

WIBROAKUSTYCZNA ZASADA WZAJEMNOŚCI W BADANIACH PRASY MECHANICZNEJ W CELU OGRANICZENIA ZAGROŻENIA HAŁASEM

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono możliwość praktycznego wykorzystania wibroakustycznej zasady wzajemności w badaniach wspomagających dobór rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych zabezpieczeń ograniczających emisję energii wibroakustycznej przez poszczególne źródła prasy mechanicznej. Badania z zastosowaniem wibroakustycznej zasady wzajemności pozwalały na sukcesywne weryfikowanie uzyskanej skuteczności poszczególnych zabezpieczeń, a także na dokonywanie korekt zwiększających ich skuteczność. Dzięki temu uzyskano znaczne ograniczenie aktywności akustycznej prasy mechanicznej wybranej do badań.

Słowa kluczowe: wibroakustyczna zasada wzajemności, hałas uderzeniowy

VIBROACOUSTIC RECIPROCITY PRINCIPLE IN POWER PRESS INVESTIGATIONS – TO LIMIT A NOISE HAZARD

The possibility of practical utilizing of the Vibroacoustic Reciprocity Principle in investigations of selecting material and structural protection measures in attempt of limiting the emission of a vibroacoustic energy by individual sources of a power press – was presented in the paper.

Investigations, performed with an application of the Vibroacoustic Reciprocity Principle, allowed for the successive verification of the efficiency of individual means of protection and for the introduction of corrections to improve their performance. Due to the research a significant limitation of an acoustic activity of the power press – selected for tests – was achieved.

Keywords: Vibroacoustic Reciprocity Principle, impact noise

1. WPROWADZENIE

Prasy mechaniczne stanowią najliczniejszą grupę spośród maszyn wykorzystywanych do obróbki plastycznej, a więc procesów technologicznych wymagających wykorzystania zjawiska zderzenia powodującego emisję hałasu uderzeniowego [2–5]. Mimo wielu opracowań technicznych i naukowych dotyczących ograniczenia emisji hałasu uderzeniowego, pozytywne rezultaty w wielu przypadkach są niewielkie, zwłaszcza w przypadku pras mechanicznych z obsługą ręczną. Z tego powodu w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki zrealizowano zadanie badawcze [6], którego rezultatem wdrożeniowym było opracowanie rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych zabezpieczeń ograniczających emisję hałasu uderzeniowego w prasie mechanicznej.

Zidentyfikowanie zasadniczych źródeł energii wibroakustycznej emitowanej przez prasę mechaniczną (hałas własny, hałas technologiczny, hałas urządzeń pomocniczych) nie stanowi problemu [4, 5]. Bezbłędnie wskaże te źródła operator prasy. Zasadniczą trudność stanowi określenie ilościowego wpływu emisji energii wibroakustycznej z poszczególnych źródeł prasy na stanowisko operatora. Z powodu braku możliwości wyłączenia poszczególnych źródeł hałasu podczas przeprowadzania pomiarów akustycznych prasy, trudno określić ich indywidualną aktywność akustyczną. Podobny problem występuje w przypadku doboru i zastosowania zabezpieczeń przeciwhałasowych

dla poszczególnych źródeł energii wibroakustycznej w prasie. Szczególnie ma to znaczenie przy stosowaniu rozwiązań ograniczających emisję źródeł hałasu uderzeniowego. Hałas uderzeniowy w prasie, powstający przy zderzeniu narzędzia z poddawany obróbce plastycznej materiałem, wypromieniowywany jest do otoczenia z przestrzeni roboczej prasy. Część energii zderzenia emitowana jest w postaci drgań materiałowych rozchodzących się zarówno w obrabianym materiale, jak i w kowadłach dolnym i górnym, a także w innych elementach konstrukcyjnych prasy.

W celu rozwiązania omówionego problemu zastosowano wibroakustyczną zasadę wzajemności, która ma szereg zastosowań w badaniach i analizie zjawisk zachodzących w technice, w tym – także szeroko pojętych zjawisk akustycznych.

Opierając się na rozważaniach Liamszewa oraz uwzględniając badania Fahyego, profesor Z. Engel sformułował wibroakustyczną zasadę wzajemności następująco [1]: Proces wibroakustyczny w układzie liniowym, będący odpowiedzią na harmoniczne wymuszenia, wywołany w pewnym punkcie przez czynnik zewnętrzny, jest niezmienny w wyniku zamiany punktów przyłożenia energii i punktów obserwacji.

Oznaczmy przez $p^{(1)}(r)$, $p^{(2)}(r)$ procesy wibroakustyczne zachodzące w przestrzeni ograniczonej V , wywołane działaniem objętościowych źródeł $q^{(1)}(r)$ oraz $q^{(2)}(r)$, a przez $F^{(1)}(r)$

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki; turkiewi@imir.agh.edu.pl

** Centrum Młodzieży im. dr. Henryka Jordana w Krakowie

i $F^{(2)}(r)$ siły działające na układ, o kierunku normalnym n do powierzchni S .

Sformułowaną wcześniej wibroakustyczną zasadę wzajemności można zapisać w postaci

$$\iint_S \left[\frac{\partial p^{(1)}(r)}{\partial n} F^{(2)}(r) - \frac{\partial p^{(2)}(r)}{\partial n} F^{(1)}(r) \right] dS = \quad (1)$$

$$= -i\omega\rho \iiint_V \left[q^{(1)} p^{(2)}(r) - q^{(2)} p^{(1)}(r) \right] dV$$

gdzie:

- ω – częstość kołowa,
- ρ – gęstość ośrodka.

