

Andrzej WIECZOREK, Jarosław JOOSTBERENS
Politechnika Śląska, Gliwice

EKSPERYMENTALNE BADANIA WŁAŚCIWOŚCI AKUSTYCZNYCH PRZEKŁADNI Z KOŁAMI O RÓŻNEJ WYSOKOŚCI ZĘBÓW

Streszczenie. Jednym z głównych kierunków zmian konstrukcyjnych przekładni zębatych jest zmniejszenie efektów akustycznych towarzyszących ich pracy. W opracowaniu przedstawione zostały wyniki badań doświadczalnych uzębień o różnej wysokości.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF ACOUSTIC PROPERTIES OF GEARS WITH DIFFERENT HEIGHT TOOTH RATIO

Summary. One of the main direction of some changes in a gear design is reduction of acoustic effects being caused by variation of inner and outer excitation forces. In this paper are discussed results of experimental researches of gears with different height tooth ratio. Directions of constructional reduction of noise emission are also shown.

1. Wprowadzenie

W związku z powszechnością stosowania przekładni zębatych, niezwykle istotnymi czynnikami z uwagi na ochronę środowiska naturalnego i zmniejszenie natężenia czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [6] są zmniejszenie emisji hałasu do otoczenia oraz poprawa warunków pracy.

Przekładnia zębata połączona sprzęgłami z silnikiem napędowym i maszyną roboczą tworzy układ elementów sprężystych o określonych masach, które przy pobudzaniu ulegają drganiom. Drganiom tym towarzyszy emisja hałasu do otoczenia. Zwiększenie cichobieżności pracy przekładni można uzyskać m.in. poprzez zmniejszenie międzyzębnych sił dynamicznych. Jedną z najistotniejszych przyczyn wzbudzeń dynamicznych jest zmiana wartości sztywności zazębienia w wyniku zmiany liczby par zębów będących w przyporze.

Dla jednakowych przebiegów sztywności zazębienia pojedynczych par zębów powstają całkowicie różne (pod względem ilościowym i jakościowym) przebiegi wypadkowej sztywności zazębienia, w zależności od całkowitego wskaźnika zazębienia. Ze względu na stan dynamiczny przekładni dąży się, by wartość wskaźnika zazębienia była równa liczbie całkowitej większej od jedności. W tym przypadku, na podstawie prac [4,5], należy spodziewać się minimum hałasu.

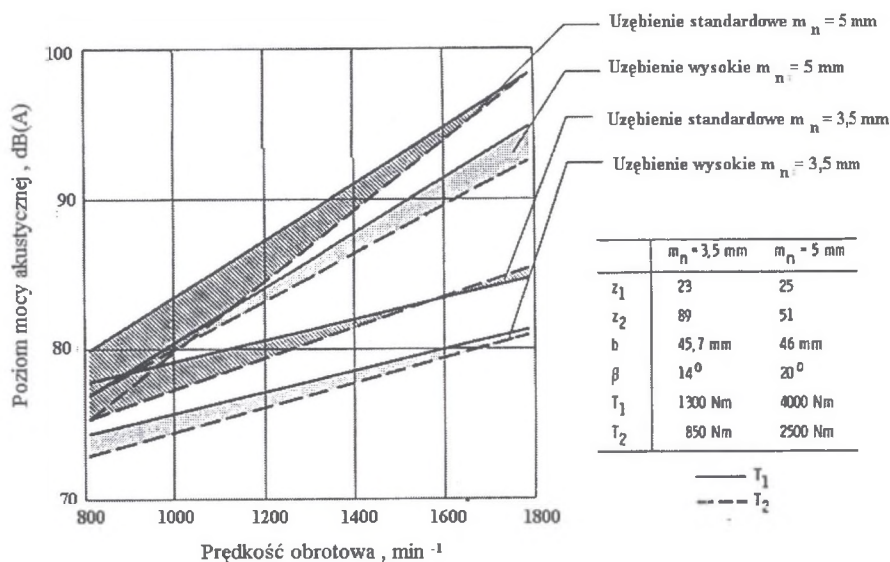
W kołach opartych na standardowym zarysie odniesienia uzębienia wg normy PN-92/M-88503, stosowanych w rzeczywistych przekładniach zębatych, wskaźnik zazębienia wynosi najczęściej $1,4 \div 1,5$. Wzrost czołowego wskaźnika zazębienia do wartości bliskiej 2,0 można uzyskać m.in. poprzez zwiększenie wysokości uzębienia (dla uzębień o większej wysokości zębów niż 2,25 modułu stosuje się określenie uzębienia wysokie) i/lub zmniejszenie kąta przyporu.

