MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
44, s. 229-236, Gliwice 2012

MODEL STEROWANIA W PRZEMYSŁOWYM SYSTEMIE AKTYWNEJ REDUKCJI HAŁASU

MAREK PAWEŁCZYK[1], MARIUSZ LATOS[2], SŁAWOMIR BARTOSZEK[2]

[1]*Instytut Automatyki, Politechnika Śląska*
e-mail: marek.pawelczyk@polsl.pl
[2]*Instytut Techniki Górniczej KOMAG*
e-mail: mlatos@komag.eu, sbartoszek@komag.eu

Streszczenie. Przedstawiono praktyczne sposoby ochrony narządu słuchu pracowników na stanowiskach pracy poprzez zastosowanie rozwiązań personalnych i globalnych. Prezentując rozwiązanie personalne, bazujące na zastosowaniu aktywnej wkładki dousznej, pokazano proces projektowania układu sterowania w strukturze kompensacji o stałych parametrach, jak również wyniki badań eksperymentalnych. Omówiono rozwój metod ochrony przed hałasem rozwijanych w ITG KOMAG poprzez propozycje rozwiązań globalnych na wybranych stanowiskach pracy.

1. WSTĘP

W warunkach przemysłowych często spotykany jest hałas o wysokim poziomie ciśnienia akustycznego. Fakt ten ma bardzo negatywny wpływ na narząd słuchu, a także inne organy i zmysły. Ochrona słuchu może być zrealizowana globalnie lub za pomocą ochronników personalnych.

System redukcji hałasu w przemyśle powinien być, w miarę możliwości, realizowany z użyciem połączonych metod tłumienia pasywnego i redukcji aktywnej. Im lepsza jest ochrona pasywna, tym mniej energii potrzeba do realizacji aktywnej redukcji hałasu. Jest to szczególnie ważne w przypadku przenośnych ochronników personalnych.

Ograniczenie ponadnormatywnej emisji hałasu w przypadku niektórych źródeł jest niezwykle trudne, a niejednokrotnie nawet niemożliwe. Przyczyną tego jest wymaganie m.in. odpowiednich stref dostępu, czy stosowanych biernych środków redukcji. Takie obostrzenia, konieczne do uwzględnienia przy projektowaniu zabezpieczeń przeciwhałasowych, istotnie wpływają na skuteczność środka redukcji dźwięku. Jednocześnie zwiększają one koszty realizacji inwestycji. Niepokojącym zjawiskiem pojawiającym się w związku z tym jest rezygnacja części elektrociepłowni i elektrowni z prowadzenia działań w zakresie ograniczania hałasu.

W artykule przedstawiono algorytmy aktywnej redukcji hałasu w personalnym aktywnym ochronniku słuchu (projektowanym w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej), jak również zaprezentowano rozwój aktywnych systemów redukcji hałasu opracowywanych w ITG KOMAG.

2. SYSTEM PERSONALNY

Często, ze względów technicznych i implementacyjnych, narażenia na hałas nie można ograniczyć innymi środkami niż za pomocą ochronników personalnych. Stosowanie ochronników nausznych jest związane z uciskiem, otarciami i odparzeniami. Dlatego coraz częściej używa się wkładek dousznych, które oprócz ochrony pasywnej powinny zapewniać ochronę aktywną [3].

2.1. Układ sterowania w systemie personalnym z aktywną wkładką douszną

Zastosowany układ aktywnej redukcji hałasu o stałych parametrach pozwala, w przeciwieństwie do układów adaptacyjnych, na ograniczenie przejściowych efektów akustycznych i wyeliminowanie problemów związanych ze zbieżnością algorytmu, występujących w trakcie strojenia filtrów sterujących [1,5,8]. Stosowanie układu o stałych parametrach jest uzasadnione w przypadkach, gdy obiekty elektroakustyczne różnią się nieznacznie od ich modeli i hałas jest stacjonarny [2,7]. Dodatkową zaletą ww. systemu jest mała złożoność obliczeniowa algorytmu.