Oparcie się na wibroakustycznej zasadzie wzajemności umożliwiło zidentyfikowanie wszystkich źródeł energii wibroakustycznej prasy mechanicznej z jednoczesnym określeniem ilościowego wpływu emisji tej energii z każdego źródła na stanowisko pracy operatora.

Zastosowanie tej metody pozwoliło również uzyskać najbardziej korzystny efekt w ograniczeniu emisji energii wibroakustycznej przez prasę. W trakcie etapowego wdrażania poszczególnych zabezpieczeń wykonywano równoległe z pomiarami podstawowymi pomiary akustyczne z wykorzystaniem wibroakustycznej zasady wzajemności [1]. Analiza wyników z kolejnych serii badań pozwoliła na określenie, jaki element prasy (źródło) wymaga jeszcze skutecznego zabezpieczenia wibroakustycznego, które zmniejszy jego nadal nadmierną aktywność akustyczną.

2. METODYKA BADAŃ WZAJEMNOŚCIOWYCH PRASY MECHANICZNEJ

Badania akustyczne z wykorzystaniem wibroakustycznej zasady wzajemności zostały przeprowadzone w kilku seriach dla dwóch różnych trybów pracy prasy [7]:

- 1) ciągłego,
- 2) skokowego.

W każdej serii badań na prasie były zastosowane różne konfiguracje prototypowych zabezpieczeń wibroakustycznych.

W celu przeprowadzenia pomiarów akustycznych poprzez zastosowanie wibroakustycznej zasady wzajemności, prasę, na której zastosowano różnego typu zabezpieczenia wibroakustyczne, podzielono na osiem (rys. 1) obszarów elementarnych (I–VIII). W skład tych niżej wymienionych obszarów wchodzi odpowiednio oznaczone płaszczyzny pomiarowe, odpowiadające głównym źródłom energii wibroakustycznej.

Obszar I – korpus dolny, zastosowano zabezpieczenie w postaci hermetyzacji tylnej ściany korpusu prasy (płaszczyzny pomiarowe 10, 15, 20).

Obszar II – osłona podstawy, zastosowane zabezpieczenie to hermetyzacja dolnej przedniej części podstawy prasy wraz z koszem

odbiorczym na gotowe elementy (płaszczyzny pomiarowe 3, 9, 19).

Obszar III – osłony boczne, zastosowano zabezpieczenie akustyczne w postaci dźwiękoizolacyjnych osłon (płaszczyzny pomiarowe 8, 17).

Obszar IV – obudowa narzędzia, zastosowane zabezpieczenia to: zmodyfikowany wykrojnik dwustopniowy, osłony pola operacyjnego, zintegrowana obudowa dźwiękochłonno-izolacyjna, ruchoma osłona dźwiękoizolacyjna, ruchoma osłona dźwiękoizolacyjna z osłoną dolnej postawy (płaszczyzny pomiarowe 2, 7, 18).

Obszar V – płyta czołowa, zastosowano zabezpieczenie w postaci osłony dźwiękoizolacyjnej wraz ze zmodyfikowaną konstrukcją drzwi (płaszczyzna pomiarowa 1).

Obszar VI – korpus górny prawy, zastosowane zabezpieczenie to zmodyfikowana dźwiękochłonno-izolacyjna osłona koła zamachowego oraz tłumik hałasu zrzutu powietrza (płaszczyzny pomiarowe 11, 16).

Obszar VII – korpus górny lewy, zastosowano zabezpieczenie akustyczne w postaci osłony dźwiękoizolacyjnej silnika napędowego (płaszczyzny pomiarowe 4, 5, 6).

Obszar VIII – ściana tylna, zastosowano zabezpieczenia akustyczne w postaci osłony dźwiękoizolacyjnej tylnej części prasy (płaszczyzny pomiarowe 12, 13, 14).

Rozmieszczenie ośmiu obszarów pomiarowych (I–VIII) na stanowisku prasy mechanicznej przedstawia schemat na rysunku 1.

W czasie pomiarów bezpośrednich podczas pracy prasy zmierzono poziom ciśnienia akustycznego w trzech punktach obserwacji $p(X)$ oraz mierzono średnie natężenie dźwięku w polu bliskim każdego elementarnego obszaru. Obliczono średnie prędkości objętościowe drgań obszarów ze wzoru

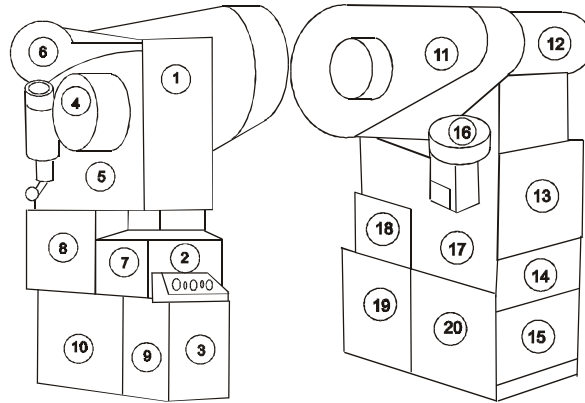
$$Q(Y) = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{2cI\Delta S_i}{\pi\rho_o}} \quad (2)$$

gdzie:

- c – prędkość dźwięku, m/s,
- I – natężenie dźwięku, W/m²,
- ΔS – pole powierzchni obszaru, m²,
- ρ_o – gęstość powietrza, kg/m³.

