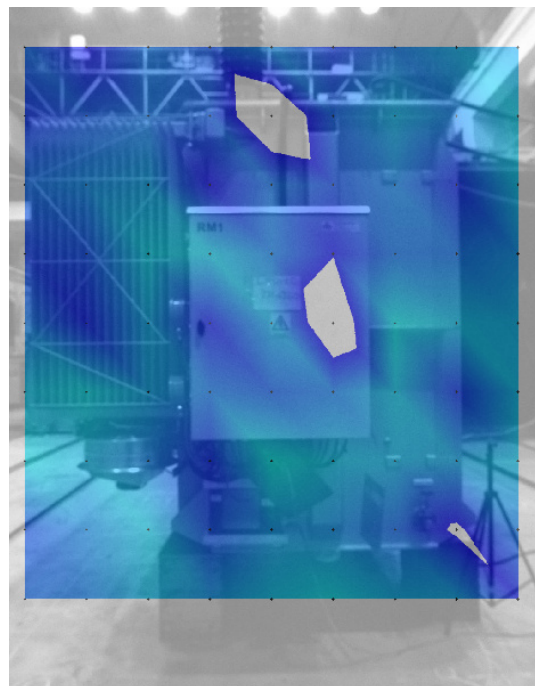
630 Hz



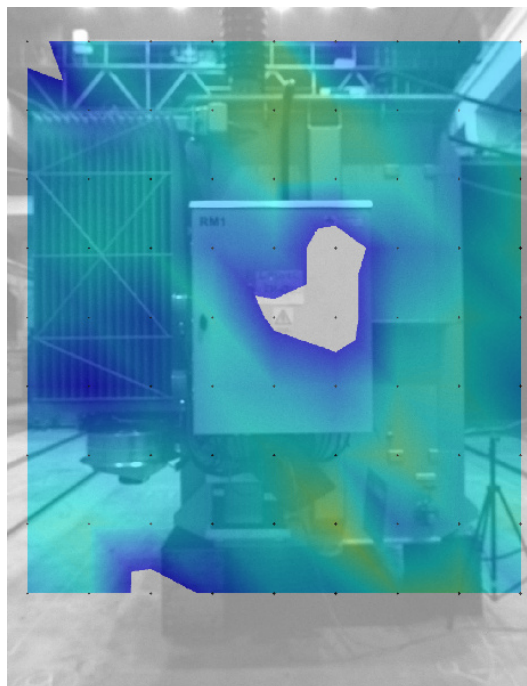
dB



800 Hz



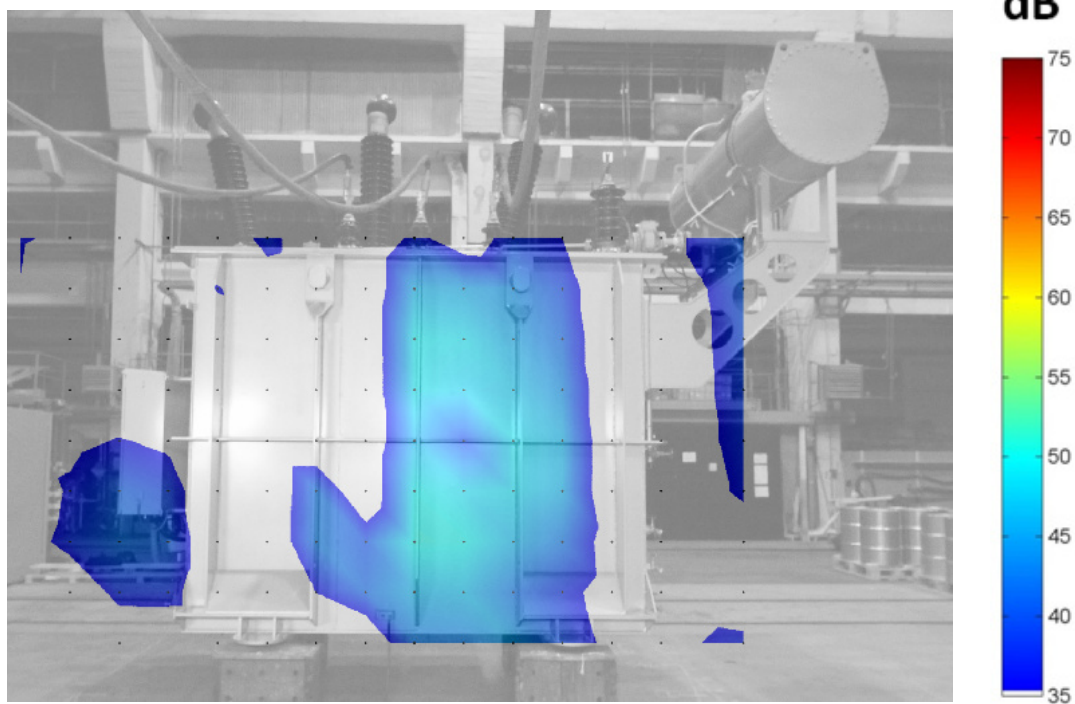
1000 Hz



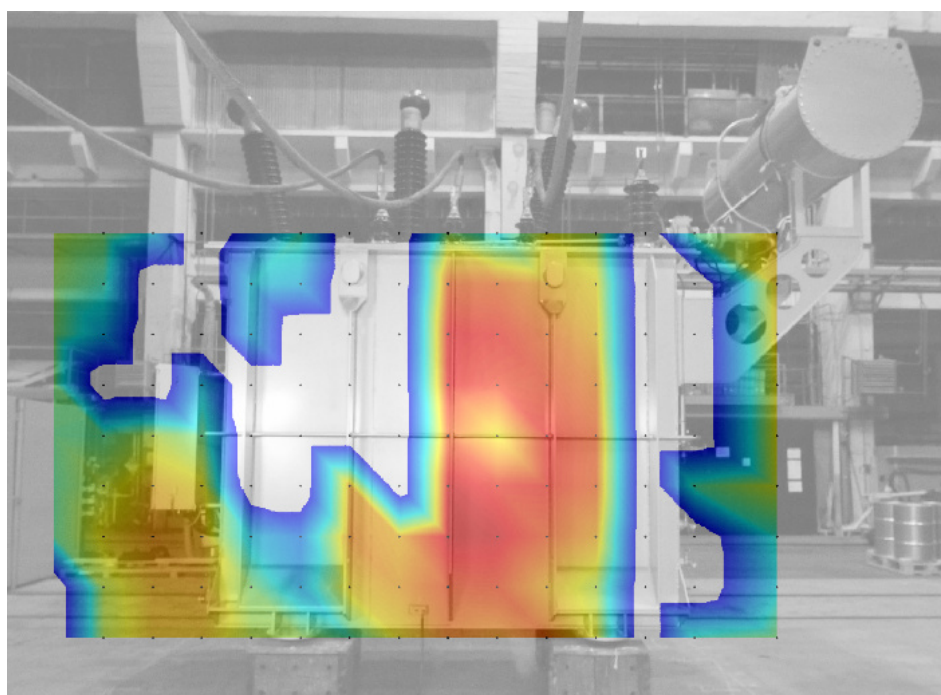
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 2

80 Hz



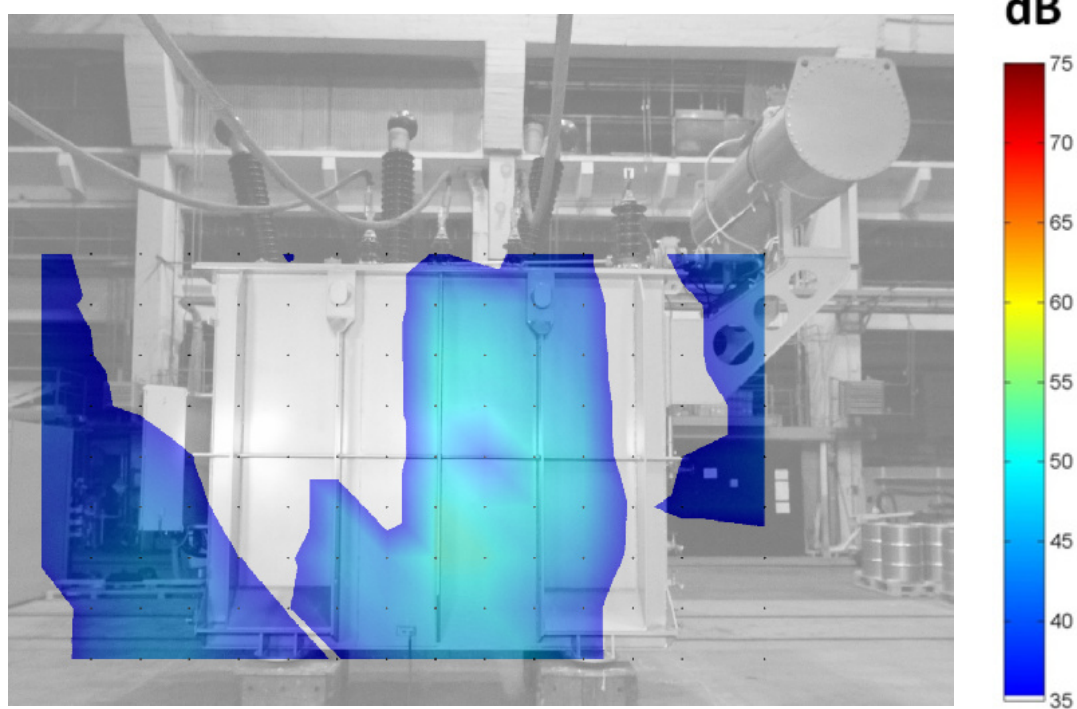
100 Hz



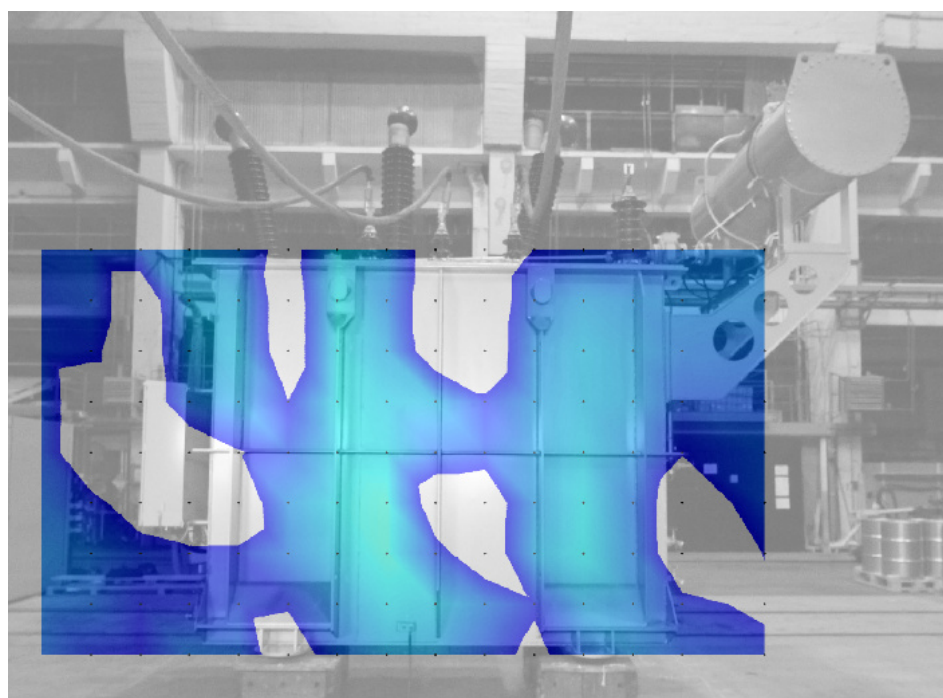
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 2

125 Hz



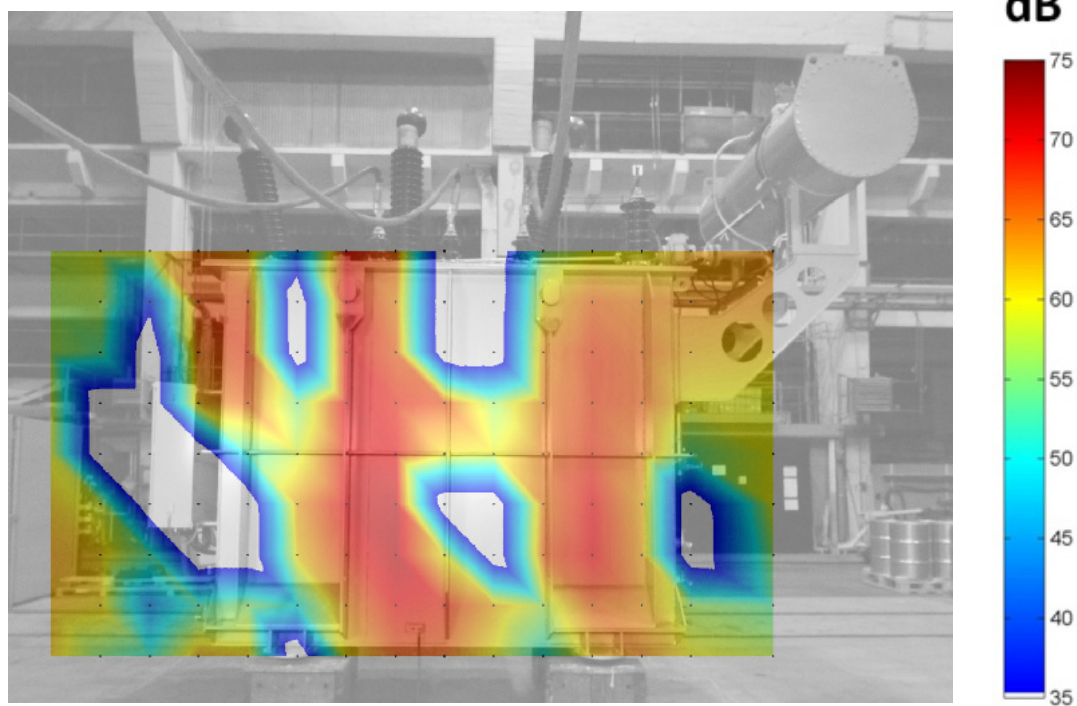
160 Hz



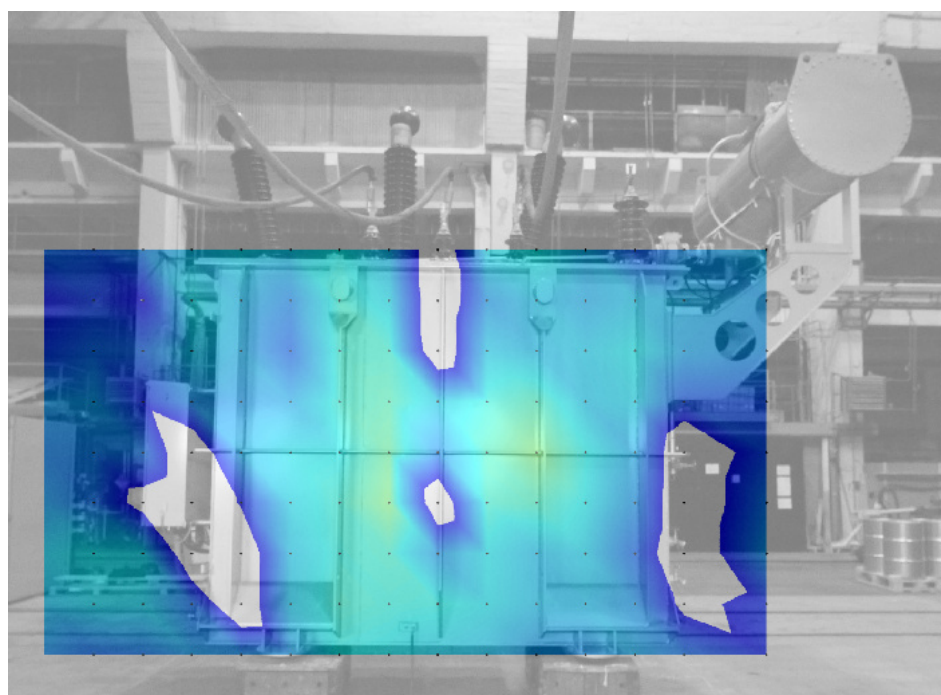
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 2