Układ sterowania w strukturze kompensacji przedstawiono na rys.1, gdzie: P – tor elektroakustyczny pierwotny, S – tor elektroakustyczny wtórny, W – filtr sterujący, i – czas dyskretny, $x(i)$ – zdyskretyzowany pomiar w pobliżu źródła hałasu – sygnał referencyjny, $y(i)$ – zdyskretyzowany pomiar ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji, będącego efektem interferencji hałasu i wtórnej fali akustycznej generowanej przez układ sterowania – tzw. sygnał błędu, $d(i)$ – zdyskretyzowany pomiar ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji w przypadku braku sterowania – tzw. sygnał zakłócenia. Sygnał błędu można wyrazić jako

$$y(i) = (P + WS)x(i) . \tag{1}$$

W najprostszej postaci filtr sterujący przyjmuje postać[1,7]:

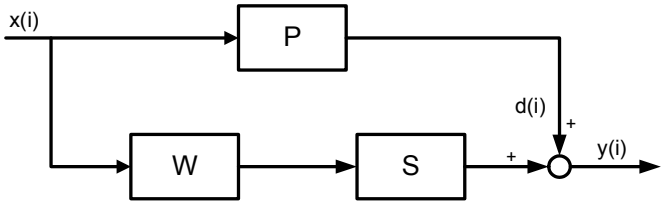
$$W_{opt} = -\frac{\hat{P}}{\hat{S}}, \tag{2}$$

gdzie $\hat{P}$ i $\hat{S}$ reprezentują odpowiednio modele toru pierwotnego i wtórnego. Przy założeniu wysokiej dokładności modelowania torów w rozważanych zakresach częstotliwości filtr taki zapewniałby bardzo wysoki poziom redukcji ciśnienia akustycznego hałasu. Jednak w przypadku nieminimalnofazowości toru wtórnego, filtr ten byłby niestabilny, a w sytuacji, gdyby opóźnienie w torze wtórnym było większe od opóźnienia w torze pierwotnym, byłby również nieprzyczynowy. Minimalizując wartość średniokwadratową sygnału błędu oraz stosując faktoryzację modelu obiektu na części wewnętrzną, $\hat{S}^{(i)}$, oraz zewnętrzną, $\hat{S}^{(o)}$, suboptymalny, przyczynowy filtr sterujący można znaleźć stosując podejście Wienera w dziedzinie częstotliwości [1,4,7].

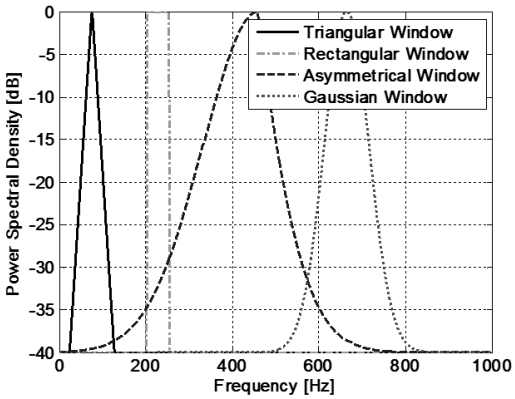
$$W_{opt+}(n) = -\frac{1}{F(n)\hat{S}^{(o)}(n)}\left\{\frac{\hat{P}(n)F(n)}{\hat{S}^{(i)}(n)}\right\}_{+}, \tag{3}$$

gdzie: n – numer binu częstotliwości, $F(n)$ – odpowiedź częstotliwościowa minimalnofazowego filtra modelującego sygnał referencyjny.