W czasie pomiarów wzajemnościowych zmierzono ciśnienie akustyczne w osi punkтового wszechkierunkowego źródła dźwięku w odległości $r = 1$ m od wylotu tuby źródła, a następnie obliczono jego prędkość objętościową z zależności

$$Q(X) = \frac{2p(r)}{f\rho_o} \quad (3)$$



Obszar I	Obszar II	Obszar III	Obszar IV	Obszar V	Obszar VI	Obszar VII	Obszar VIII
korpus dolny	osłona podstawy	osłony boczne	obudowa narzędzia	plyta czołowa	korpus górny lewy	korpus górny prawy	ściana tylna
10, 15, 20	3, 9, 19	8, 17	2, 7, 18	1	4, 5, 6	11, 16	12, 13, 14

Rys. 1. Schemat rozmieszczenia obszarów pomiarowych prasy

Następnie nagłośniono prasę punktowym źródłem dźwięku umieszczanym w kolejnych punktach obserwacji i zmierzono ciśnienie akustyczne $p(Y)$ w polu bliskim niepracującej maszyny w poszczególnych obszarach. Następnie wyznaczono wzajemnościowe wibroakustyczne funkcje przejścia

$$H_{i(wzaj.)} = \frac{p_i(Y)}{Q(X)} \quad (4)$$

Na podstawie wzajemnościowych wibroakustycznych funkcji przejścia obliczono przewidywany poziom ciśnienia akustycznego w punktach obserwacji

$$P_{(przew.)} = \sum_{i=1}^3 Q_i(Y) H_{i(wzaj.)} \quad (5)$$

Następnie obliczono przewidywane poziomy ciśnienia akustycznego w trzech punktach obserwacji pochodzące od

ośmiu zasadniczych podzespołów (obszarów) prasy

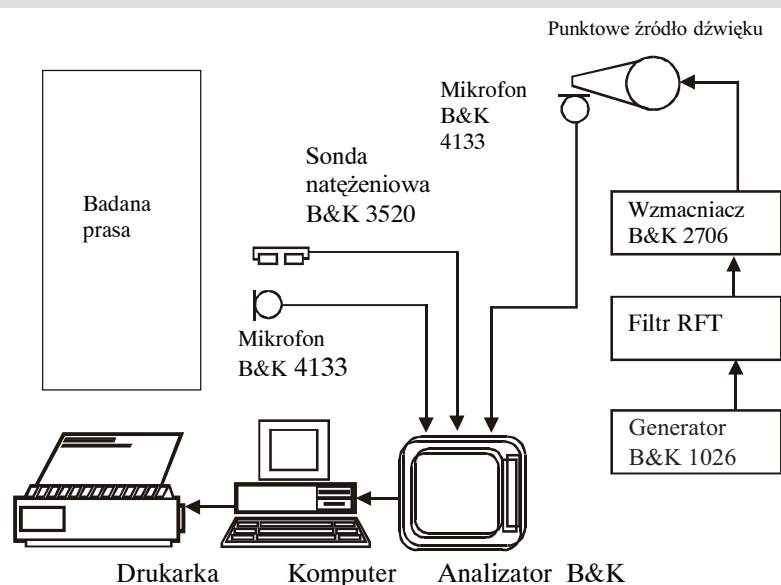
$$p_i = Q_i(Y) H_{i(wzaj.)} \quad (6)$$

Punkty obserwacji zostały rozmieszczone wokół prasy na wysokości 1,5 m; punkty nr 1 i 2 odpowiednio z prawej i lewej strony prasy, natomiast punkt obserwacji nr 3 na wysokości ucha operatora prasy.

Badania przeprowadzone zostały zgodnie z torem pomiarowym pokazanym na rysunku 2.

3. WYNIKI BADAŃ

Badania akustyczne z wykorzystaniem wibroakustycznej zasady wzajemności przeprowadzono w Laboratorium Katedry Mechaniki i Wibroakustyki na prasie mechanicznej z obsługą ręczną. Badania te przeprowadzono etapowo.



Rys. 2. Tor pomiarowy do wykonania badań akustycznych prasy z wykorzystaniem zasady wzajemności

W każdym etapie badań na prasie zastosowane były różne konfiguracje zabezpieczeń na poszczególne źródła energii wibroakustycznej.