200 Hz



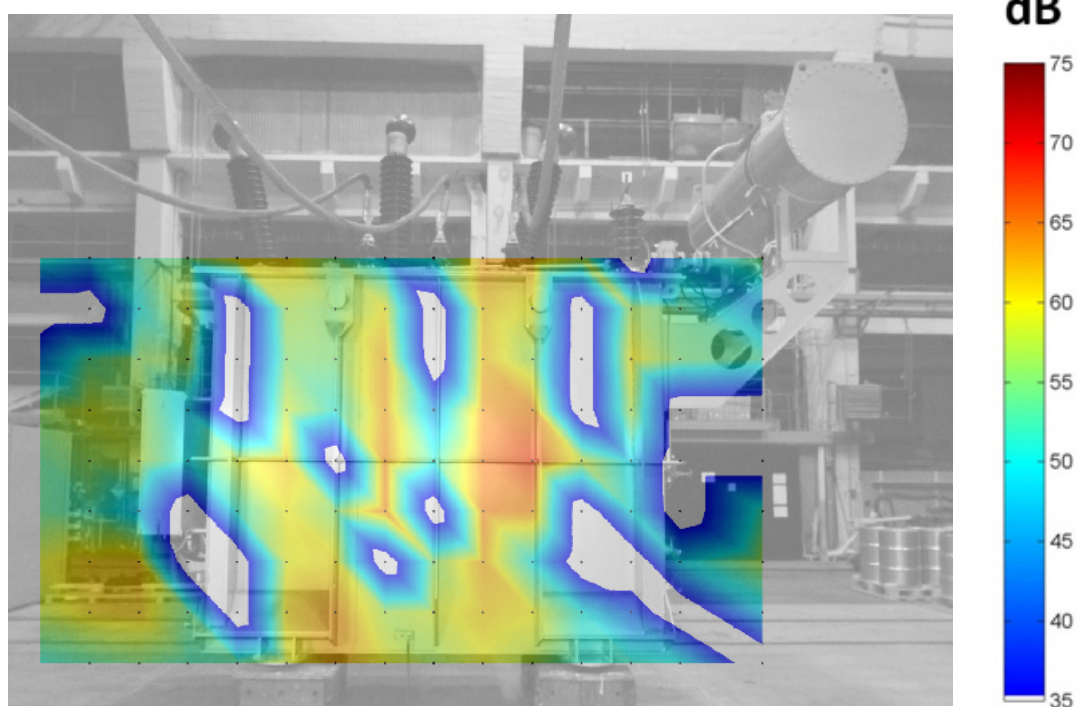
250 Hz



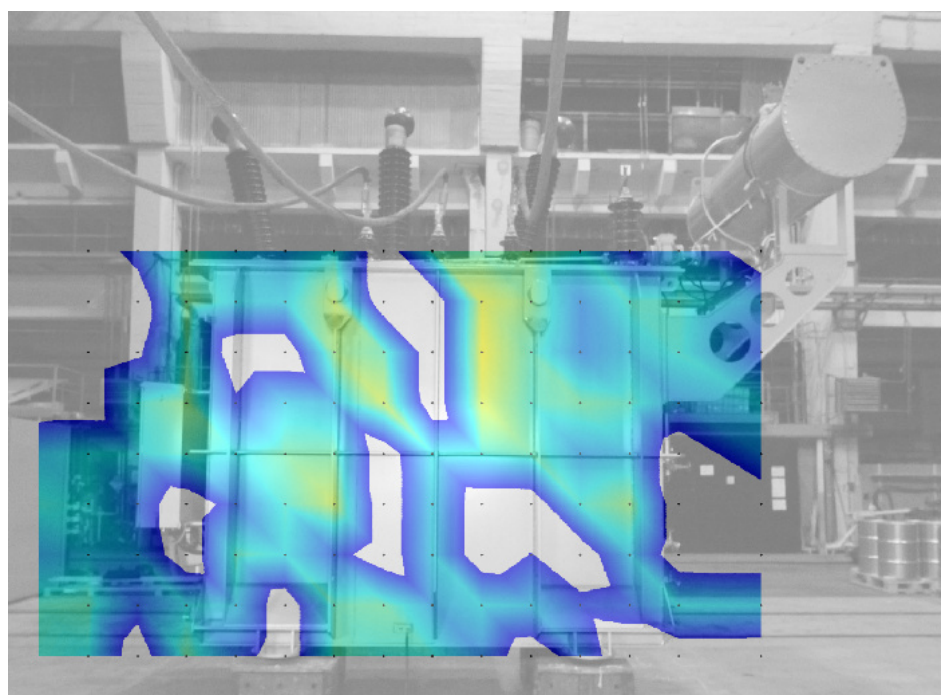
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 2

315 Hz



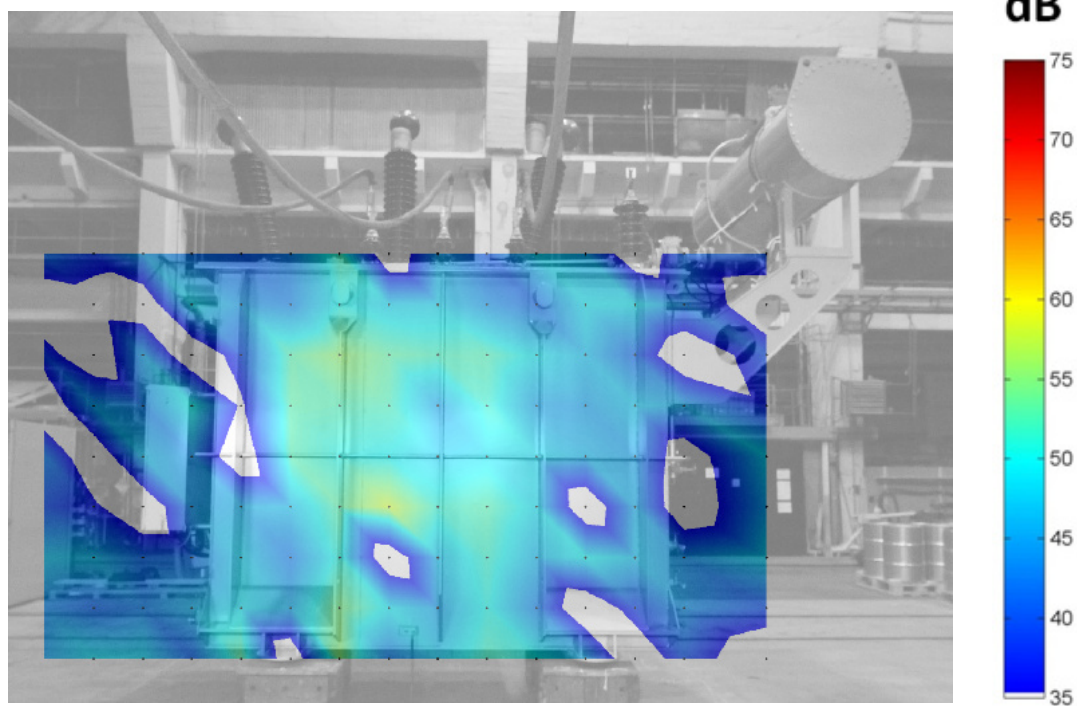
400 Hz



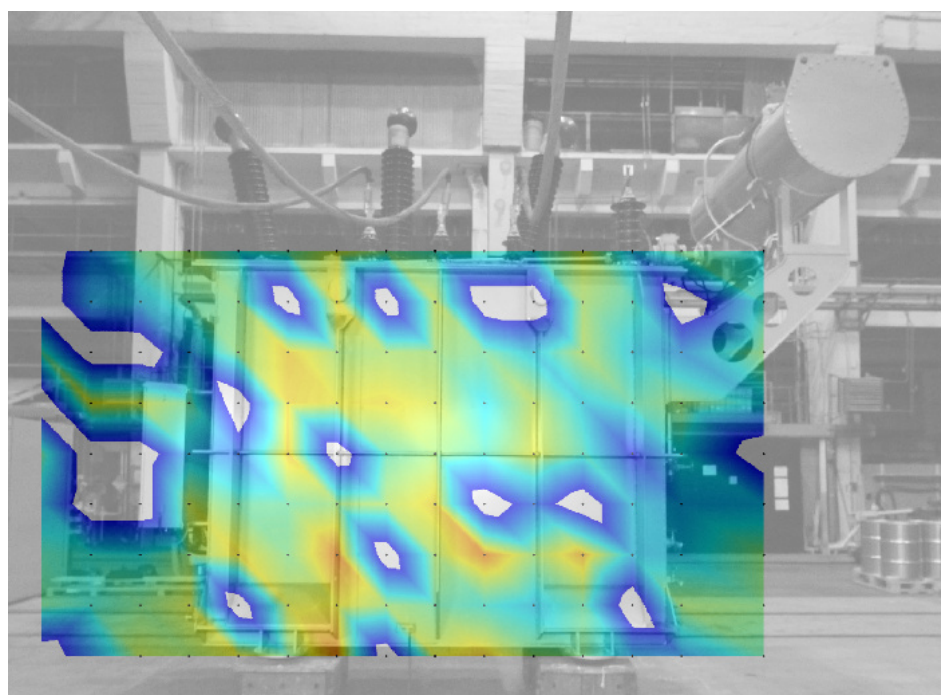
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 2

500 Hz



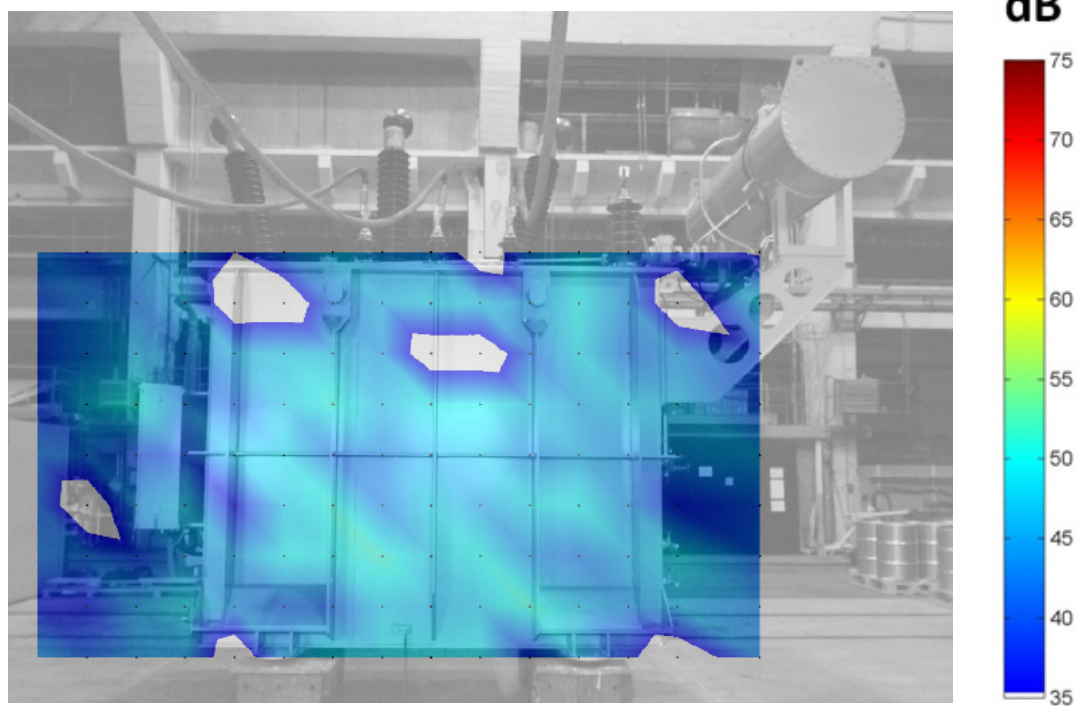
630 Hz



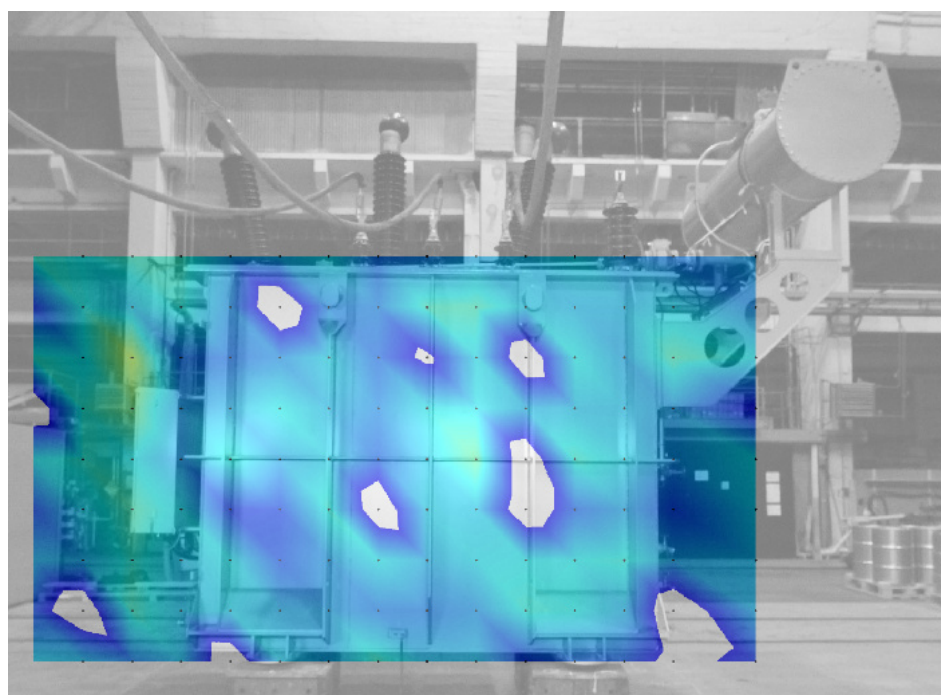
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 2

800 Hz



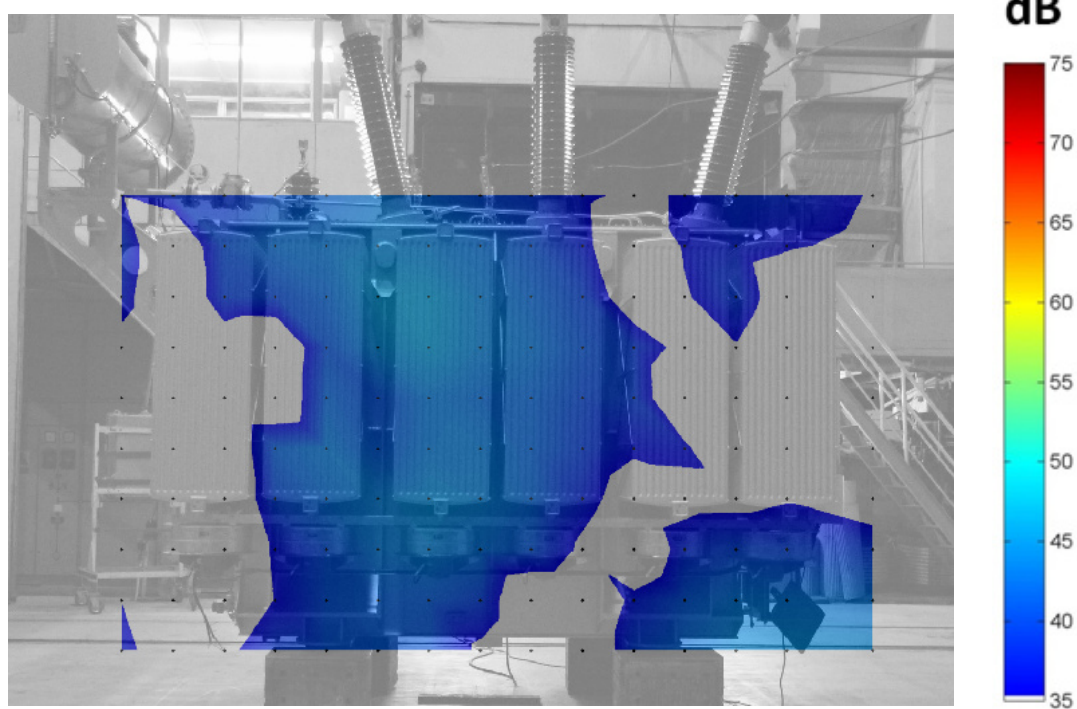
1000 Hz



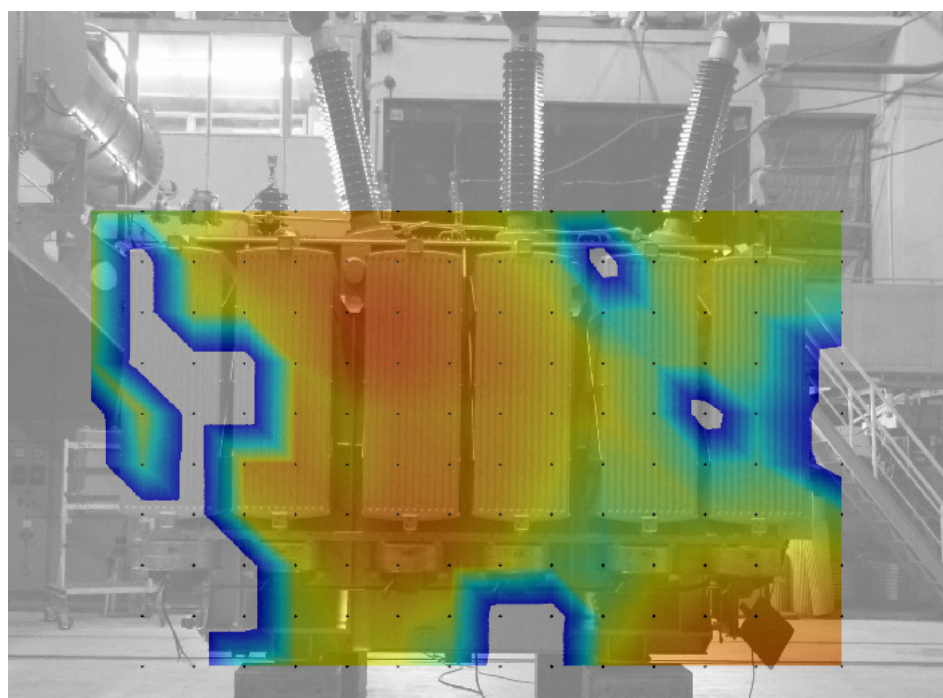
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 3