Wśród prac poświęconych właściwościom akustycznym przekładni z kołami o uzębieniu wysokim należy wymienić pracę [1], w której przedstawiono wyniki pomiarów poziomu mocy akustycznej uzyskane dla przekładni zębatych o zróżnicowanej wysokości i szerokości uzębienia. Przykładowe wyniki badań zilustrowano na rysunku 1. Jak widać, zastosowanie uzębienia wysokiego skutkowało zmniejszeniem hałasu dla całego rozpatrywanego zakresu prędkości.

W pracy Wintera [7] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych hałasu przekładni zębatych z kołami o zębach standardowych, niskich i wysokich. W przypadku uzębienia wysokiego otrzymano dwa różniące się wyniki. Dla minimalnego obciążenia koła o zębach wysokich były jedne z najgłośniejszych, dla największego - najcichsze. Według tego autora, przy małych obciążeniach kół decydujący wpływ na hałas mają odchyłki wykonawcze, natomiast przy większych zaznacza się korzystny wpływ zwiększonej wartości czołowego wskaźnika zazębienia.

Badania hałasu przekładni z kołami o różnej wysokości zębów przeprowadził także Knabel [2]. Na ich podstawie stwierdził zmniejszenie hałasu dla uzębienia wysokiego o zębach prostych i wskaźniku zazębienia $\varepsilon_{\alpha}=2,15$ w porównaniu z uzębieniem standardowym.

W pracy [8] Joachim i Lauster stwierdzili, że zastosowanie uzębienia wysokiego w kołach o zębach prostych spowodowało, w odniesieniu do uzębienia standardowego, zmniejszenie poziomu hałasu o ok. 5 dB.



Rys. 1. Wyniki pomiarów poziomu mocy akustycznej przekładni zębatych o różnicowanej wysokości [1]
 Fig. 1. Results of acoustic power level of gears with different height tooth ratio [1]

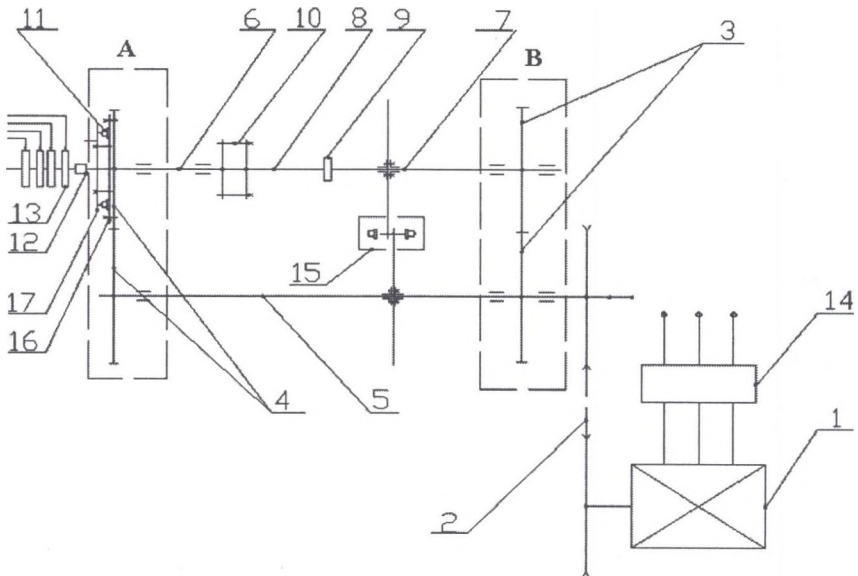
W badaniach Niemanna i Unterbergera [9] mierzono poziom ciśnienia akustycznego w czasie eksploatacji kół o zębach prostych i różnej wysokości uzębienia. Dla badanych zakresów prędkości i obciążeń stwierdzono obniżenie poziomu ciśnienia akustycznego w okolicach wartości czołowego wskaźnika zazębienia $\varepsilon_\alpha = 2,0$, natomiast dla wartości wskaźnika zazębienia w zakresie $\varepsilon_\alpha = 1,8 \div 1,1$ nie zaobserwowano lokalnych ekstremów. Wzrost hałasu odnotowano dopiero przy wartości wskaźnika $\varepsilon_\alpha = 1,0$.