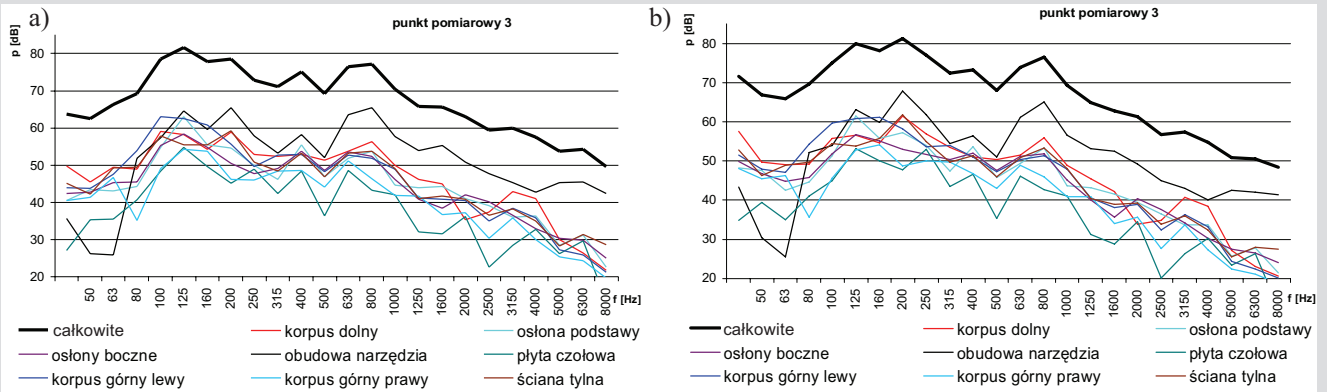
Po przeprowadzeniu, z wykorzystaniem wibroakustycznej zasady wzajemności, szeregu badań akustycznych prasy, na której zastosowane były różne konfiguracje zabezpieczeń wibroakustycznych, uzyskano bardzo dużą liczbę wyników. W celu łatwiejszej ich analizy zostały one opracowane zarówno w formie tabelarycznej, jak i w postaci wykresów. Tabele zawierają obliczone przewidywane poziomy ciśnienia akustycznego w kolejnych punktach obserwacji w trakcie realizacji procesu technologicznego dla dwóch trybów pracy prasy: ciągłego i skokowego. Wykonane wykresy oparte na uzyskanych wynikach obrazują wpływ poszczególnych podzespołów – obszarów prasy na całkowity poziom ciśnienia akustycznego w danym punkcie obserwacji i są jednocześnie jednoznacznie informacją dotyczącą skuteczności zastosowanego zabezpieczenia na dane źródło

energii wibroakustycznej. Ze względu na tak dużą liczbę wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań, w niniejszym artykule przedstawione są tylko przykładowe.

W tabeli 1 przedstawiono przykładowo wyniki obliczonych przewidywanych wartości poziomów ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji nr 3, emitowanych przez poszczególne podzespoły prasy (obszary pomiarowe). Wartości te uzyskano, dokonując pomiarów wzajemnościowych w czasie realizacji na prasie procesu technologicznego wykrawania podkładek zarówno w trybie pracy ciągłym, jak i skokowym. Ponieważ w trakcie wykonywania tych pomiarów na prasie były zastosowane zabezpieczenia wibroakustyczne w każdym obszarze pomiarowym, to przedstawione wyniki w tabeli 1 określają skuteczność poszczególnych zabezpieczeń pod względem akustycznym. Rysunek 3 przedstawia widma przewidywanych poziomów ciśnienia akustycznego uzyskane przy wykorzystaniu wyników zamieszczonych w tabeli 1.

Tabela 1. Obliczone przewidywane wartości poziomów ciśnienia akustycznego

Punkt pomiarowy 3																
f [Hz]	p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]	
	korpus dolny		osłona podstawy		osłony boczne		obudowa narzędzia		płyta czołowa		korpus górny lewy		korpus górny prawy		ściana tylna	
	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy
50	49,9	57,5	40,5	48,2	42,3	50,0	35,8	43,4	27,2	34,8	43,9	51,6	40,5	48,1	45,2	52,9
63	45,6	49,7	43,5	47,6	42,7	46,8	26,3	30,4	35,3	39,4	43,9	48,0	41,3	45,4	42,3	46,4
80	49,6	49,1	43,1	42,6	45,3	44,8	26,0	25,5	35,6	35,1	47,5	47,0	46,7	46,2	49,3	48,8
100	48,9	49,3	44,2	44,6	45,4	45,8	51,8	52,2	40,7	41,1	53,9	54,3	35,2	35,6	49,4	49,8
125	59,1	55,7	54,8	51,3	55,2	51,8	57,4	54,0	48,4	45,0	63,1	59,7	49,1	45,6	57,9	54,5
160	58,2	56,5	63,1	61,4	58,3	56,7	64,7	63,0	54,8	53,2	62,5	60,9	54,4	52,8	55,5	53,8
200	54,4	54,7	55,5	55,8	54,9	55,1	59,6	59,9	49,7	50,0	60,9	61,2	53,8	54,1	55,5	55,8
250	58,9	61,5	54,6	57,2	50,4	53,0	65,4	68,0	45,2	47,7	55,6	58,2	46,2	48,8	59,3	61,9
315	53,0	57,0	50,0	54,0	47,7	51,7	57,9	61,9	48,9	52,9	49,7	53,7	46,1	50,1	50,9	54,9
400	52,3	53,6	46,2	47,4	49,1	50,3	53,3	54,5	42,3	43,6	52,7	53,9	48,5	49,7	48,5	49,7
500	52,9	51,1	55,4	53,6	53,8	52,0	58,2	56,4	48,5	46,7	52,8	51,0	48,6	46,8	53,2	51,4
630	51,4	50,3	46,9	45,9	48,7	47,6	52,1	51,0	36,4	35,4	48,3	47,2	44,1	43,0	47,0	45,9
800	53,8	51,4	51,8	49,4	53,5	51,1	63,6	61,2	48,5	46,2	52,8	50,4	51,2	48,9	53,3	50,9
1k	56,4	56,0	53,8	53,3	52,4	51,9	65,5	65,1	43,2	42,7	51,8	51,3	46,5	46,0	53,7	53,3
1,25	50,0	48,9	44,7	43,7	46,2	45,2	57,7	56,7	42,2	41,1	49,0	47,9	41,9	40,8	49,1	48,0
1,6k	46,2	45,5	43,9	43,1	40,9	40,1	53,9	53,1	32,1	31,3	41,3	40,5	41,7	41,0	41,1	40,4
2k	44,9	42,2	44,3	41,5	38,5	35,7	55,3	52,5	31,6	28,8	40,8	38,1	36,8	34,0	41,7	38,9
2,5k	35,4	33,8	41,0	39,4	42,0	40,4	50,9	49,2	36,2	34,6	40,5	38,9	37,2	35,6	40,8	39,2
3,15	37,4	34,8	39,2	36,5	40,2	37,5	47,7	45,0	22,7	20,1	35,1	32,4	30,4	27,7	36,5	33,8
4k	43,0	40,7	36,0	33,7	36,5	34,2	45,3	43,0	28,6	26,3	38,5	36,2	36,0	33,7	38,3	36,0
5k	41,0	38,4	36,3	33,7	32,9	30,2	42,7	40,0	32,9	30,2	35,9	33,2	30,0	27,3	35,0	32,4
6,3k	30,0	27,1	28,5	25,7	30,3	27,5	45,4	42,5	26,3	23,4	27,3	24,4	25,3	22,5	28,3	25,4
8k	26,4	23,0	31,3	27,8	29,9	26,4	45,5	42,1	29,7	26,3	25,9	22,4	24,5	21,0	31,4	27,9
10k	21,7	20,6	22,6	21,5	25,1	24,0	42,5	41,4	13,6	12,5	21,3	20,2	19,8	18,6	28,6	27,5
A	60,8	60,1	58,4	57,7	59,2	58,6	69,5	68,8	50,2	49,5	59,5	58,8	52,1	51,4	58,2	57,5
L	65,8	65,7	63,9	63,8	61,5	61,4	73,4	73,3	55,9	55,8	65,4	65,3	61,8	61,7	64,1	64,0