80 Hz



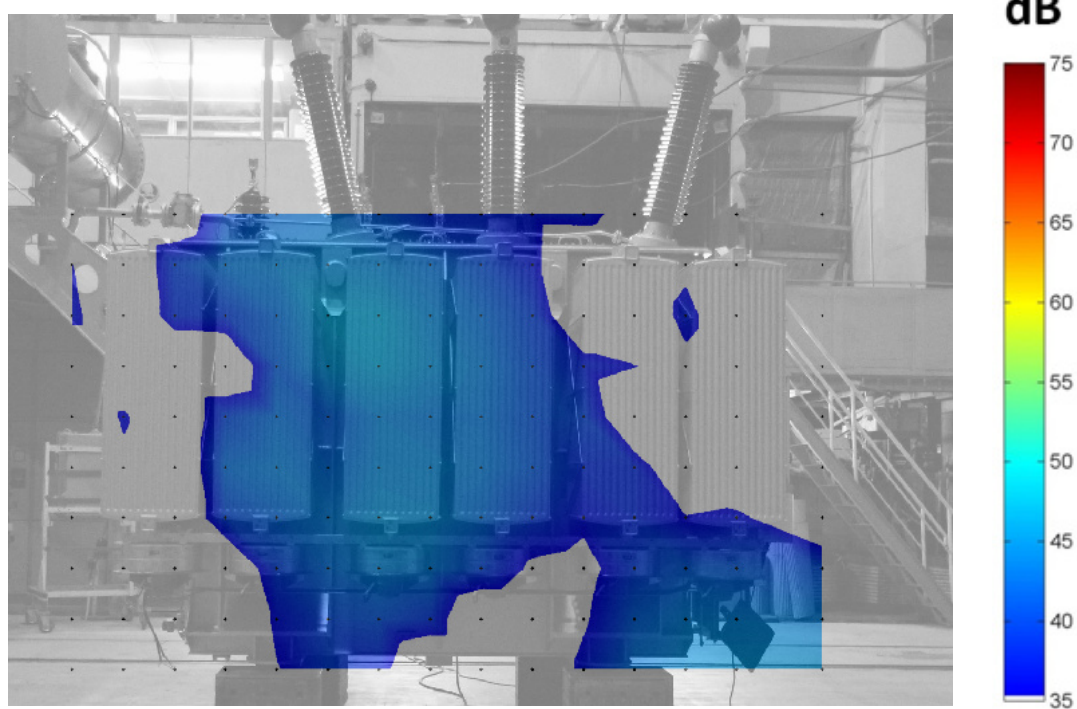
100 Hz



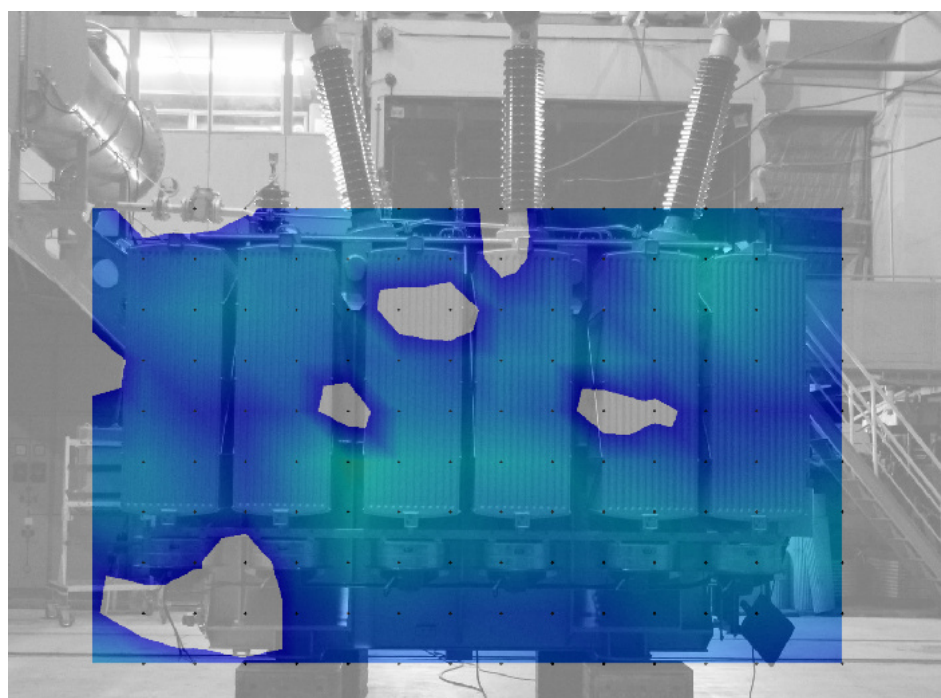
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 3

125 Hz



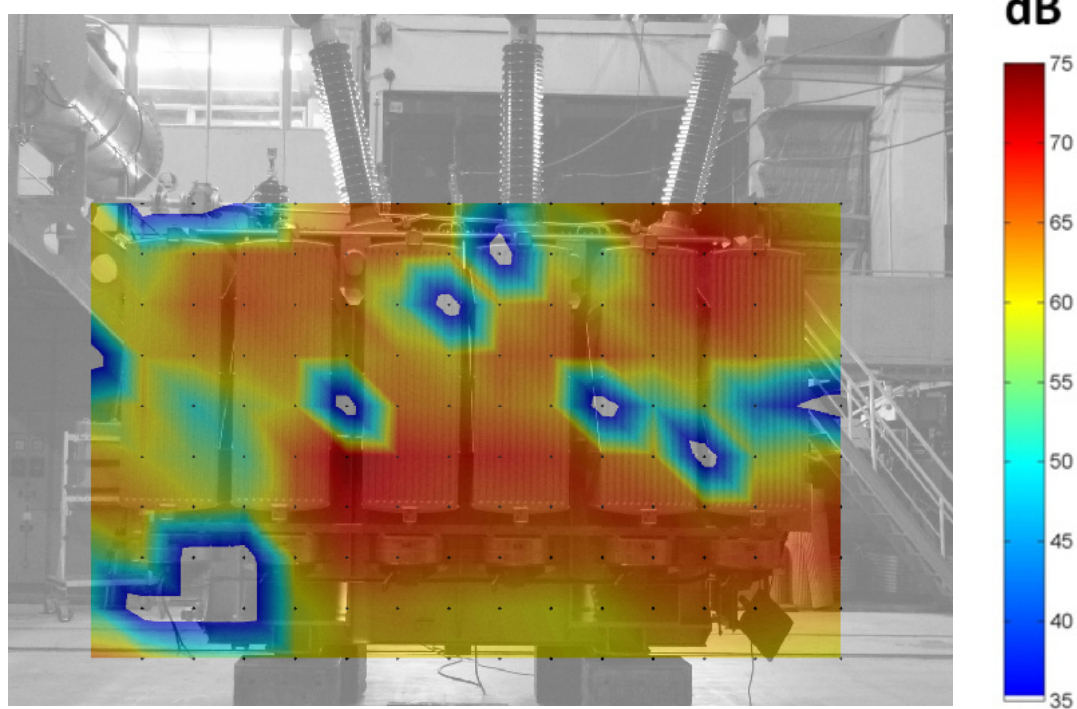
160 Hz



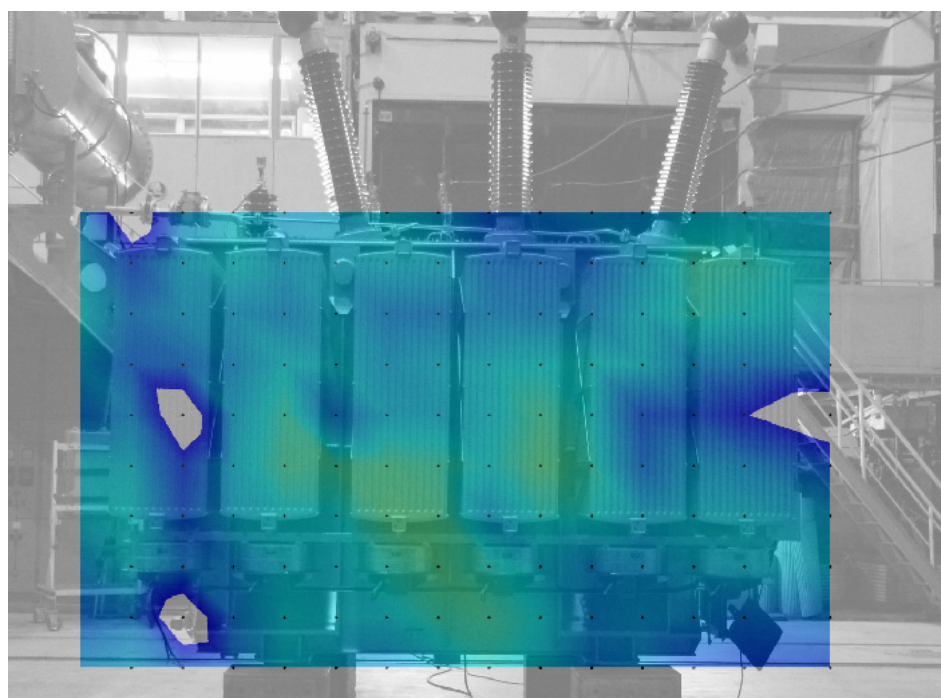
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 3

200 Hz



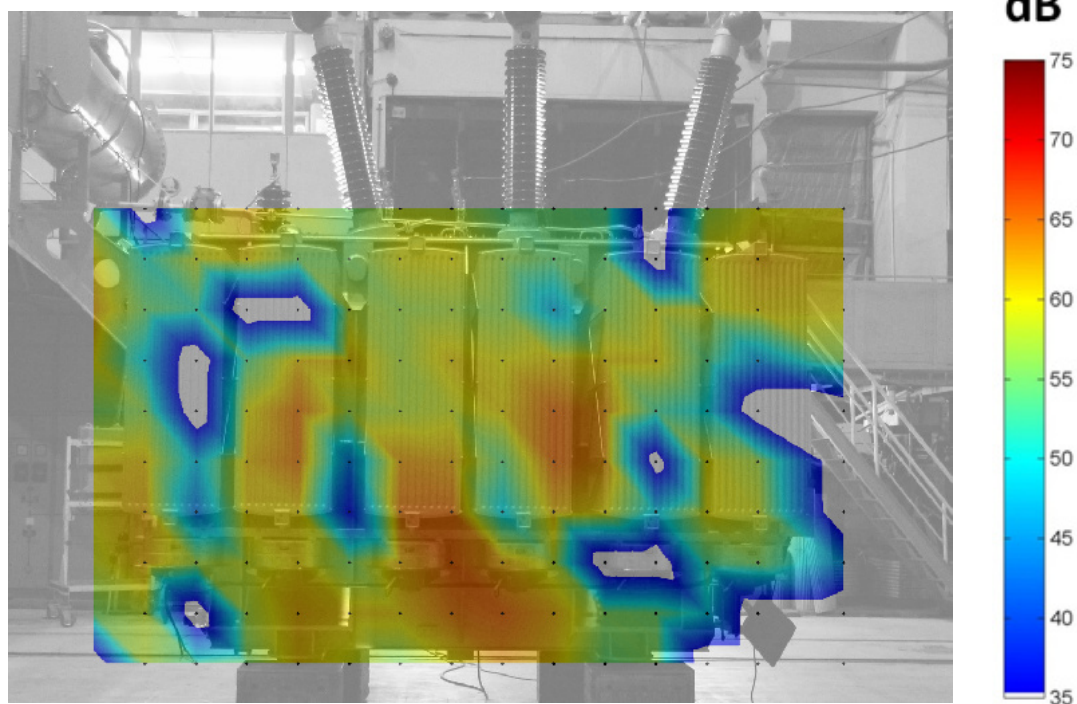
250 Hz



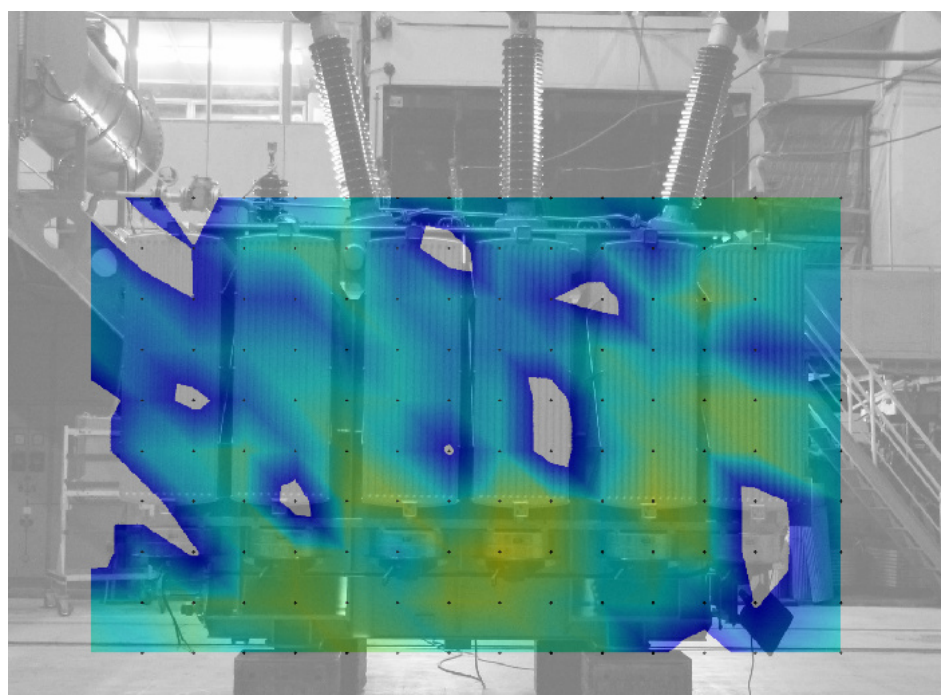
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 3

315 Hz



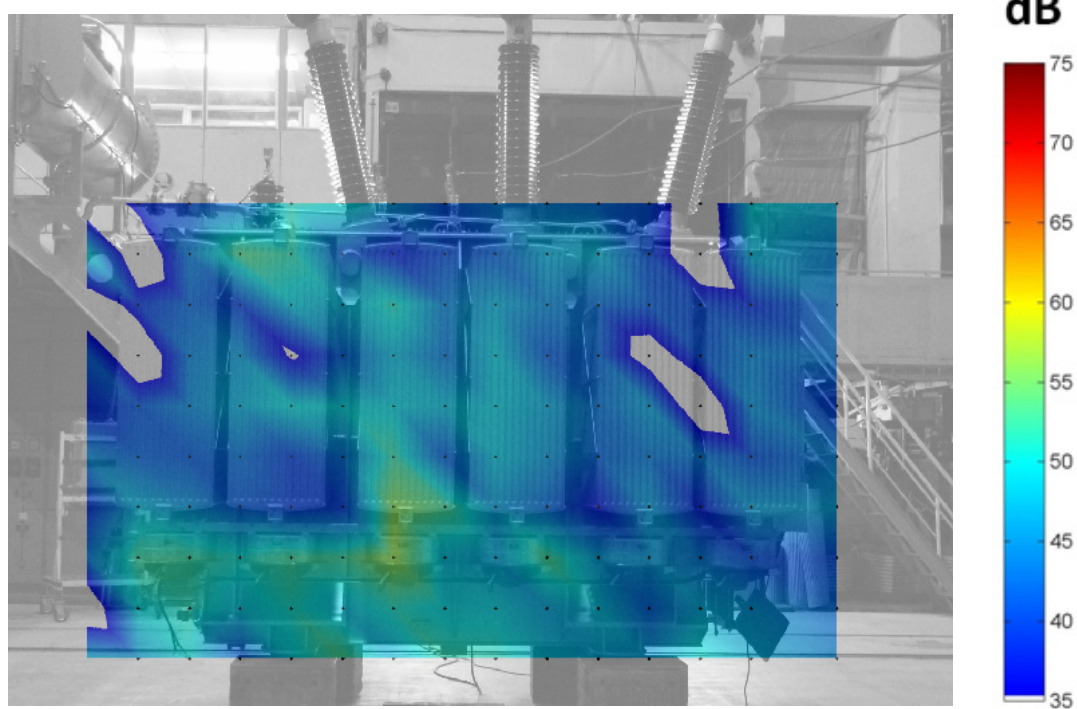
400 Hz



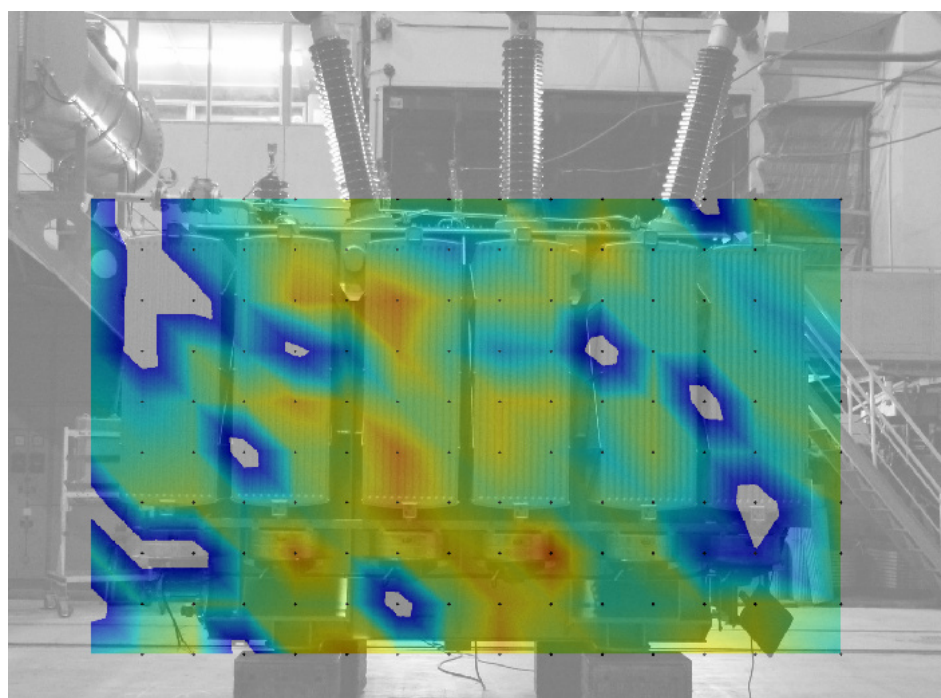
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 3