Powyższe rozważania prowadzono przy założeniu stacjonarności hałasu. Filtr sterujący, zaprojektowany do redukcji danego hałasu, nie gwarantowałby jednak wysokiej skuteczności w przypadku zmiany parametrów hałasu, np. zmiany składowych częstotliwościowych. Jeżeli to jest możliwe, należy unikać stosowania w aplikacjach przemysłowych układów adaptacyjnych ze względu na wyżej wymienione problemy. Pomimo że hałas przemysłowy może mieć charakter niestacjonarny, to zwykle można określić zakres częstotliwości zasadniczych jego składowych. Można zatem wykorzystać tę samą procedurę projektowania filtra sterującego, jak przy sygnałach stacjonarnych, wykorzystując jednak ideę uogólnionego zakłócenia [3]. Sygnał uogólnionego zakłócenia najwygodniej zdefiniować w dziedzinie częstotliwości. Gęstość widmowa mocy uogólnionego zakłócenia jest przedstawiona w postaci okna na charakterystyce częstotliwościowej, obejmującego wybrany zakres częstotliwości (rys. 2). Ma to bezpośredni wpływ na postać filtra F w (5). Kształt okien może być różny, co ma wpływ na osiąganą wartość redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu, zarówno w zakresie częstotliwości definiowanym przez wybrane okna, jak i poza tym zakresem [2]. Gęstość widmowa mocy nie niesie informacji o fazie sygnałów. W przypadku układów kompensacji zależności fazowe pomiędzy sygnałem referencyjnym a sygnałem zakłócenia w punkcie redukcji są krytycznie istotne. Dlatego równania filtra Wienera są zapisane na podstawie tylko sygnału referencyjnego, a ocena sygnału błędu jest otrzymywana poprzez filtrację sygnału referencyjnego przez model toru pierwotnego.



Rys. 1. Układ sterowania w strukturze kompensacji [Źródło: opracowanie własne]



Rys. 2. Gęstość widmowa mocy uogólnionego zakłócenia w kształcie okna [Źródło: opracowanie własne]

2.2. Eksperymenty

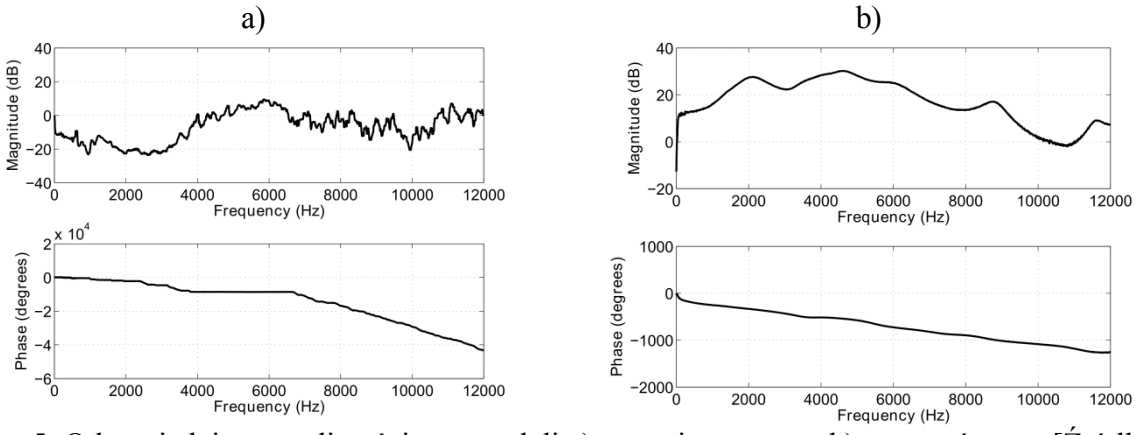
Aktywna wkładka douszna (rys. 3) zamocowana została w kanale sztucznego ucha (urządzenie standaryzowane), będącego elementem sztucznej głowy, poprzez adapter odwzorowujący małżowinę uszną (rys. 4). Mocowanie wkładki dousznej w kanale usznym odbywa się w identyczny sposób, jak stopera antyhałasowego. Rozmiary wkładki są również zbliżone do rozmiarów stopera. Dzięki anatomicznemu kształtowi uchwytu, po założeniu go na małżowinę uszną, zapewniony jest właściwy docisk do kanału usznego oraz uniemożliwione jest wypadnięcie wkładki. Częstotliwość próbkowania ustalono na 24 kHz.