Niemann i Hösel [10] przeprowadzili badania akustyczne przekładni zębatych o zębach skośnych standardowych i wysokich. W celu stwierdzenia wpływu czołowego wskaźnika zazębienia dla obu typów tych uzębień zmniejszono średnice zewnętrzne kół i w wyniku tego otrzymano wartości tego wskaźnika w zakresach: zęby standardowe – $\varepsilon_\alpha = 1,6 \div 1,1$; zęby wysokie – $\varepsilon_\alpha = 2,0 \div 1,1$. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono niewielki lub całkowity brak wpływu wskaźnika ε_α na efekty akustyczne dla zakresu wysokości uzębienia odpowiadającego wartościom czołowego wskaźnika zazębienia $\varepsilon_\alpha = 2,0 \div 1,7$. Natomiast w zakresie $\varepsilon_\alpha < 1,7$, wraz ze zmniejszeniem się wysokości zębów, zwiększył się znacząco poziom hałasu.

Jak wynika z przedstawionego zestawienia, rezultatów badań hałasu przekładni z kołami o uzębieniu wysokim jest stosunkowo dużo, ale otrzymane wyniki w zależności od autora znacząco się różnią. Fakt ten skłonił do podjęcia w Instytucie Mechanizacji Górnictwa badań właściwości akustycznych przekładni o uzębieniach różniących się wysokością zębów.

2. Warunki badań

Badania eksperymentalne, mające na celu określenie wpływu wysokości uzębienia kół walcowych o zębach prostych na poziom mocy akustycznej, przeprowadzono na stanowisku badawczym pracującym w układzie tzw. mocy zamkniętej [3]. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego kół zębatach w układzie mocy zamkniętej

Fig. 2. The scheme of experimental rig

W skład tego układu wchodzi tzw. przekładnia zamykająca (oznaczona symbolem B na rys. 2) z parą kół zębatach (3) szerokości 50 mm wykonanych w 5 klasie dokładności wg PN - 79/M-88522 oraz przekładnia badawcza (oznaczona symbolem A na rys. 2) z kołami (4), które są obiektem badań. Badane koła (4) są połączone z kołami (3) przekładni zamykającej wałami (5), (6) i (7) oraz wałkiem skrętnym (8). Wałek skrętny połączony jest z wałem (6) poprzez sprężko napinające (10), za pomocą którego obciążany jest układ zadany momentem statycznym. Moment ten wywoływany jest poprzez dźwignię z zawieszonymi na jej końcu obciążnikami, zaś druga dźwignia służy do zablokowania sprężka podczas zadawania obciążenia. Do pomiarów poziomu mocy akustycznej stosowano sonometr typu 2236 firmy Bruel&Kjaer.