Rys. 3. Widma przewidywanych poziomów ciśnienia akustycznego: a) tryb ciągły; b) tryb skokowy

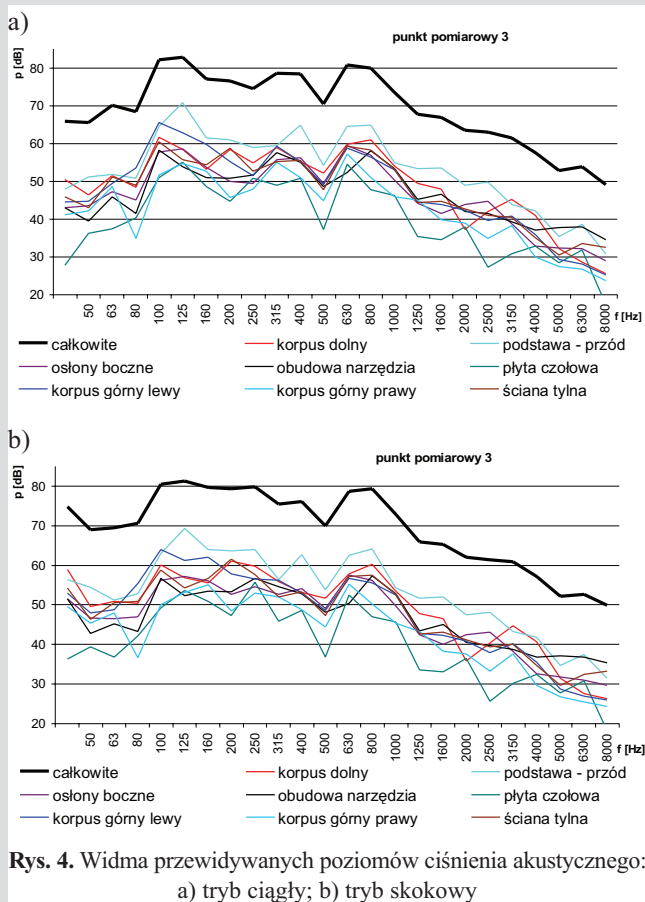
W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczonych przewidywanych wartości poziomów ciśnienia akustycznego również w punkcie obserwacji nr 3. Wartości te uzyskano poprzez wykonanie pomiarów wzajemnościowych w sytuacji, gdy warunki techniczne pracy prasy były identyczne z wa-

runkami technicznymi w poprzednim etapie, a realizowany proces technologiczny był taki sam. Natomiast w trakcie wykonywania tych pomiarów było zastosowane inne zabezpieczenie pola operacyjnego prasy (obszar IV – obudowa narzędzia).