500 Hz



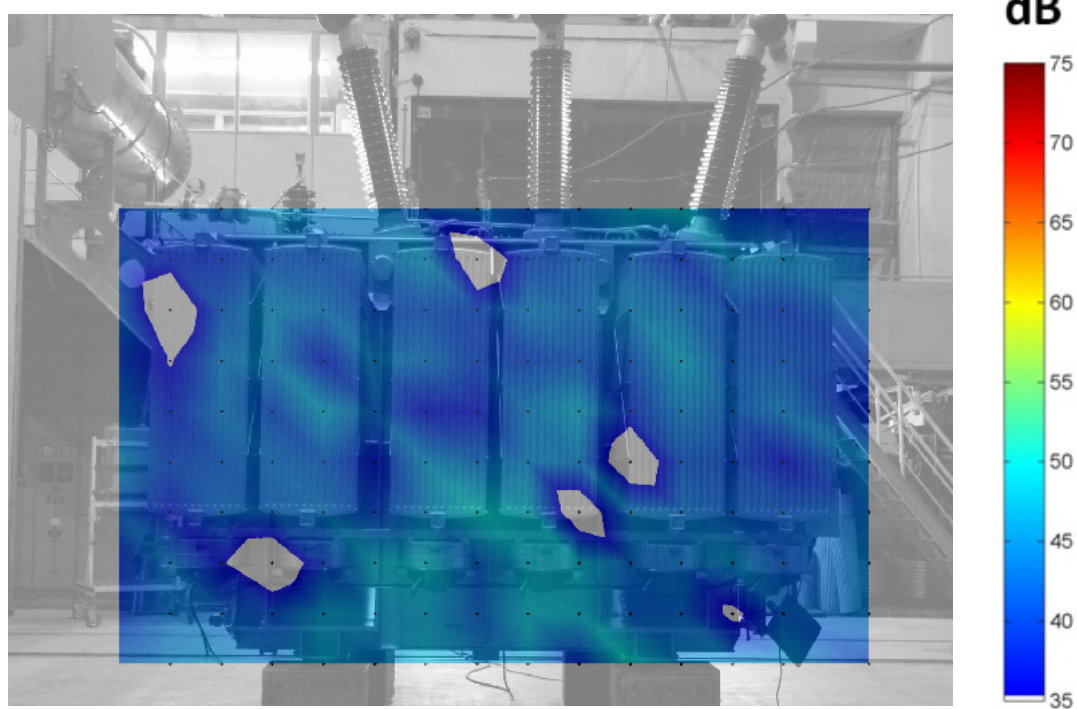
630 Hz



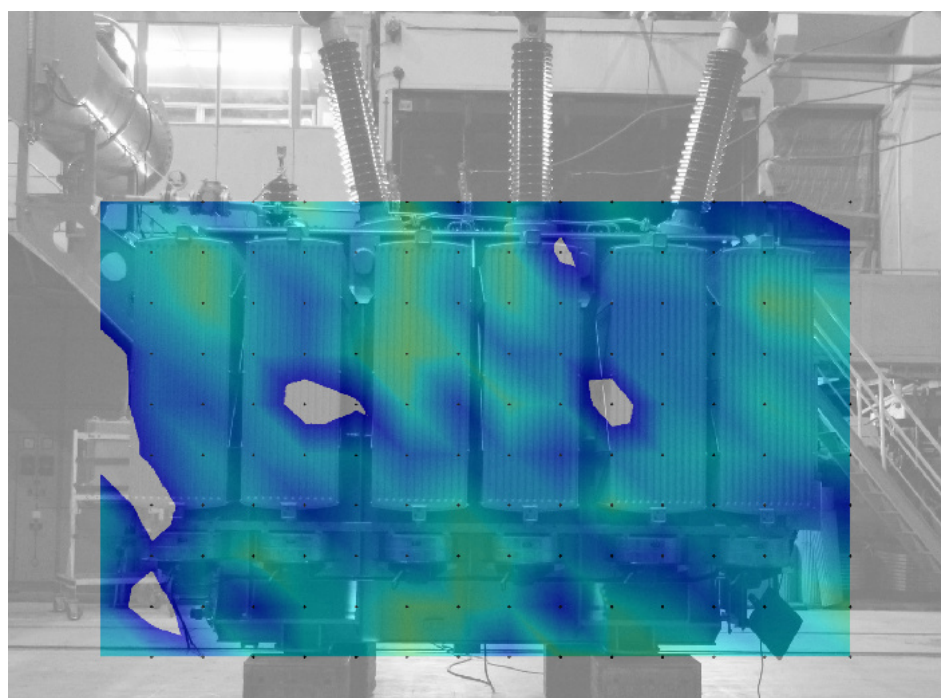
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 3

800 Hz



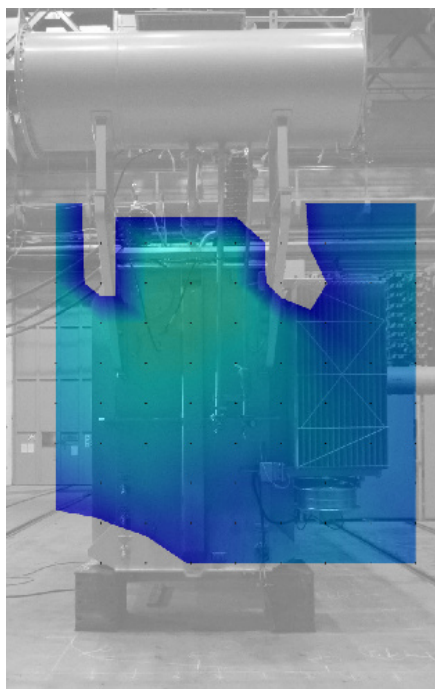
1000 Hz



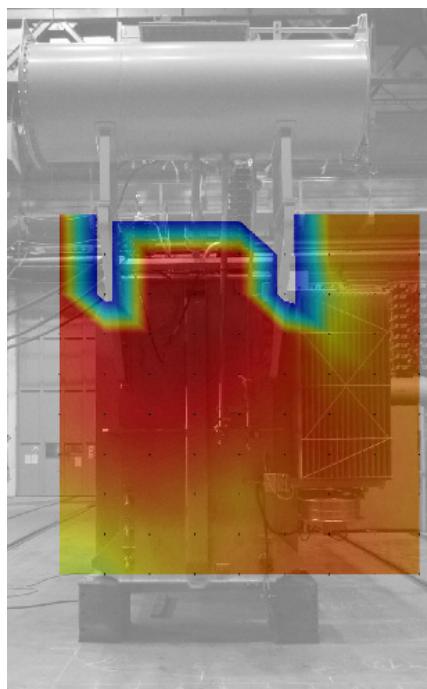
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 4

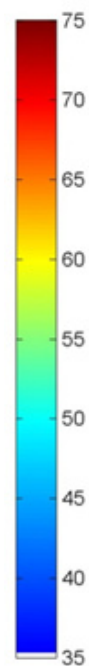
80 Hz



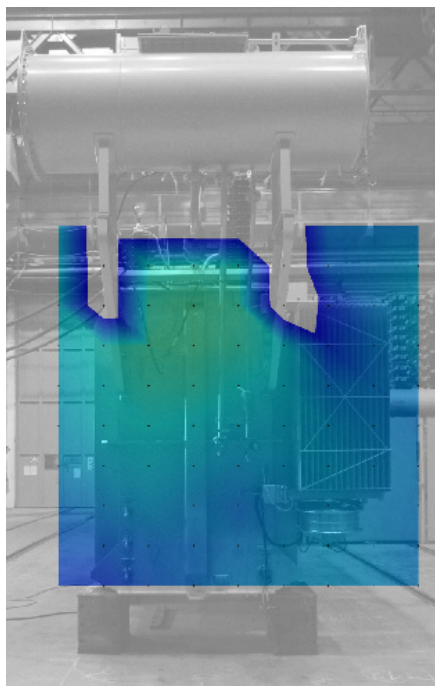
100 Hz



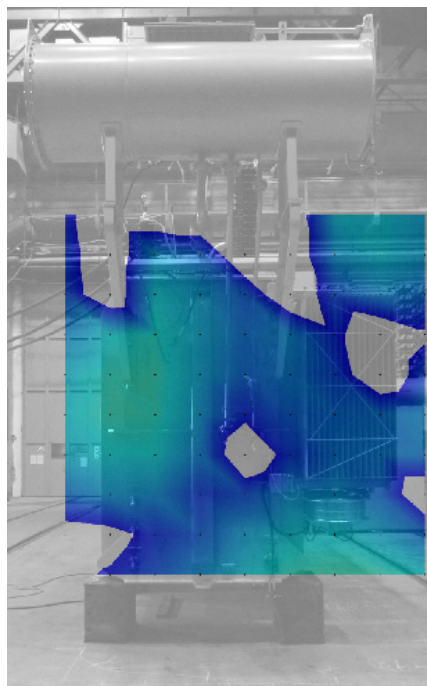
dB



125 Hz



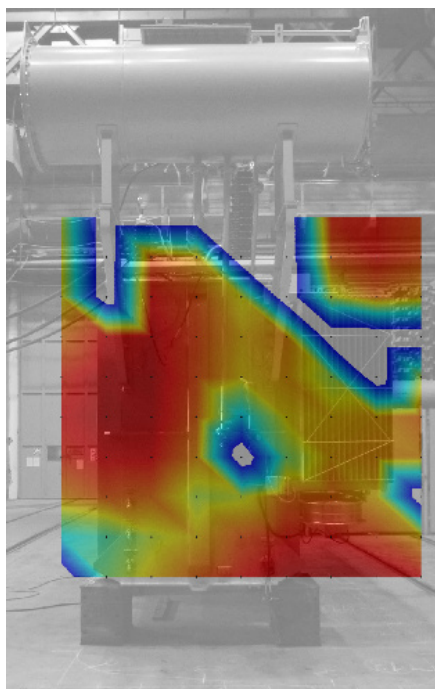
160 Hz



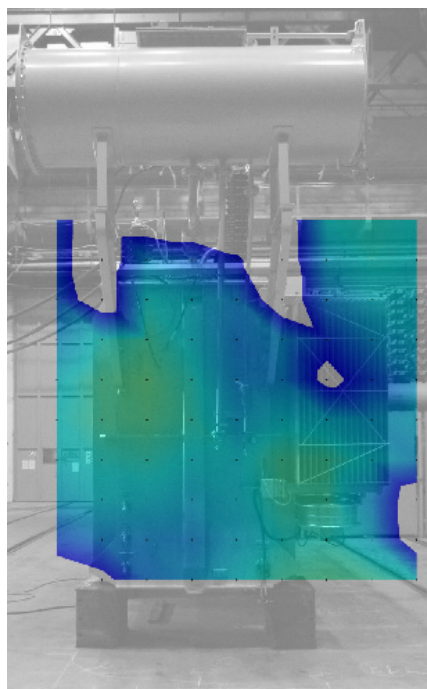
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 4

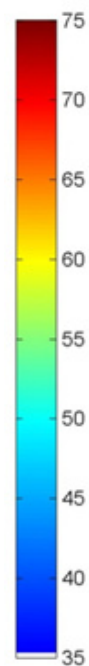
200 Hz



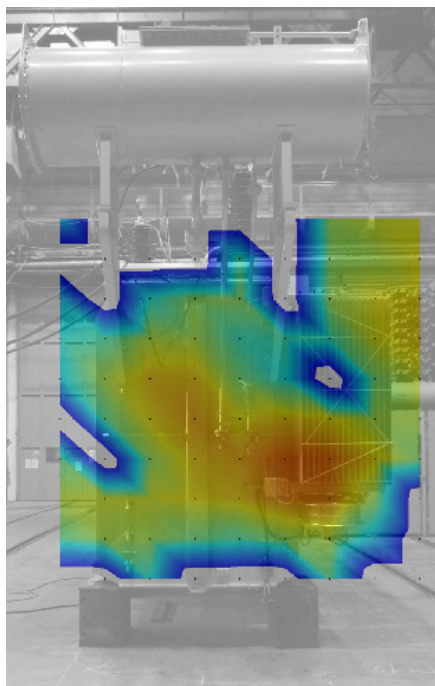
250 Hz



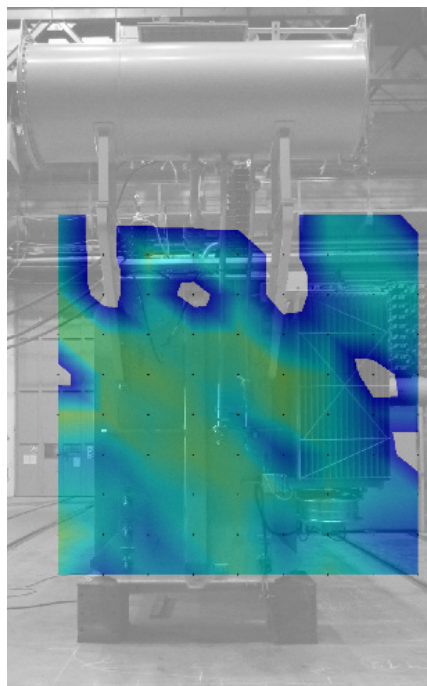
dB



315 Hz



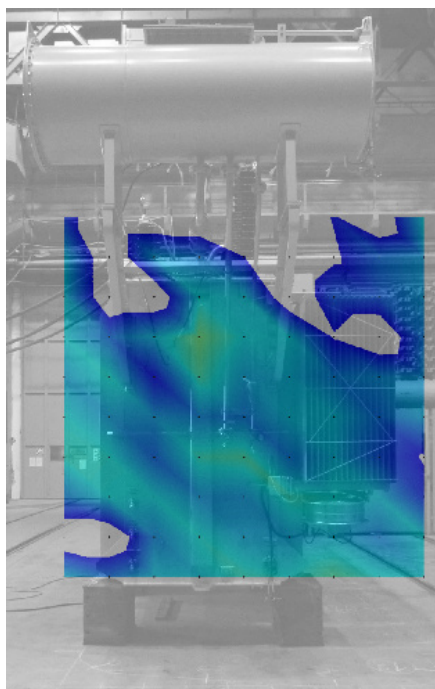
400 Hz



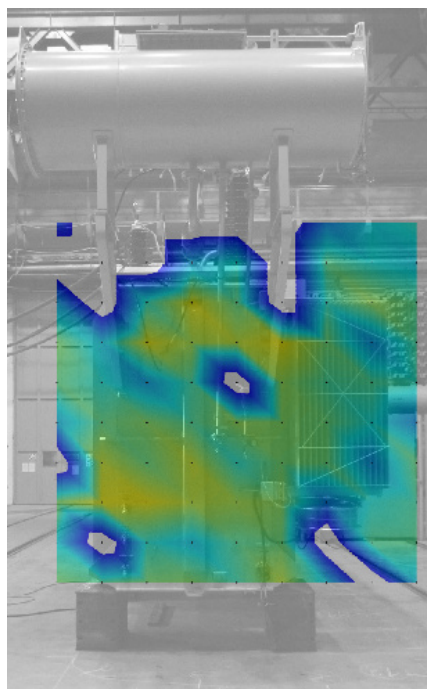
Příloha 2: Rozložení zdrojů hluku stávajícího řešení transformátoru