W badaniach wykorzystano koła szlifowane o wysokości zębów $h=3,0$ modułu (WS-3.0), $h=2,7$ modułu (WS-2.7) oraz koła o uzębieniu standardowym, także szlifowanym. Dobór taki pozwala porównać właściwości akustyczne przekładni o różnej wartości wskaźnika zazębienia, który dla uzębienia WS-3.0 wynosi $\varepsilon_\alpha=2,03$, natomiast dla uzębienia standardowego $\varepsilon_\alpha=1,625$, a ponadto umożliwia porównanie właściwości przekładni o porównywalnym wskaźniku zazębienia (wskaźniki zazębienia dla kół WS-2.7 oraz dla kół StS są bardzo zbliżone). Zestawienie badanych par kół oraz ich charakterystycznych parametrów przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

Zestawienie badanych par kół oraz ich charakterystycznych parametrów

Symbol badanych kół	Współczynnik wysokości całkowitej h^*	Czołowy wskaźnik zazębienia ε_α	Srednia sztywność zazębienia c_{gm}	Rezonansowa prędkość obrotowa n_E , min^{-1}	Poślizg względny stopy zęba ζ_f (zębnik/koło)
WS-3.0	3,0	2,030	16,94	7655	-3,905/-3,904
WS-2.7	2,7	1,625	14,04	7132	-2,212/-2,288
StS	2,25	1,625	18,26	7857	-2,314/-2,192

W pracy przyjęto rozpatrywanie przebiegu nadwyżki dynamicznej w badanych kołach w funkcji częstotliwości zazębienia zgodnie z zależnością:

$$f_z = \frac{n_1 \cdot z_1}{60} \quad (1)$$

Właściwości akustyczne kół badano w zakresie częstotliwości zazębienia $f_z = (100+950)$ Hz.

Jako miarę obciążenia kół przyjęto jednostkowy wskaźnik obciążenia Q_u . Wskaźnik ten jest zdefiniowany [11] zależnością:

$$Q_u = \frac{2 \cdot M_{st}}{b_w \cdot d_{w1}^2} \cdot \left(\frac{1+u}{u} \right) \quad (2)$$

gdzie: M_{st} – statyczny moment obrotowy wynikający z zadanego obciążenia,

b_w – efektywna szerokość współpracujących zębów,

u – przełożenie.

3. Wyniki pomiarów poziomu mocy akustycznej

Na rysunkach 3+7 przedstawiono rezultaty badań właściwości akustycznych dla wszystkich badanych uzębień, uzyskane przy różnych wartościach jednostkowego wskaźnika obciążenia Q_u .

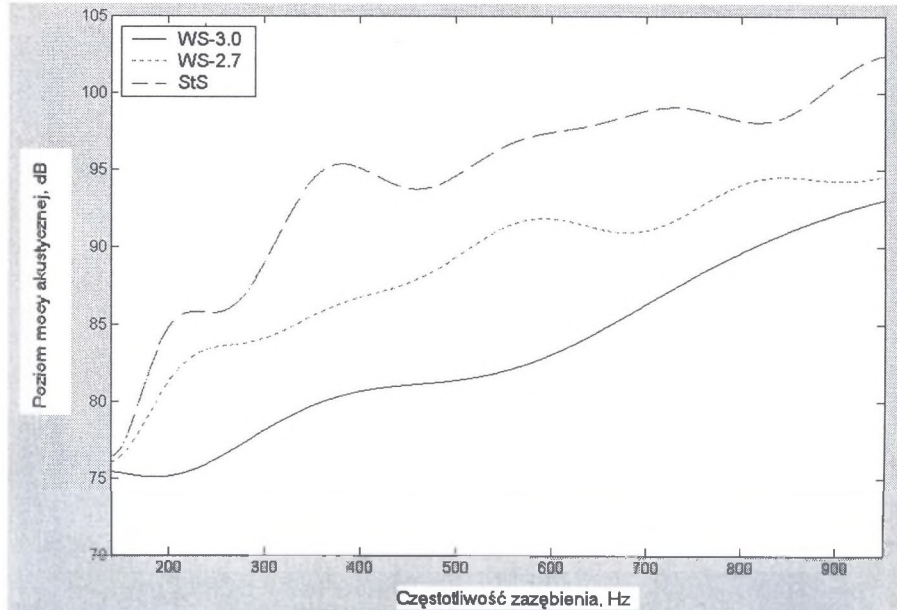
Na rysunku 3 zilustrowano przebiegi poziomu mocy akustycznej wyznaczone przy obciążeniu $Q_u=0,36$ MPa. Łatwo zauważyć, że szczególnie korzystne właściwości akustyczne wykazuje uzębienie wysokie o wysokości zębów 3 moduły (uzębienie to charakteryzuje się wartością czołowego wskaźnika zazębienia $\varepsilon_\alpha \approx 2,0$). Przebieg poziomu mocy akustycznej dla wymienionego uzębienia jest prawie liniowy. Najgorszymi własnościami wykazało się uzębienie standardowe StS.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki uzyskane przy obciążeniu $Q_u=0,72$ MPa. Najmniejsze wartości poziomu mocy akustycznej zmierzono dla uzębienia WS-3.0. Wyniki uzyskane dla uzębienia WS-2.7 były lepsze w porównaniu z tymi uzyskanymi dla kół o zębach standardowych, ale różnice nie były znaczące.