Mikrofon referencyjny ulokowany jest na zewnątrz wkładki dousznej. Mikrofon pomiarowy wewnątrz sztucznego ucha był wykorzystany przy identyfikacji modeli torów elektroakustycznych pierwotnego i wtórnego oraz do monitoringu redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu.

Rys. 3. Aktywna wkładka douszna wraz z uchwytem, przewodem i złączem

Rys. 4. Sztuczna głowa wraz z adapterem odwzorowującym małżowinę uszną

Odpowiedzi częstotliwościowe zidentyfikowanych torów pierwotnego i wtórnego przedstawiono na rys. 5. Estymację parametrów modeli przeprowadzono z użyciem metody zmiennej instrumentalnej.



Rys.5. Odpowiedzi częstotliwościowe modeli a) toru pierwotnego b) toru wtórnego [Źródło: opracowanie własne]

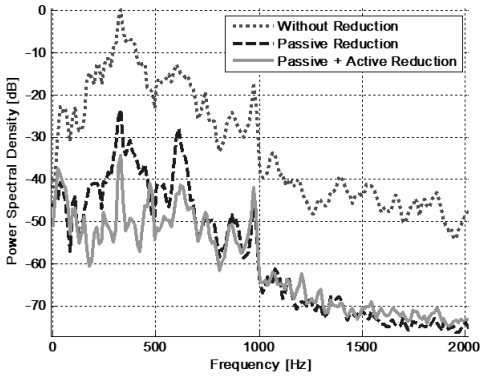
W tabeli 1 oraz na rys. 6a przedstawiono wyniki redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu generowanego przez wentylator, przy oknie Gaussa dla uogólnionego zakłócenia, dobranym do zakresu częstotliwości 100-700 Hz.

Można zaobserwować, że wybrana wkładka douszna zapewnia wysokie tłumienie pasywne. Dzięki zastosowanemu systemowi sterowania można dodatkowo zwiększyć wartość redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu w zakresie częstotliwości zdefiniowanym poprzez okno uogólnionego zakłócenia, natomiast utrzymać dotychczasowy poziom ciśnienia akustycznego poza tym oknem. Widoczne jest, że układ proponowany (wykorzystujący ideę uogólnionego zakłócenia) jest bardziej wrażliwy na zwiększenie opóźnienia w torze wtórnym niż układ optymalny, zaprojektowany dla konkretnego hałasu.

Tabela 1. Wartości redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu [Źródło: opracowanie własne]

Wartość redukcji poziomu ciśnienia akustycznego będąca efektem sterowania [dBA]		Wartość całkowitej redukcji poziomu ciśnienia akustycznego [dBA]	
W zakresie częstotliwości 100-700 Hz	W pełnym zakresie częstotliwości	W zakresie częstotliwości 100-700 Hz	W pełnym zakresie częstotliwości
11.2	**9.4**	**35.2**	**33.3**

Zaobserwowane wartości aktywnej redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu w poszczególnych halach Elektrowni „Rybnik" S.A., wraz z doborem zakresów częstotliwości, dla swobodnie narastających i opadających okien uogólnionego zakłócenia, przedstawiono w tabeli 2. Stosując układ proponowany, uzyskuje się zbliżone wyniki do układu optymalnego, ale zagwarantowana jest redukcja hałasu niestacjonarnego o składowych częstotliwościowych należących do zakresu objętego oknem uogólnionego zakłócenia.



Rys.6. Gęstości widmowe mocy zdyskretyzowanego ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji; [Źródło: opracowanie własne].