Strana 4

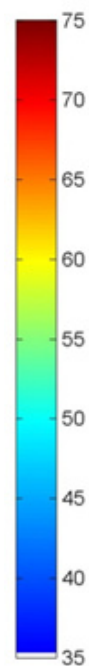
500 Hz



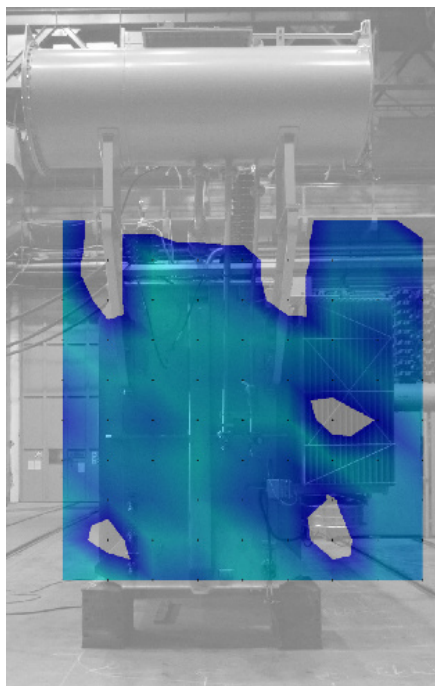
630 Hz



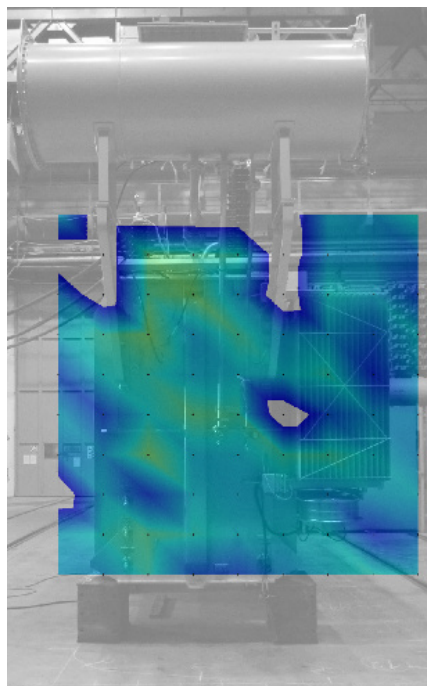
dB



800 Hz

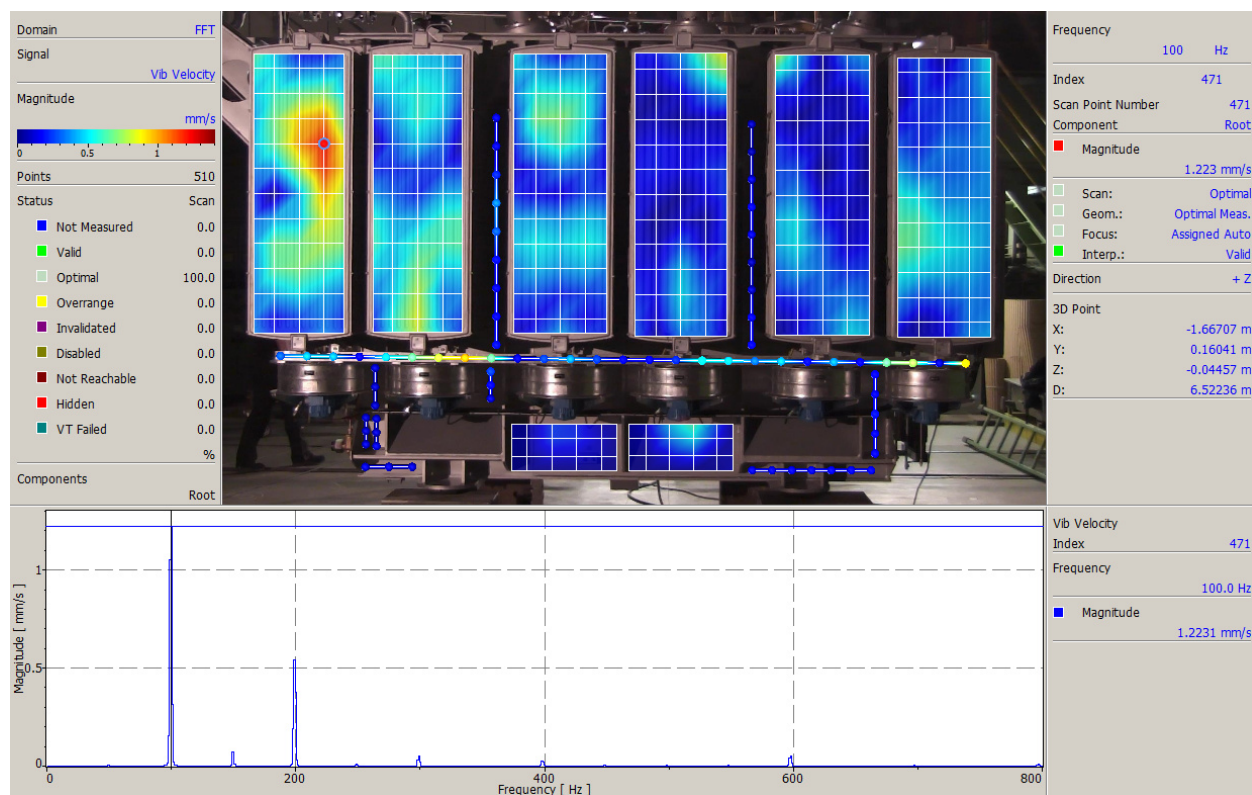


1000 Hz

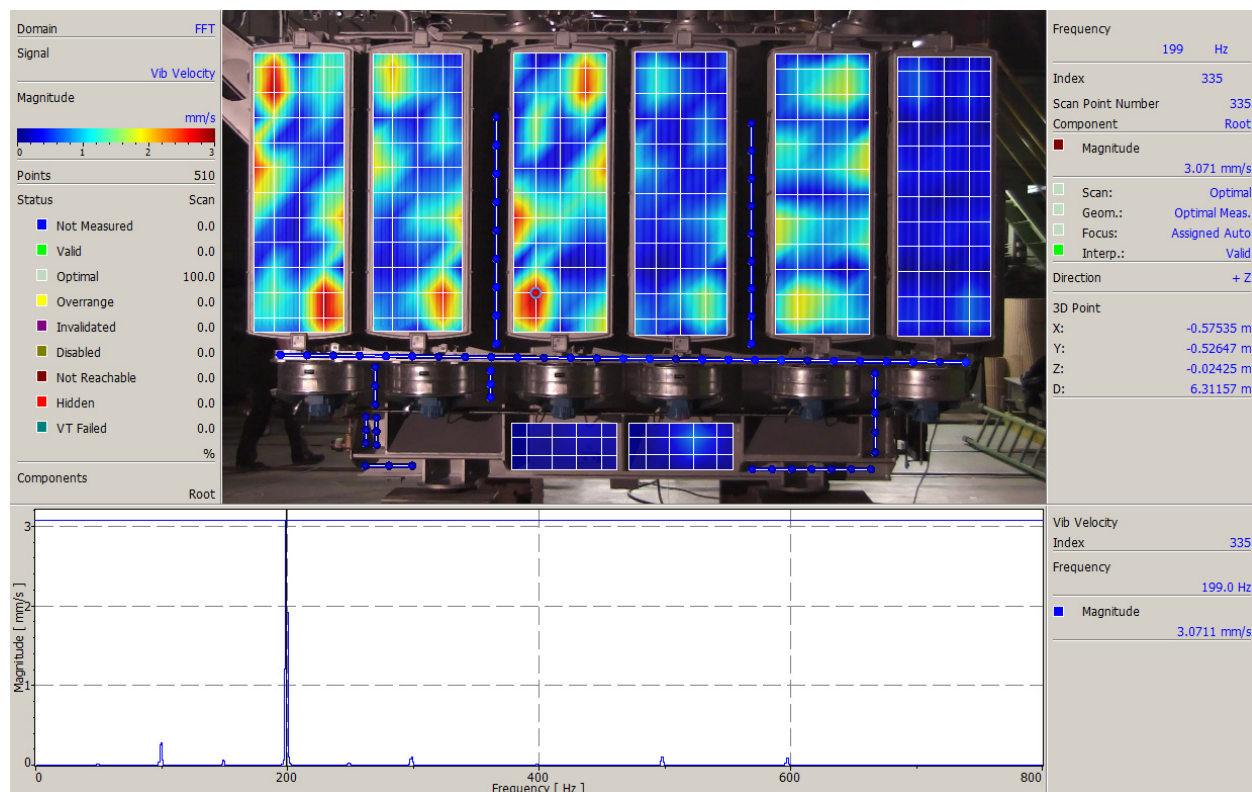


Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

Boční stěna s radiátory

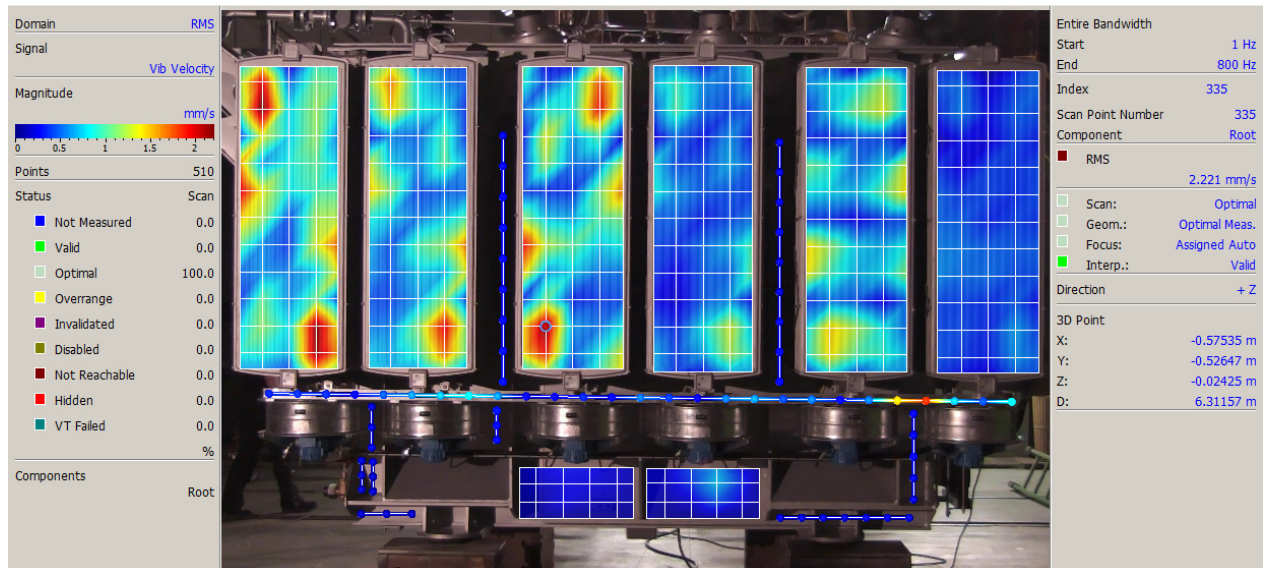


Provozní tvar kmitu na 100 Hz – maximum 1,22 mm/s



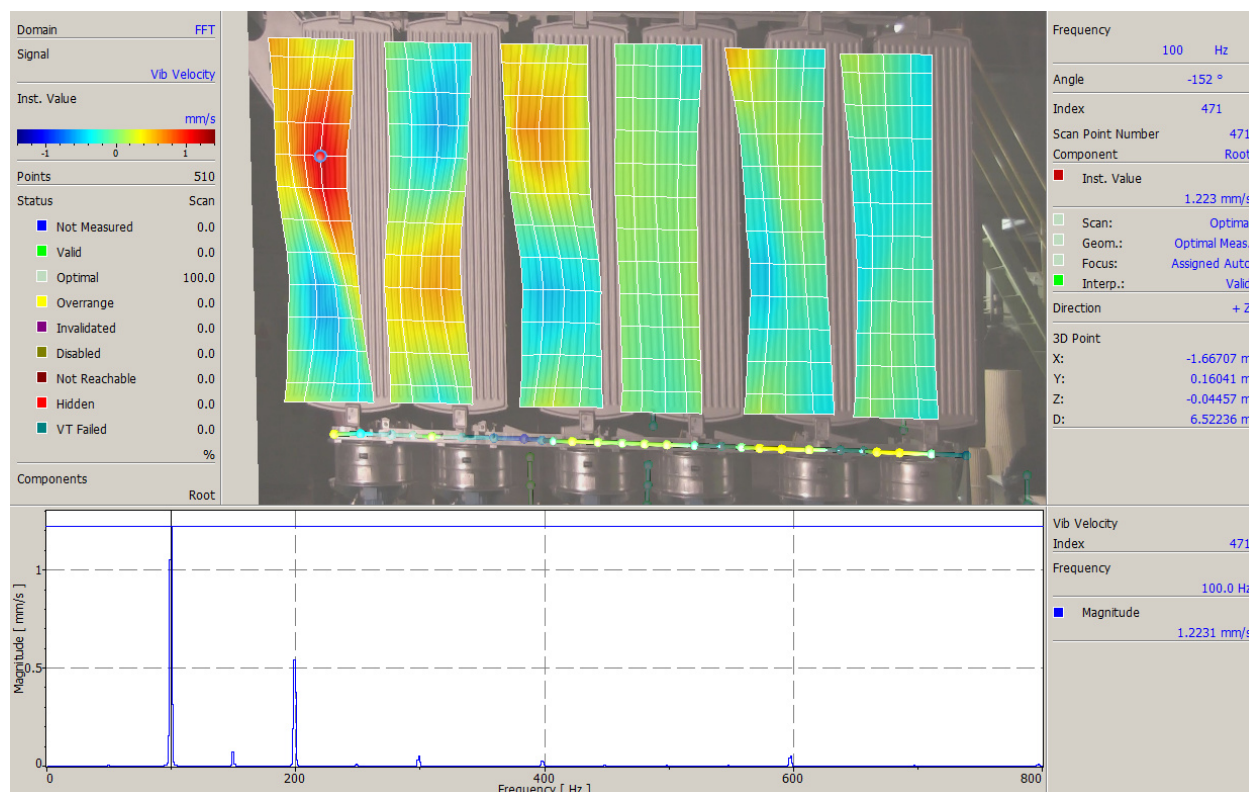
Provozní tvar kmitu na 200 Hz – maximum 3,07 mm/s