Na rysunku 5, na którym przedstawione zostały przebiegi uzyskane przy obciążeniu $Q_u=1,08$ MPa, zauważa się podobną zależność jak na rysunku 4, czyli najniższe wartości poziomu mocy akustycznej obserwuje się dla uzębienia WS-3.0, nieco wyższe dla uzębienia WS-2.7, a najwyższe dla uzębienia standardowego StS.

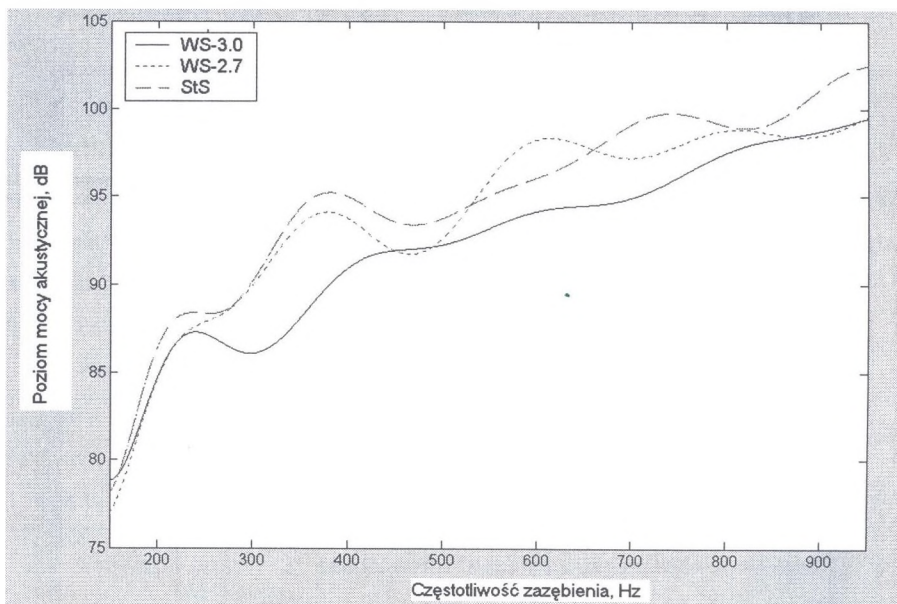
Dla obciążeń $Q_u=1,44$ MPa i $Q_u=1,78$ MPa (patrz rys. 6 i 7) występuje inna zależność, polegająca na tym, że najlepsze właściwości akustyczne miało uzębienie wysokie o wysokości zębów 3 moduły, natomiast koła o zębach standardowych (StS) wykazują niższe wartości poziomu mocy akustycznej niż uzębienie wysokie WS-2.7. Ale także dla tych przypadków różnice między wynikami uzyskanymi dla uzębień StS i WS-2.7 są niewielkie.