Tabela 2. Wartości aktywnej redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu [Źródło: opracowanie własne]

Hale Elektrowni „Rybnik" S.A.	Aktywna redukcja poziomu ciśnienia akustycznego hałasu [dBA]		Częstotliwości charakterystyczne okien uogólnionego zakłócenia [Hz]		
	Układ proponowany	Układ optymalny	Częstotliwość dolna	Częstotliwość charakterystyczna	Częstotliwość górna
Młyny kulowe	**15.9**	**13.8**	**50**	**200**	**2000**
Turbogeneratory (0)	**5.0**	**4.5**	**50**	**100**	**1000**
Turbogeneratory (1)	**15.0**	**15.1**	**50**	**80**	**2100**
Wentylator zewn.	**9.9**	**< 0**	**50**	**80**	**500**
Sprężarki	**14.5**	**14.7**	**50**	**70**	**800**
Chłodnie (0)	**13.3**	**12.1**	**50**	**500**	**1500**
Chłodnie (-1)	**14.8**	**14.7**	**50**	**100**	**2000**
Chłodnie (-2)	**16.9**	**17.1**	**50**	**200**	**3200**

3. PERSPEKTYWY ROZWOJU GLOBALNYCH SYSTEMÓW AKTYWNEJ REDUKCJI HAŁASU

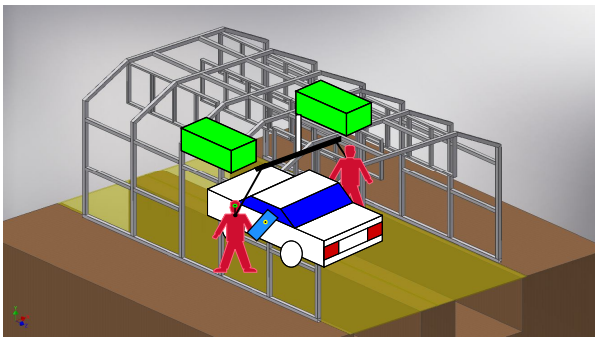
Tworzenie personalnych ochronników słuchu nie jest uzasadnione w każdym przypadku. Ze względu na konieczność zapewnienia pracownikom ochrony przed hałasem i dodatkowo, uwzględnienia aspektów ochrony środowiskowej, dużo bardziej atrakcyjne dla potencjalnego odbiorcy jest zastosowanie systemów do tworzenia dużych, przestrzennych stref ciszy. Problemów do rozwiązania jest wtedy więcej. Należy dopasować się do specyfiki pracy na danym stanowisku, w konkretnym zakładzie przemysłowym, mieć możliwość zamontowania elementów składowych systemu tak, aby nie przeszkadzały w pracy i współpracowały z rozwiązaniami pasywnymi, zapewnić odporność elementów pomiarowych i aktywnych na warunki środowiskowe oraz wziąć pod uwagę zawartość spektralną hałasu pod kątem doboru algorytmu sterowania.

ITG KOMAG prowadzi prace badawcze zmierzające do poprawy istniejących lub opracowania własnych aktywnych ochronników słuchu. Mając na uwadze doświadczenie w zakresie projektowania przestrzennych systemów pasywnych, zdecydowano o podjęciu prac związanych z aktywnym tworzeniem przestrzennych stref ciszy, jako uzupełnienia systemów pasywnych.

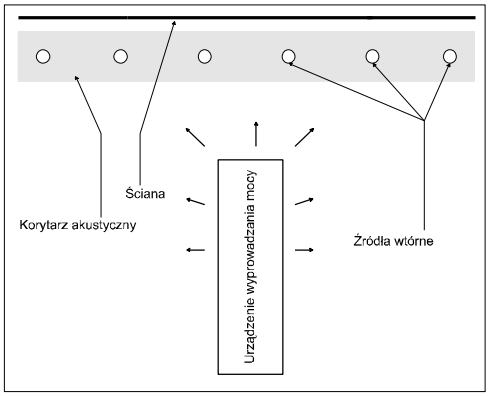
3.1. Linia technologiczna SKID-1 fabryki Fiat Auto Poland