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

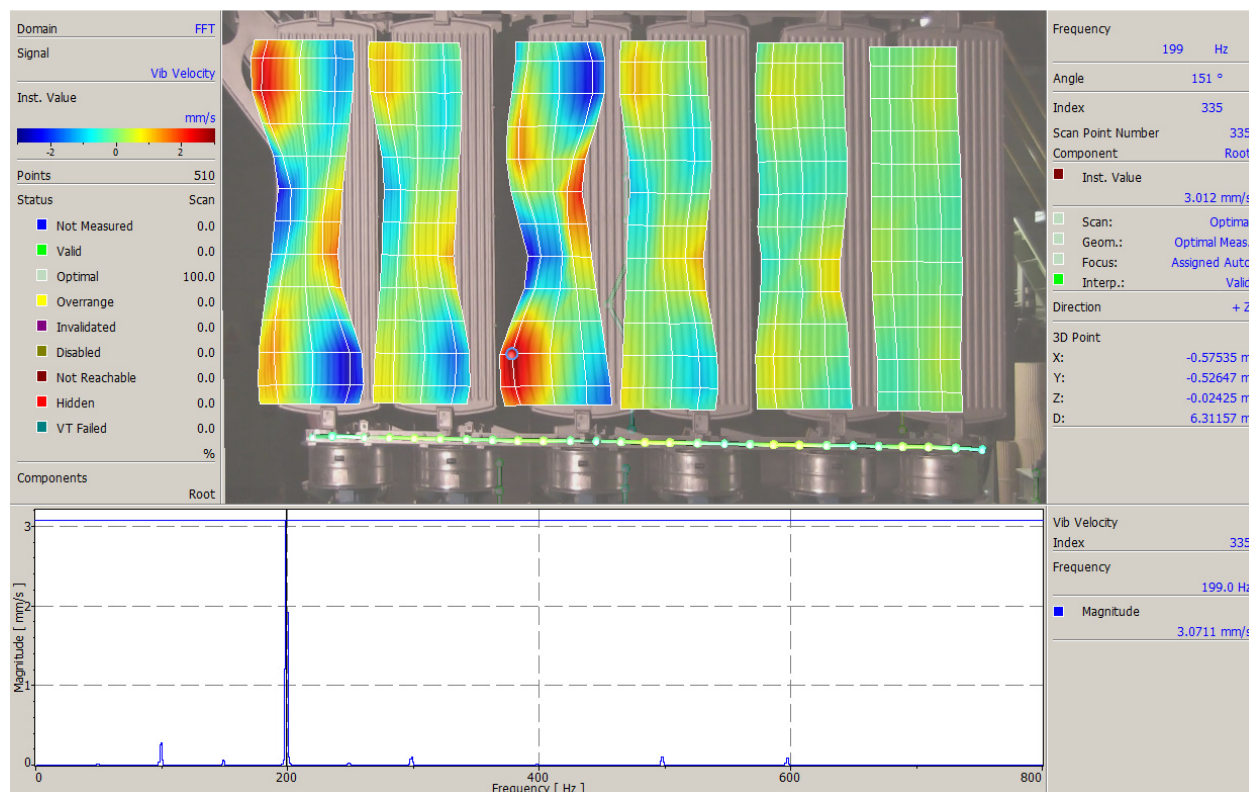


Celkový tvar v pásmu 1-800 Hz, dominantní tvar na frekvenci 200 Hz

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem



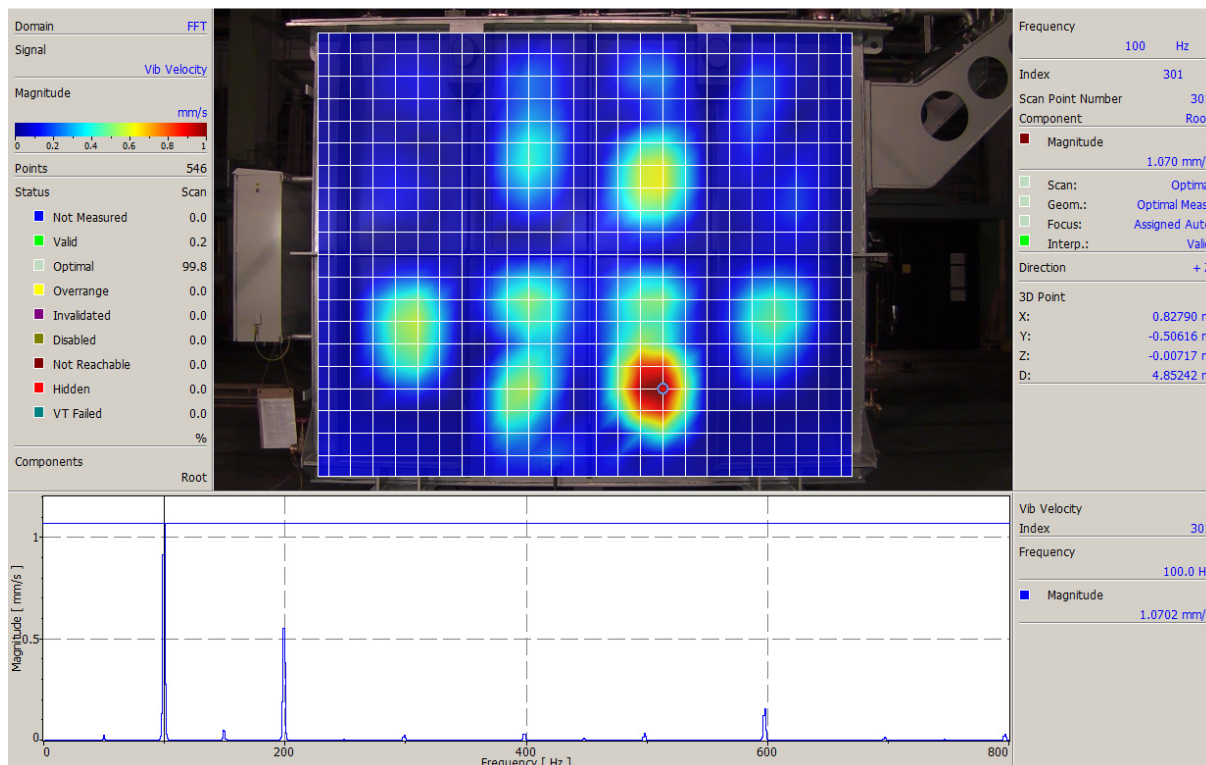
Provozní tvar kmitu na 100 Hz – 3D



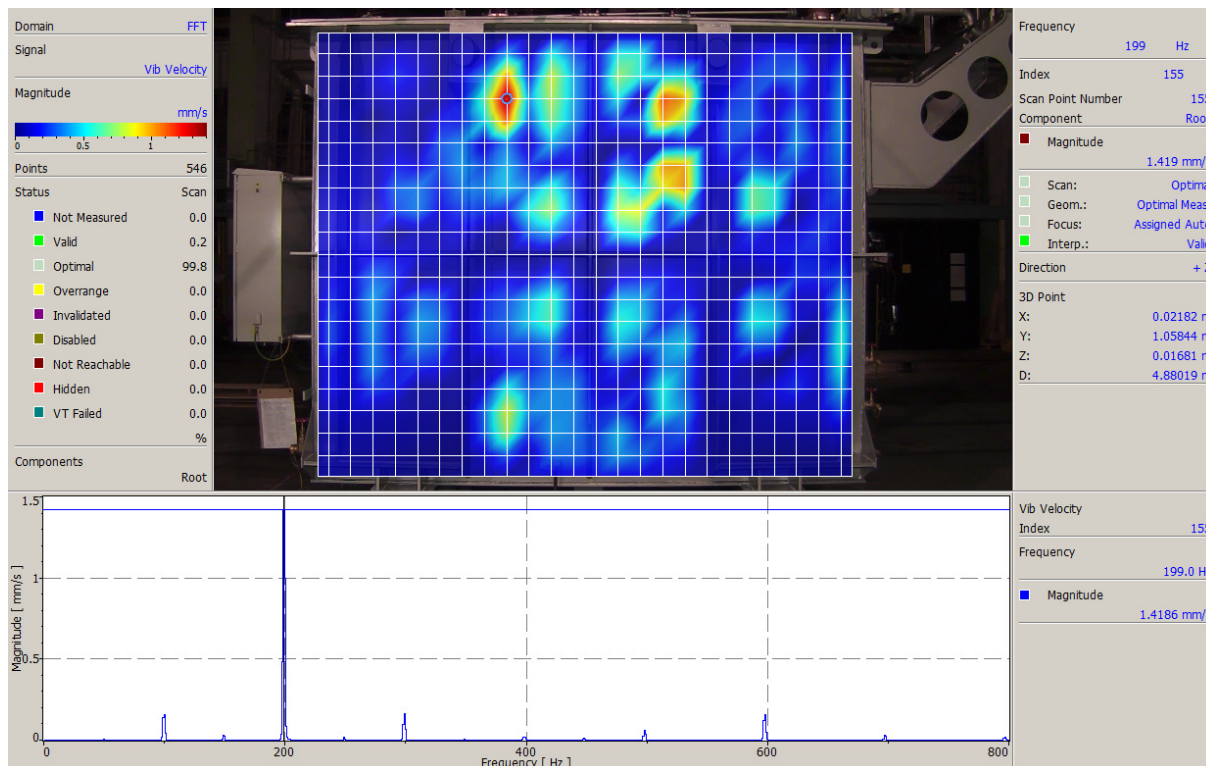
Provozní tvar kmitu na 200 Hz – 3D

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

Boční stěna bez radiátorů

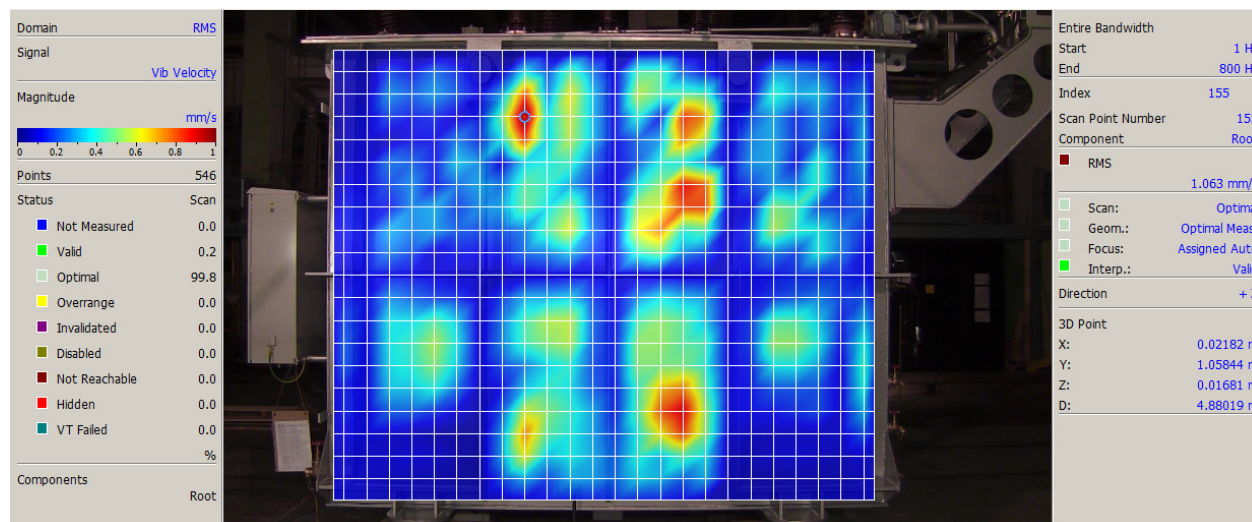


Provozní tvar kmitu na 100 Hz – maximum 1,07 mm/s



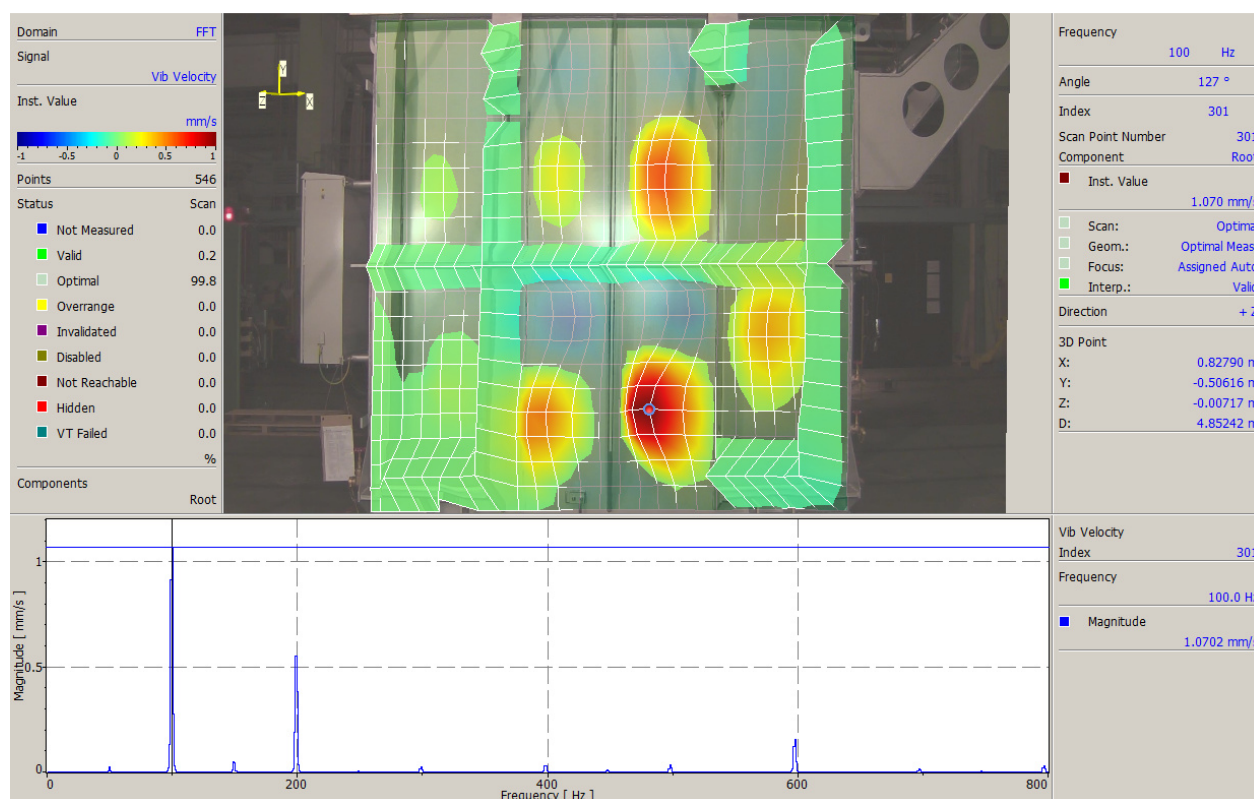
Provozní tvar kmitu na 200 Hz – maximum 1,42 mm/s

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

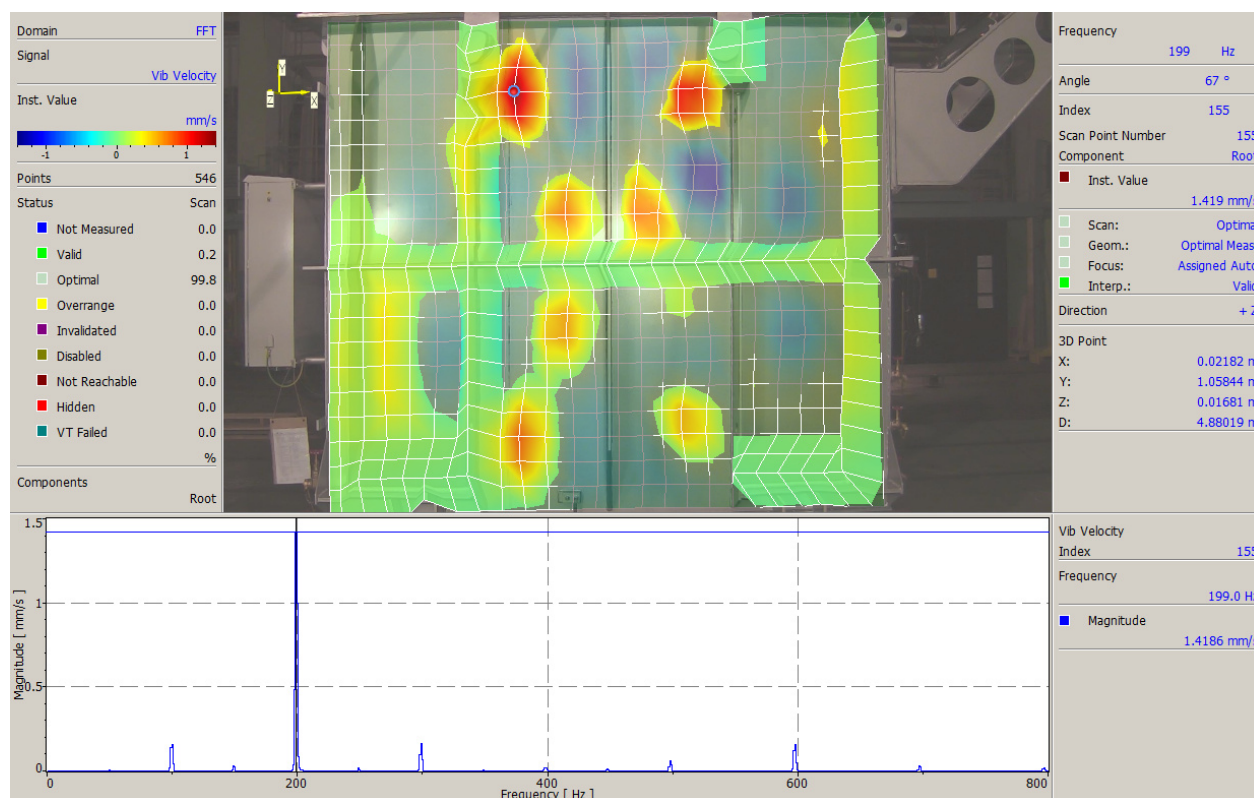


Celkový tvar v pásmu 1-800 Hz, kombinace tvarů na frekvencích 100 a 200 Hz

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem



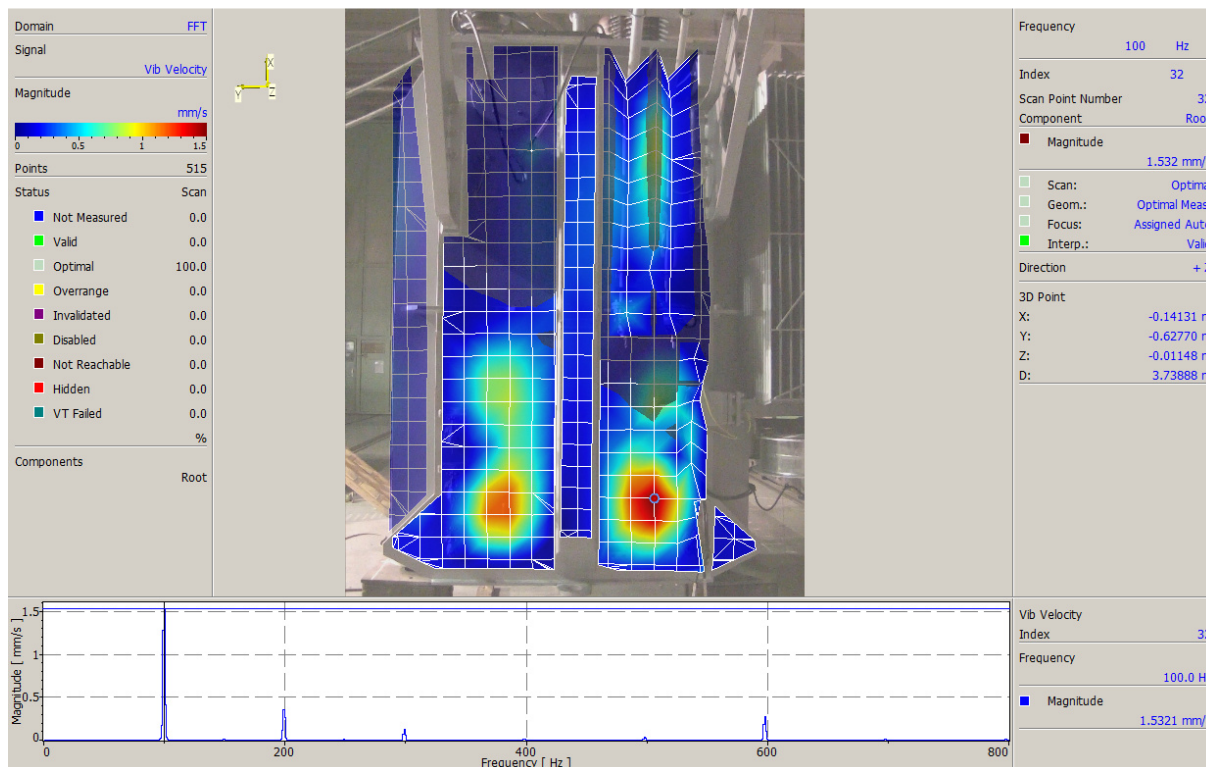
Provozní tvar kmitu na 100 Hz – 3D



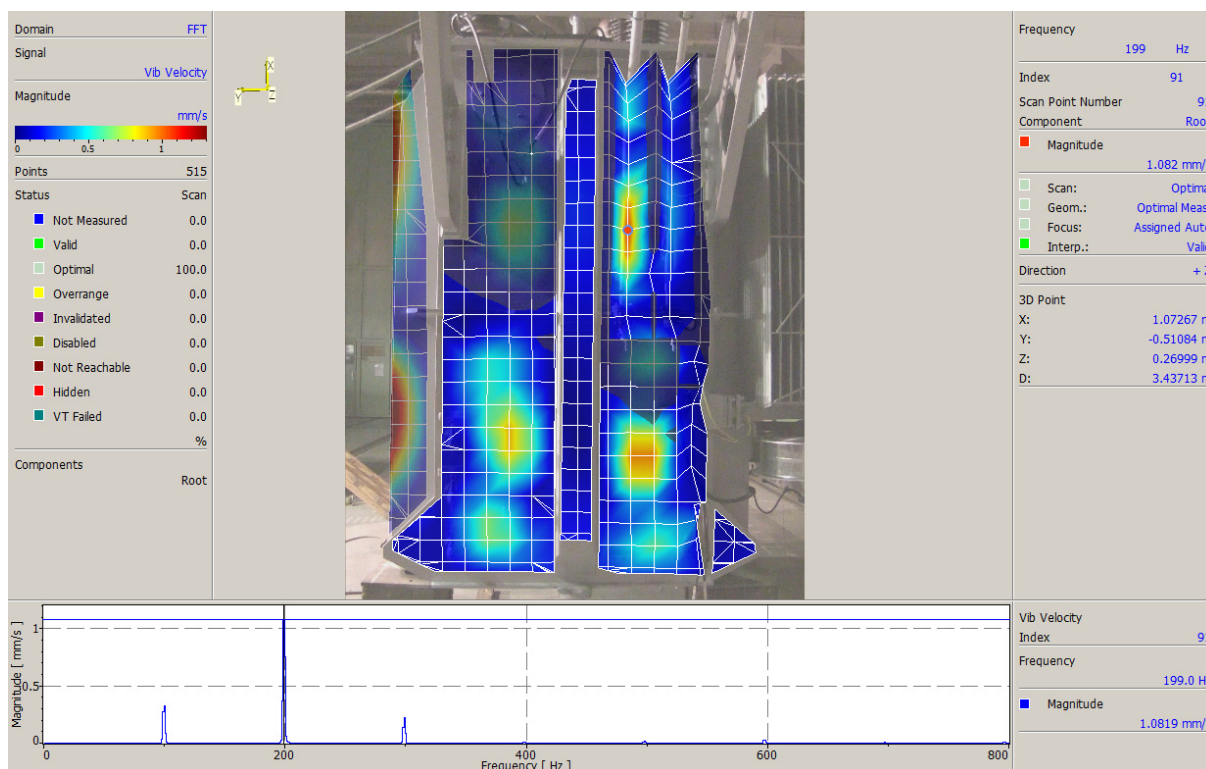
Provozní tvar kmitu na 200 Hz – 3D

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

Zadní stěna (strana s expanzní nádobou)