Wartości poziomu mocy akustycznej dla badanych kół zębatych różnią się w zależności od zadanego obciążenia i zadanej częstotliwości zazębienia. W celu oszacowania, o ile zmniejszył się hałas dzięki zastosowaniu uzębienia charakteryzującego się czołowym wskaźnikiem zazębienia $\varepsilon_\alpha \approx 2,0$, wyznaczono wartość średnią różnicy między wynikami uzyskanymi dla uzębień WS-3.0 i WS-2.7 oraz między WS-3.0 i StS, przy różnych wartościach częstotliwości zazębienia. Uzyskane wyniki zestawiono w tablicy 2.



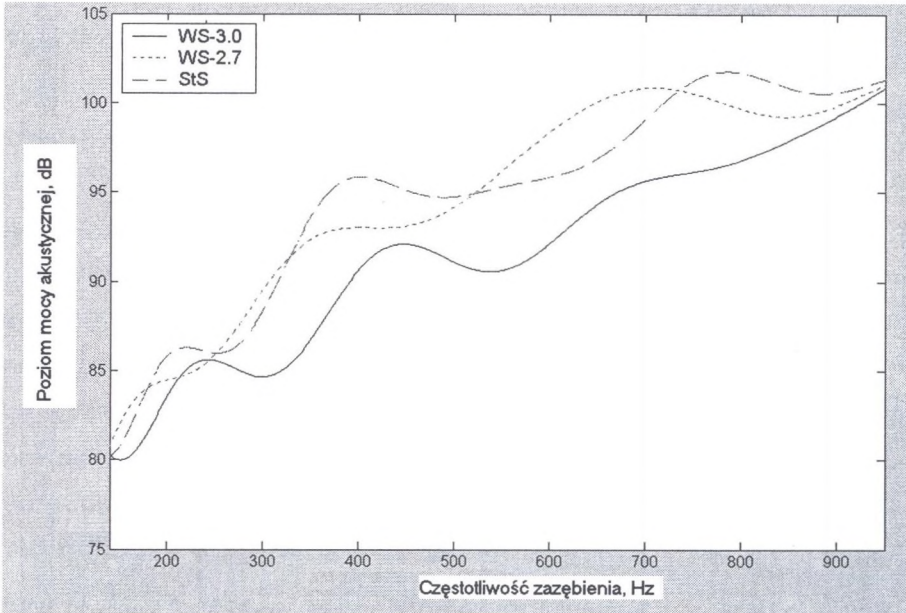
Rys. 3. Wykresy poziomu mocy akustycznej dla wariantów uzębienia wysokich szlifowanych: WS-3.0, WS-2.7 i uzębienia standardowego StS, przy wartości wskaźnika obciążenia jednostkowego $Q_u=0,36$ MPa

Fig. 3. Diagrams of acoustic power level determined for some variants of grinded high tooth WS-3.0, WS-2.7 and StS for unitary load coefficient $Q_u=0,36$ MPa



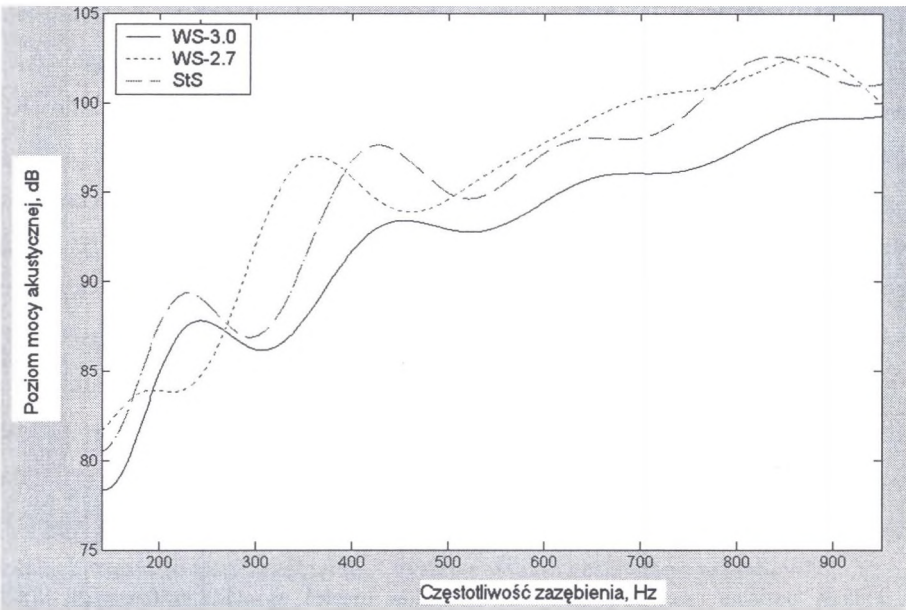
Rys. 4. Wykresy poziomu mocy akustycznej dla wariantów uzębienia wysokich szlifowanych: WS-3.0, WS-2.7 i uzębienia standardowego StS, przy wartości wskaźnika obciążenia jednostkowego $Q_u=0,72$ MPa