Tabela 2. Obliczone przewidywane wartości poziomów ciśnienia akustycznego

Punkt pomiarowy 3																	
f [Hz]	p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		p [dB]		
	korpus dolny		osłona podstawy		osłony boczne		obudowa narzędzia		płyta czołowa		korpus górny lewy		korpus górny prawy		ściana tylna		
	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	tryb ciągły	tryb skokowy	
50	50,5	59,0	47,9	56,4	42,9	51,5	42,9	51,5	27,8	36,3	44,5	53,1	41,1	49,6	45,8	54,4	
63	46,4	49,6	51,2	54,4	43,5	46,7	39,5	42,8	36,1	39,4	44,6	47,9	42,1	45,4	43,1	46,3	
80	51,4	50,8	51,8	51,2	47,1	46,5	45,8	45,2	37,4	36,8	49,3	48,8	48,5	47,9	51,2	50,6	
100	48,4	50,4	50,8	52,8	45,0	47,0	41,4	43,4	40,2	42,2	53,4	55,4	34,7	36,7	49,0	50,9	
125	61,6	60,1	64,5	62,9	57,8	56,2	58,3	56,7	50,9	49,3	65,6	64,0	51,6	50,0	60,4	58,8	
160	58,4	56,9	70,8	69,4	58,6	57,1	53,8	52,3	55,1	53,6	62,8	61,3	54,6	53,1	55,7	54,2	
200	53,2	55,6	61,5	63,9	53,7	56,1	51,0	53,4	48,5	50,9	59,7	62,1	52,6	55,0	54,3	56,7	
250	58,4	61,1	61,0	63,6	49,9	52,6	50,7	53,4	44,7	47,3	55,1	57,8	45,7	48,4	58,8	61,5	
315	54,8	59,8	59,0	64,0	49,5	54,5	51,6	56,7	50,7	55,8	51,5	56,5	47,9	52,9	52,7	57,7	
400	59,0	55,9	59,4	56,4	55,7	52,7	57,6	54,6	49,0	45,9	59,3	56,3	55,1	52,0	55,1	52,1	
500	55,3	53,1	64,9	62,7	56,2	54,0	55,1	52,9	50,9	48,7	55,2	53,0	51,0	48,8	55,5	53,4	
630	52,2	51,8	54,1	53,7	49,4	49,0	48,6	48,2	37,2	36,8	49,0	48,6	44,8	44,4	47,7	47,3	
800	59,8	57,8	64,4	62,5	59,5	57,5	52,4	50,4	54,5	52,5	58,7	56,8	57,2	55,2	59,2	57,3	
1k	61,0	60,3	64,8	64,1	56,9	56,2	58,1	57,4	47,7	47,0	56,3	55,6	51,0	50,3	58,2	57,6	
1,25	54,0	53,5	54,8	54,3	50,3	49,8	53,3	52,8	46,2	45,7	53,0	52,5	45,9	45,4	53,1	52,6	
1,6k	49,5	47,8	53,3	51,7	44,1	42,4	45,2	43,5	35,3	33,6	44,5	42,9	45,0	43,3	44,4	42,7	
2k	47,9	46,5	53,5	52,0	41,5	40,0	46,5	45,0	34,6	33,1	43,8	42,4	39,8	38,3	44,7	43,2	
2,5k	37,2	35,8	48,9	47,5	43,8	42,4	41,9	40,5	37,9	36,6	42,3	40,9	39,0	37,6	42,6	41,2	
3,15	41,9	40,3	49,7	48,1	44,7	43,1	41,4	39,8	27,2	25,6	39,5	38,0	34,8	33,2	40,9	39,4	
4k	45,2	44,7	43,8	43,3	38,7	38,2	39,3	38,8	30,8	30,3	40,7	40,2	38,2	37,7	40,5	40,0	
5k	41,0	40,7	42,1	41,8	32,9	32,6	37,1	36,8	32,8	32,5	35,8	35,5	29,9	29,6	35,0	34,7	
6,3k	32,0	31,4	35,3	34,7	32,4	31,8	37,7	37,1	28,3	27,7	29,3	28,7	27,4	26,8	30,3	29,7	
8k	28,6	27,5	38,5	37,4	32,1	31,0	37,9	36,8	31,9	30,8	28,1	27,0	26,7	25,6	33,6	32,5	
10k	25,6	26,4	30,8	31,6	29,0	29,8	34,6	35,4	17,4	18,2	25,1	25,9	23,6	24,4	32,4	33,2	
A	64,1	64,1	68,9	69,0	62,5	62,6	61,6	61,7	53,4	53,5	62,7	62,8	55,3	55,4	61,4	61,5	
L	68,3	68,7	74,1	74,5	64,0	64,4	64,3	64,7	58,4	58,8	67,8	68,2	64,3	64,7	66,6	66,9	

Rysunek 4 przedstawia widma przewidywanych poziomów ciśnienia akustycznego uzyskane przy wykorzystaniu wyników zamieszczonych w tabeli 2.



Rys. 4. Widma przewidywanych poziomów ciśnienia akustycznego: a) tryb ciągły; b) tryb skokowy

4. ANALIZA WYNIKÓW

Analiza uzyskanych wyników z etapowo przeprowadzonych badań akustycznych z zastosowaniem wibroakustycznej zasady wzajemności pozwalała określić wpływ poszczególnych obszarów – podzespołów prasy z zastosowanymi zabezpieczeniami wibroakustycznymi na całkowity poziom ciśnienia akustycznego w każdym z trzech punktów obserwacji. Była to jednocześnie dokładna informacja, które zastosowane zabezpieczenie wibroakustyczne należy zastąpić bardziej skutecznym pod względem akustycznym.