Aktualnie prowadzone są w ITG KOMAG badania nad wdrożeniem aktywnych metod redukcji hałasu na stanowisku montażu drzwi do samochodów, na linii technologicznej SKID-1 w fabryce samochodów Fiat Auto Poland [9]. Na ponadnormatywną emisję hałasu narażonych jest sześcioro pracowników, przy czym dwoje z nich pracuje bezpośrednio na omawianym stanowisku, a czworo pozostałych – na trzech stanowiskach przyległych. Operacja dopasowania drzwi powtarzana jest w przybliżeniu co ok. 1 min. Poziom ciśnienia akustycznego hałasu na hali przemysłowej mieści się w przedziale od L_{Aeq} = 74.3 dBA do L_{Aeq} = 95.0 dBA. Po zastosowaniu osłony akustycznej (rys. 7) poziom ciśnienia akustycznego hałasu na trzech stanowiskach przyległych nie przekracza 60 dBA, w związku z tym nie ma konieczności wdrażania metod aktywnych na tych stanowiskach. Newralgicznym punktem jest stanowisko dopasowania, na którym poziom ciśnienia akustycznego hałasu odniesiony do 8-godzinnego czasu pracy wynosi $L_{EX,8h}$ = 90.1 dBA (przekroczenie dopuszczalnego zakresu o 5.1 dBA). Zagwarantowanie dopuszczalnego poziomu ciśnienia akustycznego na tym stanowisku powinno się odbyć za pomocą metod aktywnych.

Rejestrowany sygnał ciśnienia akustycznego hałasu na stanowisku dopasowania ma charakter niestacjonarny. Po impulsie akustycznym o dużej mocy akustycznej następuje wybrzmiewanie trwające ok. 30 s. Dominujące składowe częstotliwościowe występują w zakresie 700-2000 Hz. Ponieważ na stanowisku pracują dwie osoby, wokół głowy każdej z nich należy wytworzyć strefę ciszy o odpowiednim rozmiarze. Jako elementy wykonawcze sugerowane są kolumny głośnikowe, ale rozważane są też płyty drgające. Zakładając, że pracownicy wykonują swoją pracę mniej więcej w tym samym miejscu, do wytworzenia strefy ciszy dla każdego z nich może wystarczyć jedno źródło wtórne. Niezbędne będzie umieszczenie w polu akustycznym dwóch mikrofonów, wokół których tworzona będzie strefa ciszy (umieszczonych w pobliżu głów pracowników) oraz dwóch sensorów referencyjnych (umieszczonych w pobliżu narzędzi generujących hałas). Rozważane jest zastosowanie sterowania adaptacyjnego.



Rys. 7. Linia technologiczna z osłoną akustyczną i sugerowaną lokalizacją źródeł wtórnych i elementów pomiarowych [Źródło: opracowanie własne]



Rys. 8. Korytarz akustyczny w hali turbogeneratorów, rzut z góry [Źródło: opracowanie własne]

3.2. Hala turbogeneratorów Elektrowni Rybnik S.A.

W ITG KOMAG realizowany jest również projekt pt. „Metoda hybrydowej redukcji poziomu dźwięku pochodzącego z urządzeń wyprowadzenia mocy turbozespołów". Celem projektu jest opracowanie metodyki projektowania systemu hybrydowego zmniejszającego oddziaływanie źródeł hałasu na otaczające środowisko oraz stanowiska pracy. Przyczynami braku możliwości ograniczania hałasu wyłącznie konwencjonalnymi metodami są:
- problemy odprowadzania ciepła,
- problemy dostępu do stref kontrolnych,
- problemy dostępu do stref ze względu na przepisy p.poż.,
- problemy bezpiecznego prowadzenia remontów, itp.

Konieczność uwzględnienia ww. ograniczeń prowadzi do obniżenia skuteczności redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu poprzez środki pasywne. Zapewnienie nawet minimalnej ochrony pasywnej wydaje się jednak konieczne i początkowe etapy prac projektu dotyczą stworzenia modelu geometrii przestrzeni badawczej, wykonania pomiarów środowiskowych i stworzenia modeli osłon pasywnych. W kolejnym etapie przeprowadzone zostaną badania z użyciem środków aktywnych.