Fig. 4. Diagrams of acoustic power level determined for some variants of grinded high tooth WS-3.0, WS-2.7 and StS for unitary load coefficient $Q_u=0,72$ MPa



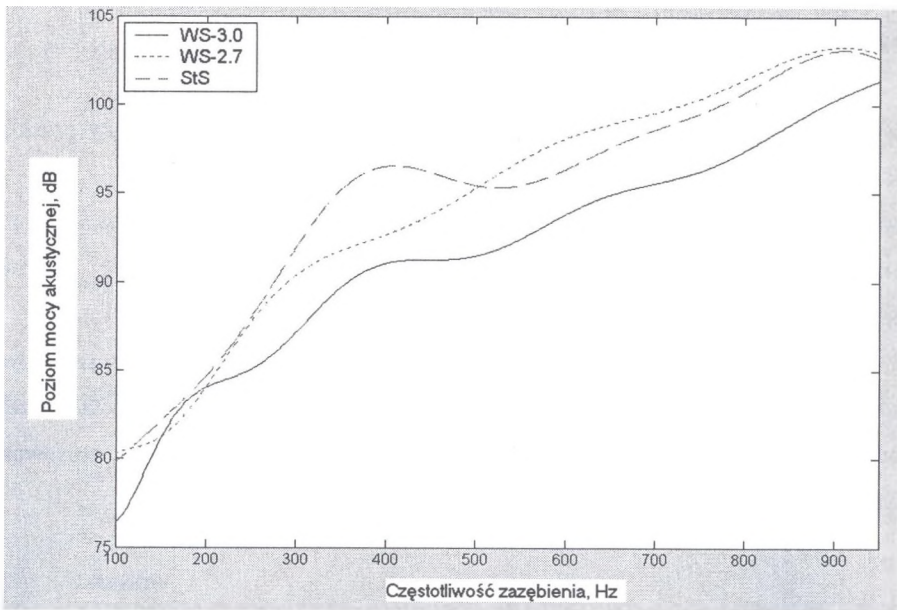
Rys. 5. Wykresy poziomu mocy akustycznej dla wariantów zębów wysokich szlifowanych: WS-3.0, WS-2.7 i zębienia standardowego StS, przy wartości wskaźnika obciążenia jednostkowego $Q_u=1,08$ MPa

Fig. 5. Diagrams of acoustic power level determined for some variants of grinded high tooth WS-3.0, WS-2.7 and StS for unitary load coefficient $Q_u=1,08$ MPa



Rys. 6. Wykresy poziomu mocy akustycznej dla wariantów zębów wysokich szlifowanych: WS-3.0, WS-2.7 i zębienia standardowego StS, przy wartości wskaźnika obciążenia jednostkowego $Q_u=1,44$ MPa

Fig. 6. Diagrams of acoustic power level determined for some variants of grinded high tooth WS-3.0, WS-2.7 and StS for unitary load coefficient $Q_u=1,44$ MPa



Rys. 7. Wykresy poziomu mocy akustycznej dla wariantów uzębienia wysokich szlifowanych: WS-3.0, WS-2.7 i uzębienia standardowego StS, przy wartości wskaźnika obciążenia jednostkowego $Q_u=1,78$ MPa