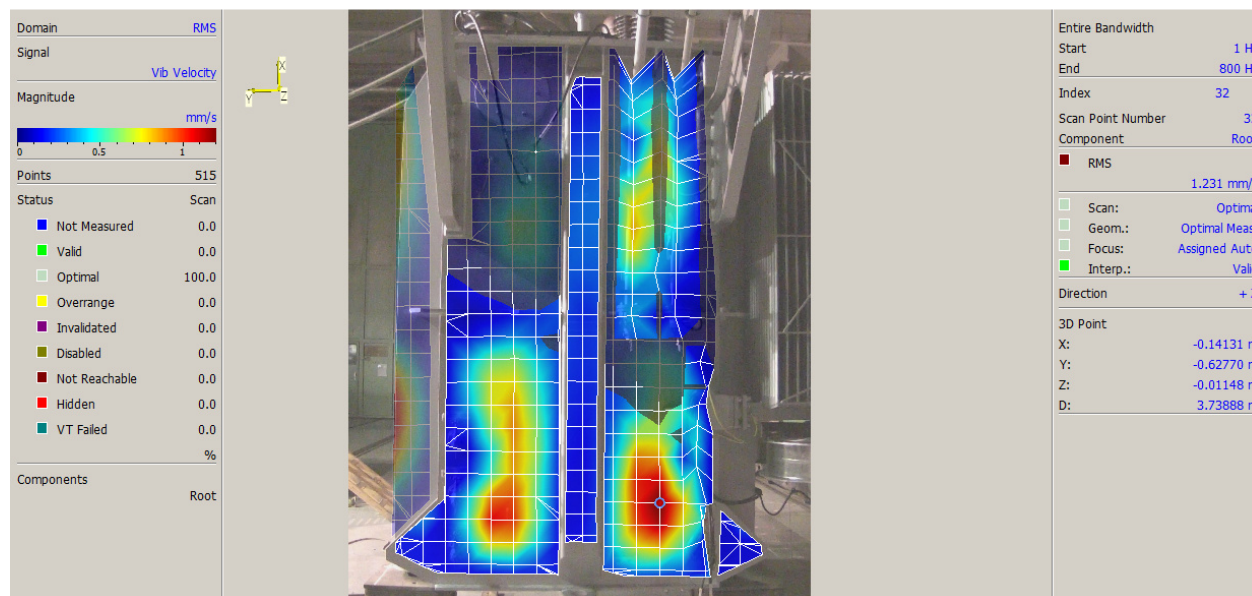


Provozní tvar kmitu na 100 Hz – maximum 1,53 mm/s



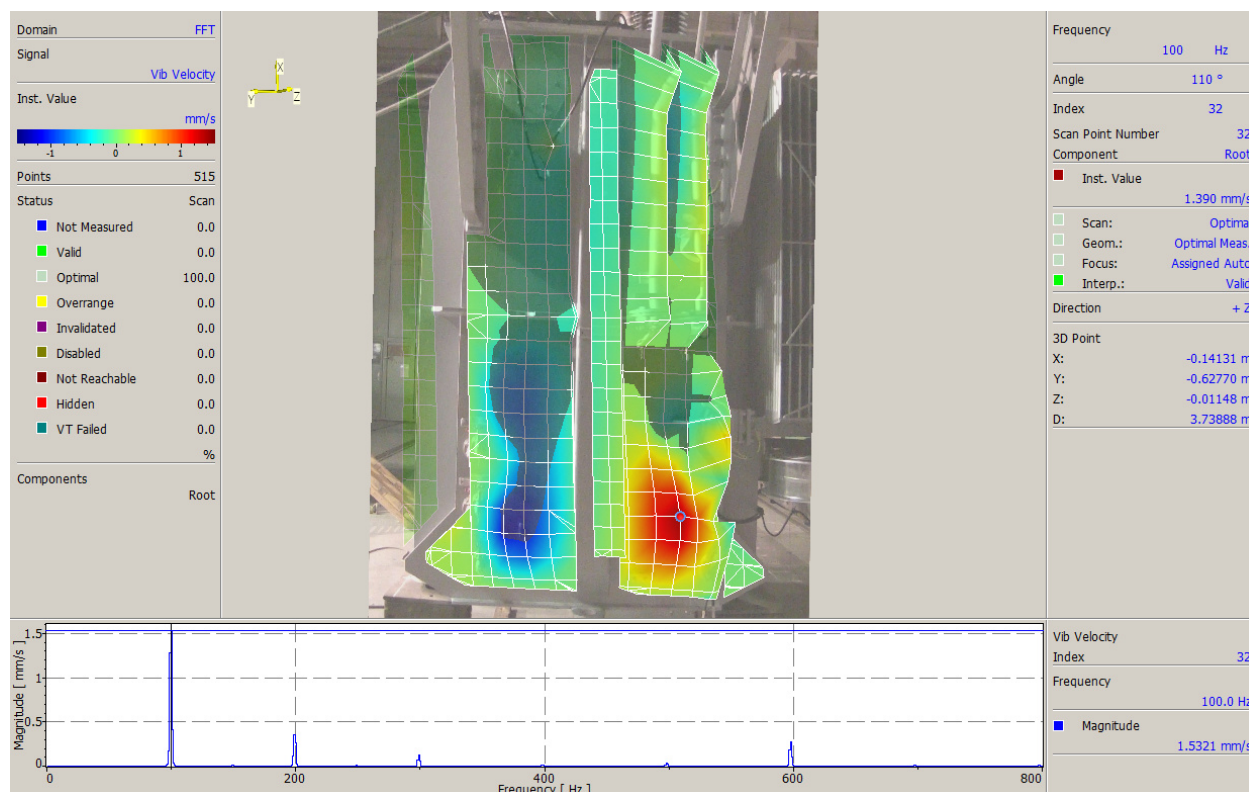
Provozní tvar kmitu na 200 Hz – maximum 1,08 mm/s

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

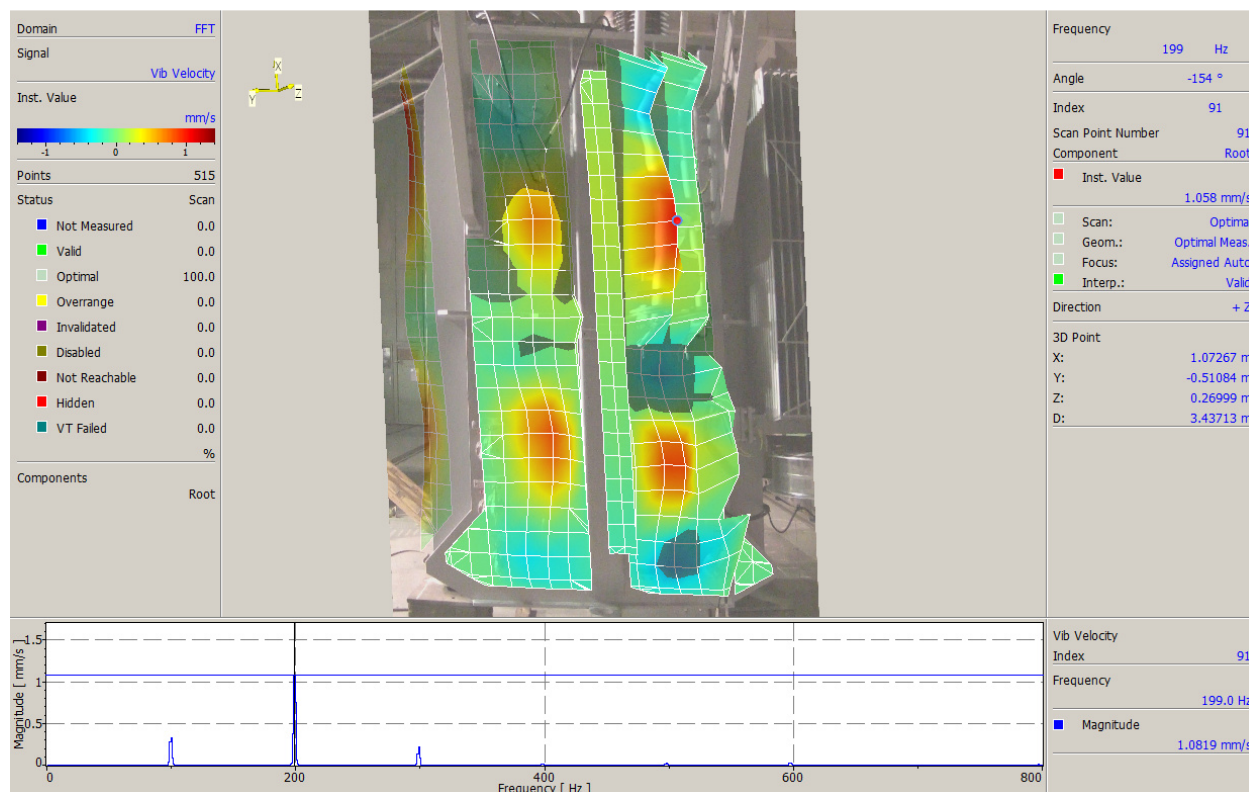


Celkový tvar v pásmu 1-800 Hz, kombinace tvarů na frekvenci 100 Hz a 200 Hz

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem



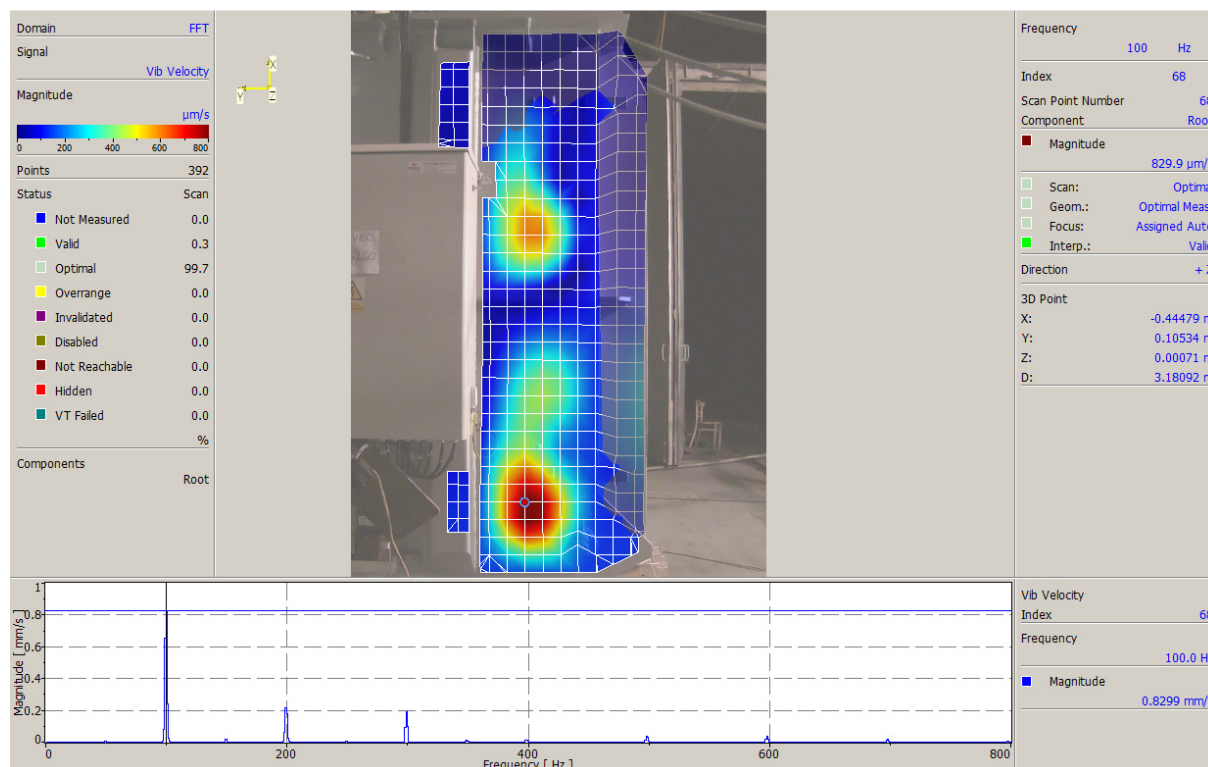
Provozní tvar kmitu na 100 Hz ve 3D – maximum 1,53 mm/s



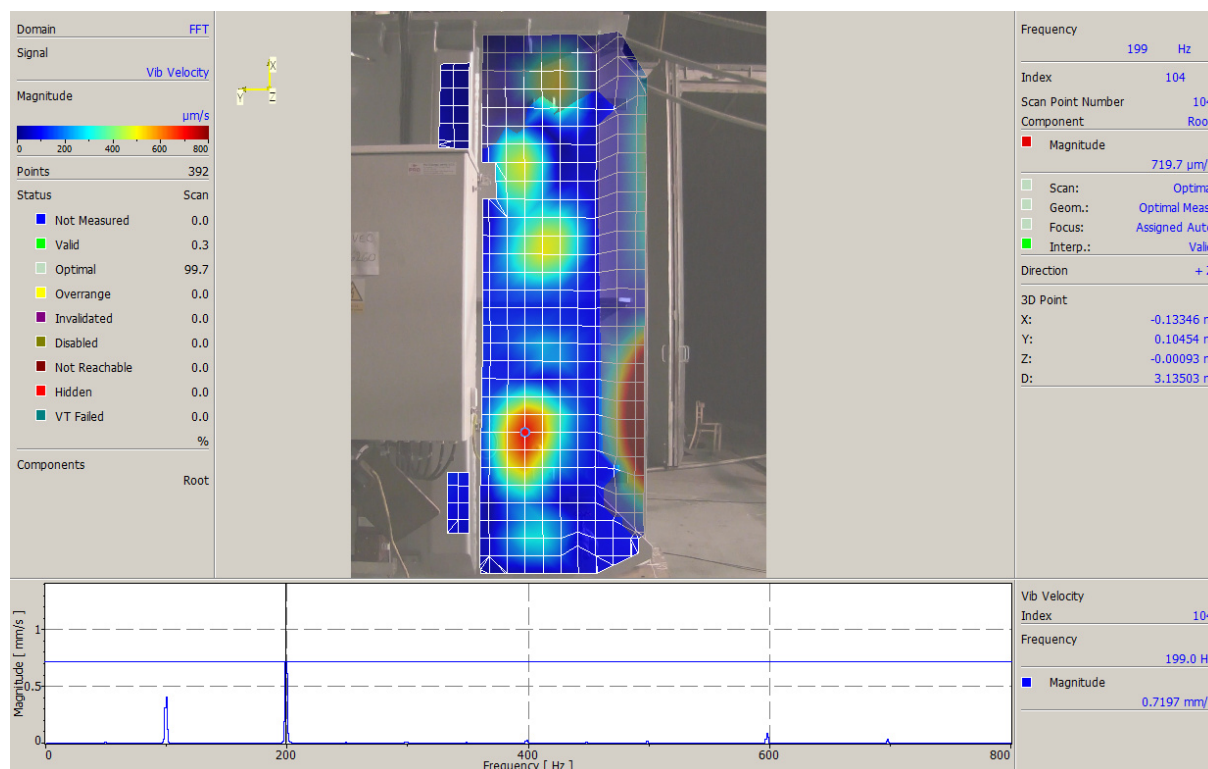
Provozní tvar kmitu na 200 Hz ve 3D – maximum 1,08 mm/s

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

Přední stěna (vedle ovládací skříně)

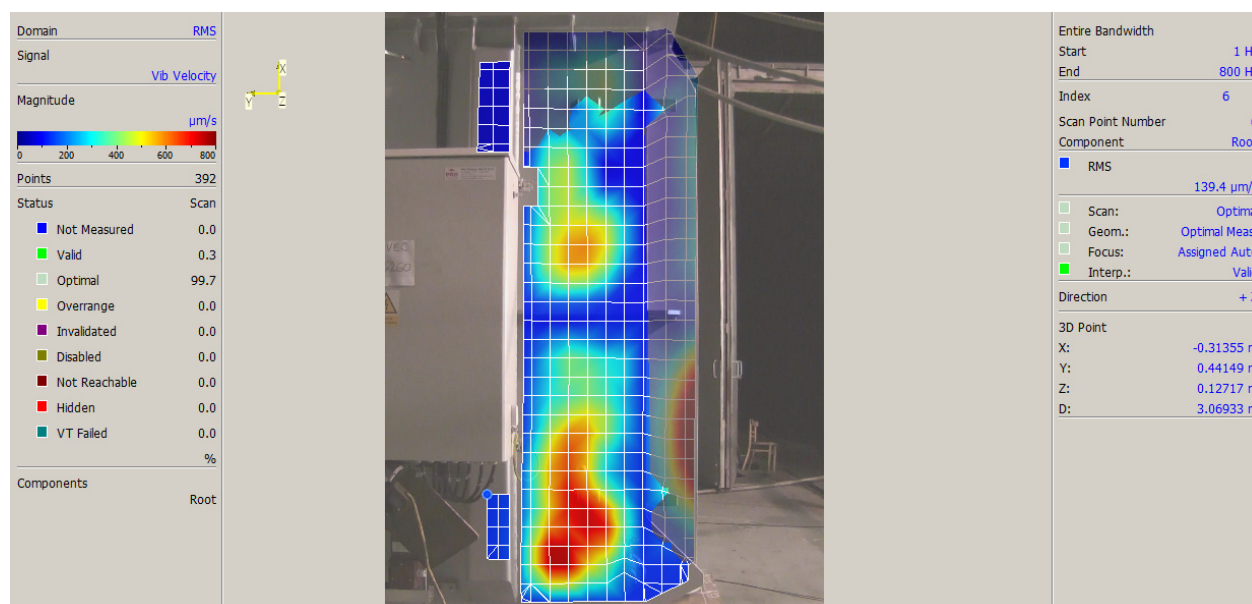


Provozní tvar kmitu na 100 Hz – maximum 0,83 mm/s



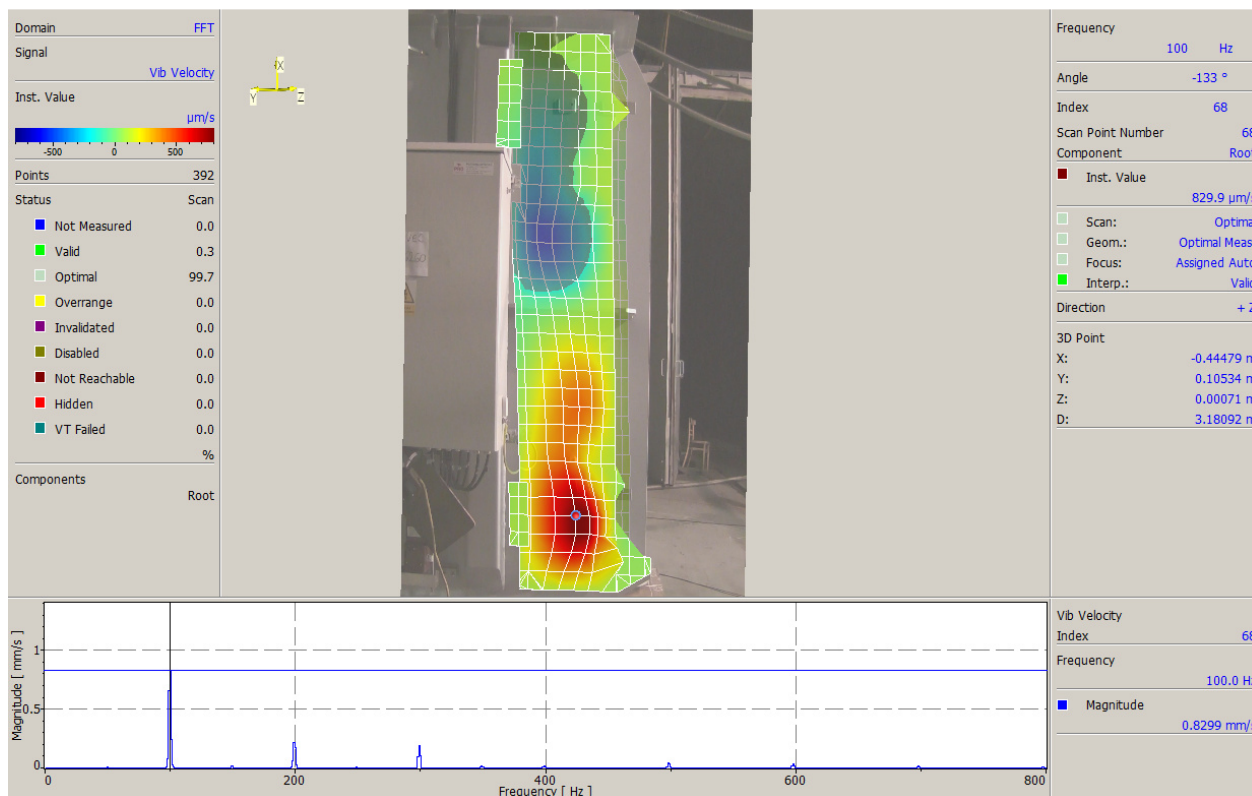
Provozní tvar kmitu na 200 Hz – maximum 0,72 mm/s