Ze względów technicznych nie jest możliwe zapewnienie globalnej ochrony aktywnej w całej hali turbogeneratorów. Rozważane jest stworzenie wirtualnego korytarza akustycznego w pobliżu jednej ze ścian hali (rys. 8), gdyż stosunkowo rzadko prowadzone są tam prace, a przechodzący pracownicy mogliby poruszać się określonym torem. Rozważane jest zastosowanie sterowania adaptacyjnego.

4. PODSUMOWANIE

Hałas jest istotnym zagrożeniem występującym na stanowiskach pracy i wpływającym na bezpieczeństwo pracy. Jednym z analizowanych systemów jest system aktywnej redukcji hałasu o stałych parametrach, wykorzystany w miniaturowym, personalnym ochronniku słuchu. Do testów wykorzystano hałasy zarejestrowane w Elektrowni „Rybnik" S.A. Do konstrukcji filtrów sterujących zastosowano podejście Wienera wraz z wprowadzeniem idei uogólnionego zakłócenia do wykorzystania przy redukcji poziomu ciśnienia akustycznego hałasu niestacjonarnego. Podejście to zapewnia wyższą lub zbliżoną wydajność w porównaniu do optymalnej filtracji Wienera w pełnym zakresie częstotliwości, natomiast dla

założonego zakresu częstotliwości wydajność zawsze jest wyższa. Wrażliwość systemu proponowanego na opóźnienie w torze wtórnym jest wyższa od wrażliwości optymalnego systemu Wienera.

Redukcja hałasu na stanowiskach pracy może być realizowana nie tylko za pomocą ochronników słuchu. Artykuł zawiera też propozycje rozwiązań globalnych na wybranych stanowiskach pracy.

Propozycja systemu aktywnego do stworzenia wirtualnego korytarza akustycznego w hali turbogeneratorów Elektrowni Rybnik S.A. wydaje się być jedną z możliwości wykorzystania globalnego systemu aktywnego na tej hali. Trzeba wziąć pod uwagę ograniczenia techniczne oraz nieprzewidywalność trajektorii poruszania się pracowników w sensie ogólnym.

Aktywna redukcja hałasu na linii SKID-1 w fabryce Fiat Auto Poland powinna zagwarantować obniżenie poziomu hałasu o niewiele ponad 5 dBA. Ze względu na specyfikę pracy na tym stanowisku rozwiązanie z jednym źródłem wtórnym w pobliżu każdego z dwóch pracowników wydaje się być najbardziej korzystne.

LITERATURA

1. Elliott S.J.: Signal processing for active control. London: Academic Press, 2001.
2. Latos M., Pawelczyk M.: Feedforward vs feedback fixed-parameter H_2 control of non-stationary noise. "Archives of Acoustics" 2009, 4, 34, 2009, p. 521–535.
3. Latos M.: Active noise reducing earplug with speech signal processing, Rozprawa doktorska. Gliwice: Pol. Śl., 2011.
4. Morari M., Zafiriou E.: Robust process control. Prentice Hall 1989.
5. Nelson P., Elliott S.J.: Active control of sound. Academic Press 1992.
6. Oppenheim A., Schafer R.: Digital signal processing. Prentice Hall, 1975.
7. Pawelczyk M.: Feedback control of acoustic noise at desired locations. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005.
8. Widrow B., Stearns S.D.: Adaptive signal processing. New Jersey: Prentice Hall, 1985.
9. ITG KOMAG, Redukcja dźwięku na stanowiskach pracy z użyciem połączonych metod: pasywnej i aktywnej, Analiza układu pod kątem wdrożenia metod aktywnych, Wewnętrzna praca statutowa, E/BW-12375/OR2, 2011.

CONTROL MODEL IN THE INDUSTRIAL ACTIVE NOISE REDUCING SYSTEM

Summary. Technical approaches to hearing protection in the workplace using personal and global solutions have been discussed. In the personal solution, based on active earplugs, the process of designing a feedforward, fixed parameter control system, as well as real-world experimental results have been presented. Active noise reduction methods under development by ITG KOMAG have been considered as a part of proposing global solutions in the selected workplaces.