Fig. 7. Diagrams of acoustic power level determined for some variants of grinded high tooth WS-3.0, WS-2.7 and StS for unitary load coefficient $Q_u=1,78$ MPa

Tablica 2

Zestawienie wartości średniej różnicy ΔL poziomów mocy akustycznej
wyznaczonych dla badanych kół zębatach

Jednostkowy wskaźnik obciążenia Q_u	Wartość średnia różnicy ΔL poziomów mocy akustycznej wyznaczonych dla kół o uzębieniu WS-2.7 i WS-3.0	Wartość średnia różnicy ΔL poziomów mocy akustycznej wyznaczonych dla kół o uzębieniu StS i WS-3.0
0,36 MPa	5,2 dB	11,5 dB
0,72 MPa	1,4 dB	2,4 dB
1,08 MPa	3,1 dB	3,2 dB
1,44 MPa	2,3 dB	4,8 dB
1,78 MPa	3,0 dB	3,3 dB

Jak wynika z tablicy 2, zastosowanie uzębienia wysokiego o wskaźniku ząbienia bliskim 2,0 skutkuje spadkiem poziomu mocy akustycznej o około 3 dB; jedynie dla najmniejszego z zadawanych obciążeń spadek ten jest większy. Uzyskane rezultaty świadczą o istotnym wpływie wysokości uzębienia, a tym samym wskaźnika ząbienia na emisję hałasu do otoczenia spowodowaną pracą przekładni zębatej.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań emisji hałasu towarzyszącej pracy przekładni zębatych można sformułować następujący wniosek:

- poprawę właściwości akustycznych przekładni zębatych można uzyskać poprzez zastosowanie uzębienia wysokiego, charakteryzującego się wartością czołowego wskaźnika ząbienia $\varepsilon_\alpha \approx 2,0$.

Wyniki te, w związku z koniecznością zmniejszenia natężenia czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, wskazują na potrzebę wdrożenia tego typu postaci ząbieni do produkcji m.in. nowoczesnych, przemysłowych przekładni planetarnych, stosowanych zwłaszcza w napędach dużych mocy.

LITERATURA

1. Weck M.: *Moderne Leistunggetriebe*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1995.
2. Knabel W.: *Geräusche und Schwingungen an Stirnradgetrieben. Untersuchung geometrischer Einflüsse bei hohen Drehzahlen und Belastungen*. Praca doktorska. TU München, 1977.
3. Wieczorek A., Nocoń G.: *Stanowisko do badań sił dynamicznych w przekładniach zębatych*. X Konferencja Naukowo-Techniczna „Trwałość Elementów i Węzłów Konstrukcyjnych Maszyn Górniczych TEMAG '01”, Ustroń 2002.
4. Möllers W.: *Parameterregte Schwingungen in einstufigen Zylinderradgetrieben. Einfluss von Verzahnungsabweichungen und Verzahnungssteifigkeitsspektren*. Praca doktorska. RWTH Aachen, 1982.
5. Müller R.: *Schwingungs- und Geräuschanregung bei Stirnradgetrieben*. Praca doktorska TU München, 1990.
6. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 17 czerwca 1998 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dziennik Ustaw Nr 79, poz. 513.
7. Winter H.: *Geräuschuntersuchungen an gehärteten, ungeschliffenen Geradstirnrädern*. VDI-Z, 104/1962.
8. Joachim T., Lauster E.: *Geräuschreduzierung bei Kraftfahrzeuggetrieben*. Düsseldorf, VDI-Berichte Nr 997, 1992.
9. Niemann G., Unterberger M.: *Geräuschminderung bei Zahnrädern*. VDI-Z, 101/1959.
10. Hösel T.: *Geräuschuntersuchungen an schrägverzahnten Stirnrädern mit Evolventenverzahnung*. Praca doktorska, TU München, 1965
11. Müller L.: *Przekładnie zębate – Badania*. WNT, Warszawa 1984.