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 1 (widma na rys. 3), można stwierdzić, że emisja energii wibroakustycznej z pola operacyjnego prasy osłoniętego zabezpieczeniem w postaci zintegrowanej obudowy dźwiękochłonno-izolacyjnej ma największy wpływ na stanowisko pracy operatora. Poziom dźwięku A, jaki emitowało pole operacyjne (obszar IV), w punkcie obserwacji nr 3 wynosił 69,5 dB w trybie pracy ciągłym. Natomiast najmniejszy wpływ na poziom ciśnienia akustycznego w tym punkcie obserwacji miała płyta czołowa (obszar V) i korpus górny prawy (obszar VII). W tych obszarach pomiarowych (podzespołach prasy) zastosowano zabezpieczenia wibroakustyczne w postaci: zmodyfikowanej dźwiękochłonno-izolacyjnej osłony koła zamachowego i tłumika hałasu zrzutu powietrza układu steru-

jącego sprzęgła. Poziom dźwięku A emitowany z obszaru pomiarowego V wynosił 50,2 dB podczas pracy prasy w trybie ciągłym, natomiast z obszaru VII jego wartość wynosiła 51,4 dB w trybie pracy skokowym.

Pozostałe podzespoły (obszary pomiarowe I, II, III, VI i VIII – w których na znajdujące się źródła energii wibroakustycznej zastosowano zabezpieczenia takie, jak: osłona dźwiękochłonno-izolacyjna silnika napędowego prasy, hermetyzacja tylnej ściany korpusu prasy, hermetyzacja kosza odbiorczego na gotowe wyroby), miały prawie równorzędny wpływ na poziom ciśnienia akustycznego na stanowisko operatora prasy. Wartość poziomu dźwięku A w tych obszarach pomiarowych wahała się w granicach $60,8 \div 58,2$ dB w trybie pracy ciągłym, natomiast w trybie pracy skokowym jego wartość wynosiła $60,1 \div 57,5$ dB.

Z przeprowadzonej analizy wyników omówionej serii badań (tab. 1, rys. 3) można stwierdzić, że:

- zastosowana osłona dźwiękoizolacyjna na płytę czołową prasy, wraz ze zmienioną konstrukcją drzwi, zastępująca oryginalne rozwiązanie, jest dostatecznie skuteczna, jeżeli chodzi o ograniczenie emisji energii wibroakustycznej z tej części prasy (obszar V);
- zmodyfikowane rozwiązanie osłony koła zamachowego – korpus górny prawy – mające na celu zmniejszenie hałasu emitowanego przez sprzęgło spełniło swoje zadanie (obszar VII);
- natomiast wartości poziomów ciśnienia akustycznego, jakie emituje pole operacyjne narzędzia, wskazują na to, że należy zastosować skuteczniejsze zabezpieczenie niż zastosowana dotychczas zintegrowana obudowa dźwiękochłonno-izolacyjna (obszar IV).

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki badań akustycznych, zostało opracowane alternatywne zabezpieczenie pola operacyjnego prasy w postaci ruchomej osłony dźwiękoizolacyjnej zintegrowanej z suwakiem. Druga omówiona seria badań została przeprowadzona w sytuacji, gdy na prasie było zamontowane wyżej wymienione zabezpieczenie wibroakustyczne (obszar pomiarowy IV).

Analiza wyników zawartych w tabeli 2 (widma – rys. 4) pokazuje, że najmniejszy wpływ na poziom ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji nr 3 ma płyta czołowa i korpus górny prawy – analogicznie do wyżej omówionej serii badań. Wartości poziomu dźwięku A, jaki emitują te obszary, są prawie takie same i wynoszą odpowiednio: 53,4 dB – płyta czołowa oraz 55,3 dB w przypadku korpusu górnego prasy podczas pracy prasy w trybie ciągłym; w trybie pracy skokowej wartości poziomu dźwięku A wynoszą 53,5 dB – płyta czołowa i 55,4 dB – korpus górny prawy.

Największy wpływ natomiast na poziom ciśnienia akustycznego na stanowisko pracy operatora ma osłona podstawy (obszar II). Wartość poziomu dźwięku A emitowana z tego obszaru wynosi 68,9 dB w trybie pracy ciągłym i 69 dB w trybie pracy skokowej.

Pozostałe podzespoły (obszary pomiarowe I, III, VI i VIII) miały prawie równorzędny wpływ na poziom ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji nr 3 zarówno

w trybie pracy ciągłym, jak i skokowym, podobnie jak w poprzedniej serii badań. Wartość poziomu dźwięku A, jaki emitują te podzespoły, zawarta jest w granicach $64,1 \pm 61,4$ dB.

W obszarze pomiarowym IV – obudowa narzędzia (pole operacyjne prasy), który w poprzedniej serii badań miał największy wpływ na poziom ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji nr 3 ($L_A = 69,5$ dB), obniżyła się emisja energii wibroakustycznej. Wartość poziomu dźwięku A emitowanego z tego obszaru wynosiła 61,6 dB w trybie pracy ciągłym i 61,7 w trybie pracy skokowym.