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

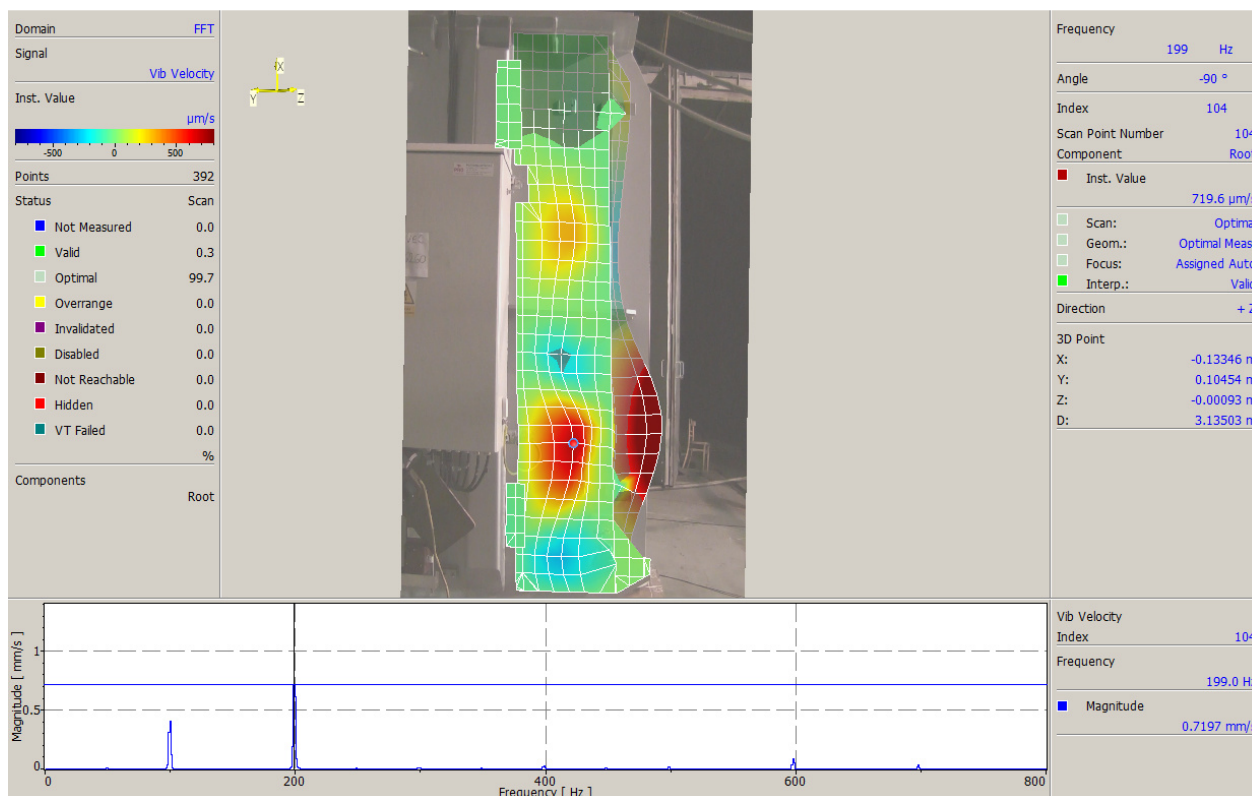


Celkový tvar v pásmu 1-800 Hz, kombinace tvarů na frekvenci 100 Hz a 200 Hz

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem



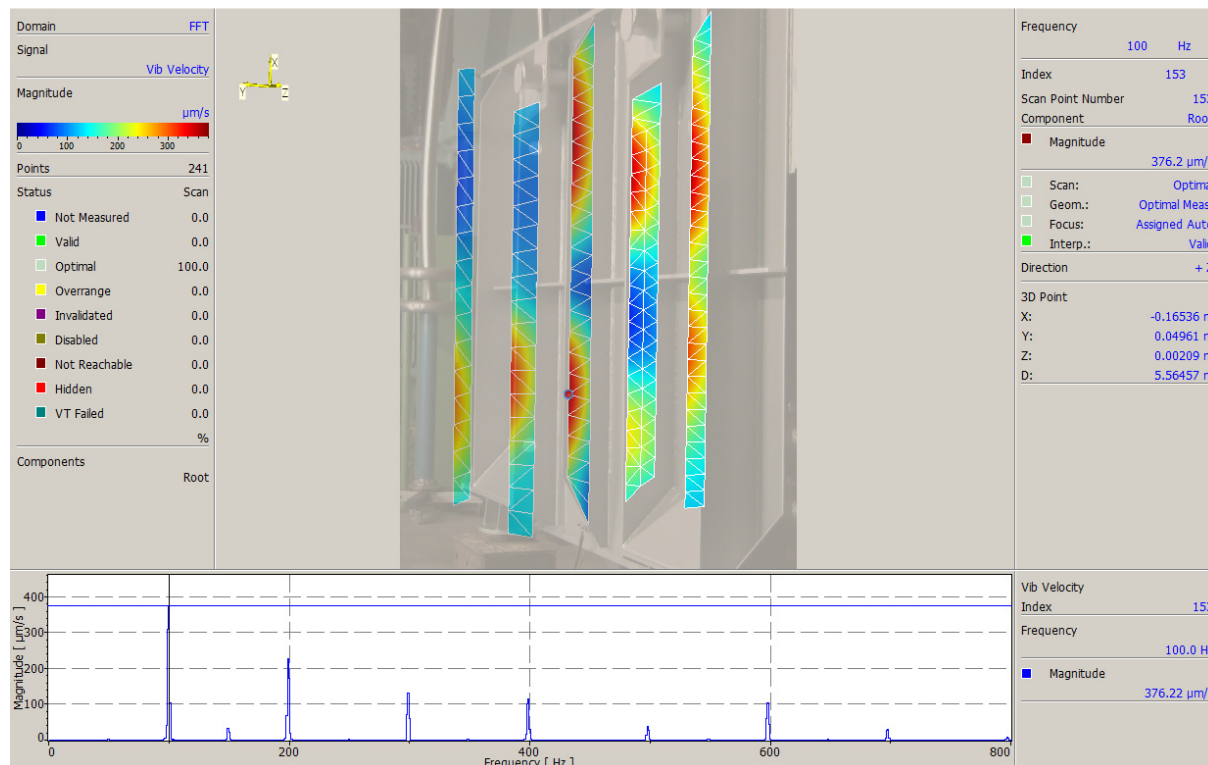
Provozní tvar kmitu na 100 Hz ve 3D – maximum 0,83 mm/s



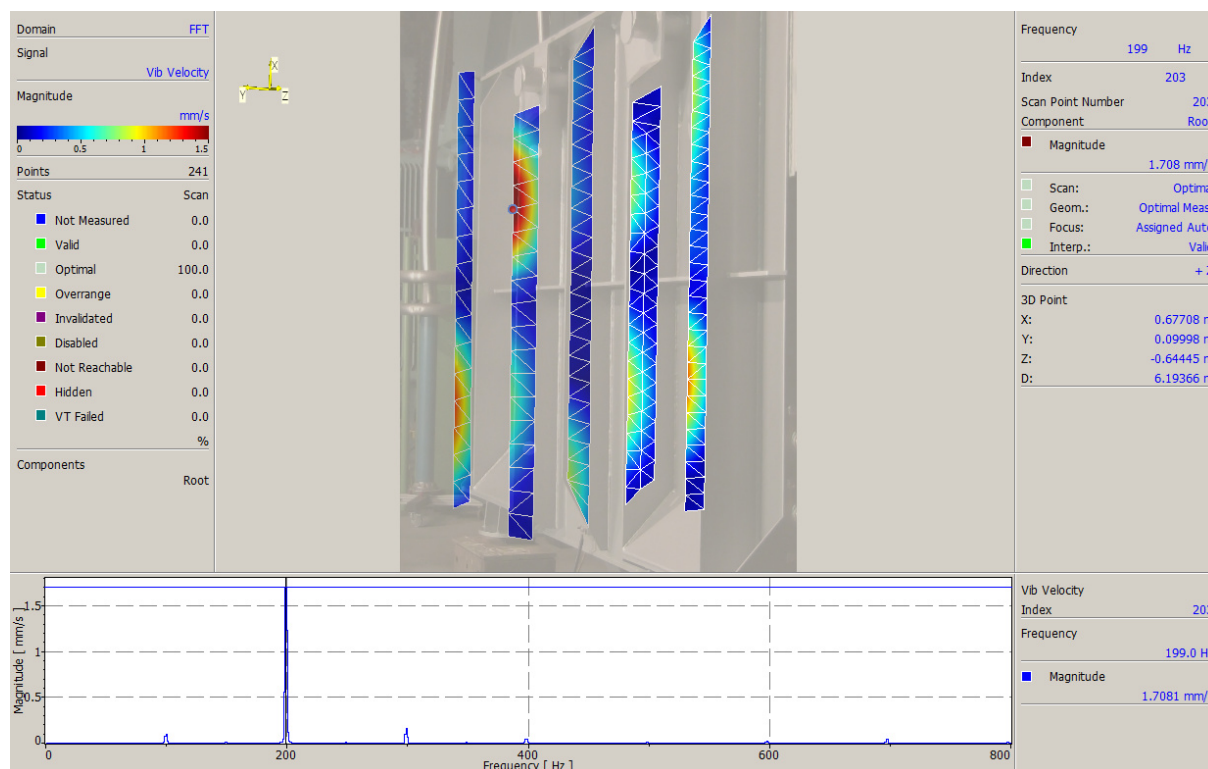
Provozní tvar kmitu na 200 Hz ve 3D – maximum 0,72 mm/s

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem

Žebrování na boční stěně bez radiátorů

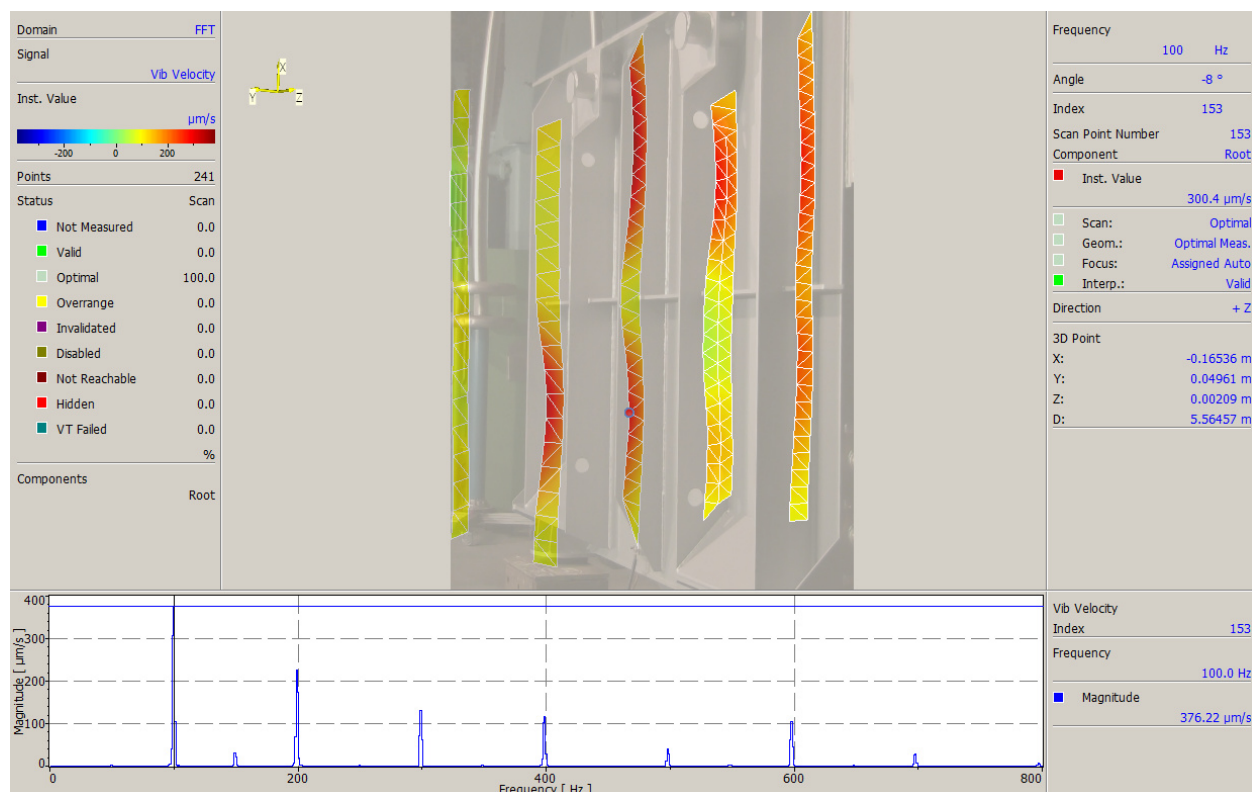


Provozní tvar kmitu na 100 Hz – maximum 0,38 mm/s

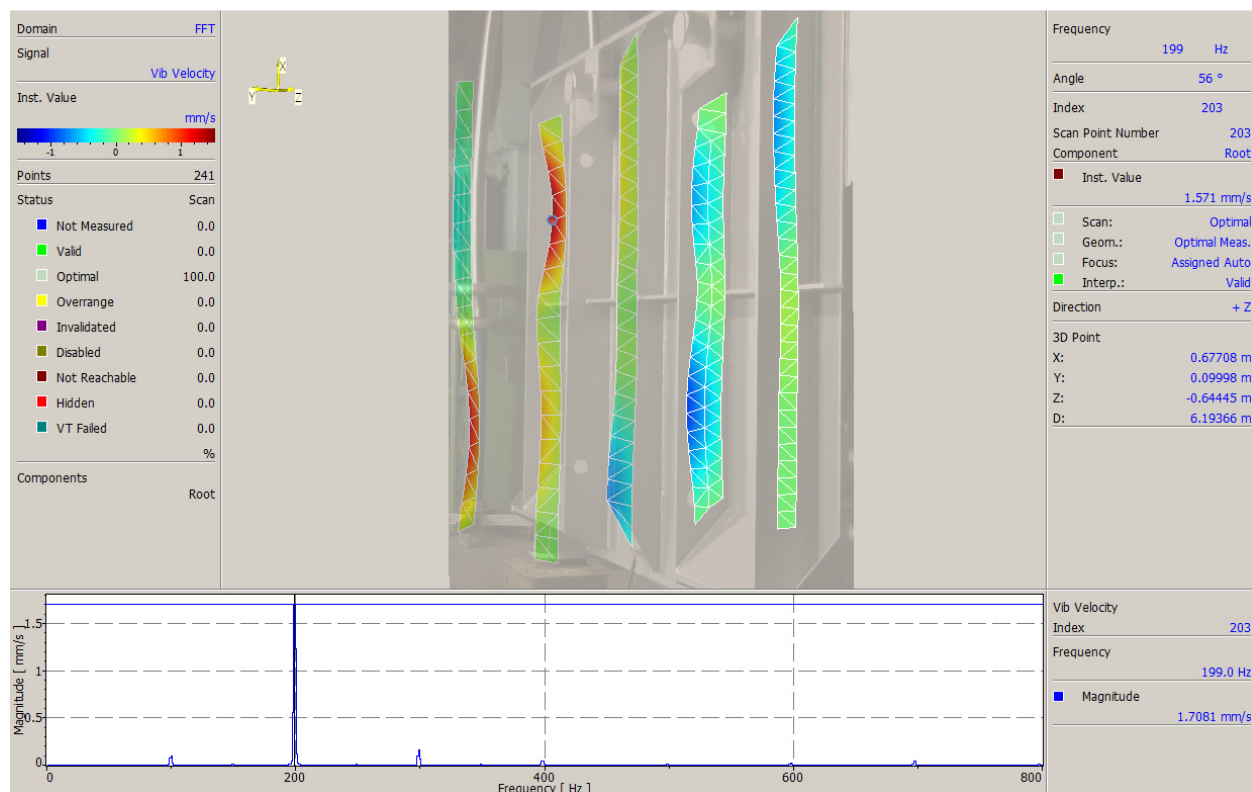


Provozní tvar kmitu na 200 Hz – maximum 1,71 mm/s

Příloha 3: Určení tvarů kmitů stávajícího řešení transformátoru laserovým vibrometrem



Provozní tvar kmitu na 100 Hz ve 3D – maximum 0,38 mm/s



Provozní tvar kmitu na 200 Hz ve 3D – maximum 1,71 mm/s