Z powyższej analizy wyników otrzymanych w tej serii badań (tab. 2, rys. 4) wynikają niżej przedstawione wnioski:

- Najmniejszy wpływ na poziom ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji nr 3 (stanowisko operatora prasy) ma płyta czołowa i korpus górny prawy – analogicznie do poprzedniej serii badań. Wartość poziomu ciśnienia akustycznego jaki emitują te obszary pomiarowe (V i VII) jest taka sama.
- Największy wpływ natomiast na poziom ciśnienia akustycznego na stanowisko pracy operatora ma osłona podstawy (obszar II). Wartości poziomów ciśnienia akustycznego, jakie emituje ten obszar, wskazują na to, że w tym obszarze należy zastosować bardziej skuteczne zabezpieczenie wibroakustyczne.
- Pozostałe podzespoły (obszary pomiarowe I, III, VI i VIII) miały prawie równorzędny wpływ na poziom ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji nr 3, zarówno w trybie pracy ciągłym, jak i skokowym, podobnie jak w poprzedniej serii badań.
- Obszar pomiarowy IV, w którym zostało zastosowane nowe zabezpieczenie pola operacyjnego prasy, wykazał zmniejszoną emisję energii wibroakustycznej. Poziom dźwięku A emitowanego z tej części prasy wynosił 61,6 dB w trybie pracy ciągłym i 61,7 dB w trybie pracy skokowym. W rezultacie zastosowania tego typu zabezpieczenia uzyskano średnio obniżenie poziomu ciśnienia akustycznego o 7 dB z tego obszaru pomiarowego.

Omówione przykładowe wyniki z badań akustycznych z wykorzystaniem wibroakustycznej zasady wzajemności były jednoznacznie wskazówką, które zastosowane zabezpieczenie wibroakustyczne spełniło swoje zadanie, a które należy zastąpić innym, bardziej skutecznym pod względem akustycznym.

Biorąc pod uwagę analizę z przedstawionych przykładowo wyników badań, jednoznacznie stwierdzono, że w wyniku zmiany zabezpieczenia pola operacyjnego prasy na bardziej skuteczne pod względem akustycznym, mało skuteczna jest osłona podstawy prasy i należy zastosować bardziej skuteczne zabezpieczenie tej części prasy.

Po etapowym wdrażaniu zabezpieczeń poszczególnych źródeł energii wibroakustycznej prasy i ocenie ich skuteczności za pomocą wibroakustycznej zasady wzajemności, uzyskano zadawalający efekt ograniczenia energii wibroakustycznej emitowanej przez prasę mechaniczną.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania akustyczne wykazały, że wibroakustyczna zasada wzajemności może być zastosowana do oceny ilościowego wpływu emisji energii wibroakustycznej poszczególnych źródeł maszyny na dany punkt obserwacji, np. na stanowisko operatora maszyny, oraz do oceny skuteczności poszczególnych zabezpieczeń wibroakustycznych zastosowanych na każde źródło tej energii.

Końcowe wyniki badań akustycznych z wykorzystaniem wibroakustycznej zasady wzajemności pokazały, że wszystkie podzespoły prasy z zastosowanymi zabezpieczeniami wibroakustycznymi mają taki sam wpływ na poziom ciśnienia akustycznego we wszystkich trzech punktach obserwacji. Możliwość określenia ilościowego wpływu emisji energii wibroakustycznej każdego podzespołu prasy dała w rezultacie efekt w postaci znacznego obniżenia aktywności akustycznej każdego zidentyfikowanego źródła energii wibroakustycznej, w konsekwencji czego uzyskano znaczną poprawę klimatu akustycznego na stanowisku pracy operatora w trakcie realizacji procesu technologicznego dla obu trybów pracy ciągłego i skokowego. Równoważny poziom dźwięku A na stanowisku pracy operatora przed zastosowaniem zabezpieczeń wynosił 94,4 dB, a po zastosowaniu na prasie zabezpieczeń wibroakustycznych jego wartość spadła o 12 dB i wynosiła 82,1 dB.

Literatura

- [1] Engel Z.: *Zasada wzajemności*. Kraków, UWND AGH, 2000, ISBN 83-88408-56-9
- [2] Engel Z., Gołaś A.: *Emission Efficiency Analysis of Impact Sound Sources*. Proc. INTER NOISE'85, Munchen 1985, 1215–1217
- [3] Engel Z., Sikora J., Turkiewicz J.: *Źródła hałasu uderzeniowego w prasach*. Bezpieczeństwo Pracy, Nauka i Praktyka, Miesięcznik Centralnego Instytutu Ochrony Pracy, Warszawa 1999, Nr 9, s. 2–5
- [4] Engel Z., Sikora J., Turkiewicz J.: *Hałasy uderzeniowe w prasach*. Kwartalnik AGH Mechanika, t. 19, z. 2, 2000, s. 151–168
- [5] Gawlik M.: *Zasada wzajemności w badaniach wibroakustycznych*. Kraków, AGH 2001 (Rozprawa doktorska)
- [6] Lyamshev L.M.: *Reciprocity Principle and its Applications*. Proc. Noise 93, St. Petersburg 1993, vol. 41–51
- [7] Praca zbiorowa pod kier. Z. Engela: *Hałasy uderzeniowe w przemyśle i ich zwalczanie na przykładzie pras*. SPR-1 „Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia człowieka w środowisku pracy”, zadanie badawcze nr 03.8.13, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki AGH Etap I–III, 1998–2000
- [8] Turkiewicz J.: *Zwalczanie przemysłowych zagrożeń wibroakustycznych na przykładzie pras mechanicznych*. Kraków, AGH 2004 (Rozprawa doktorska)