

WIESŁAW FIEBIG¹, PIOTR CEPENDA²

¹Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

wieslaw.fiebig@pwr.wroc.pl

²Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

piotr.cependa@pwr.wroc.pl

LOKALIZACJA ŹRÓDEŁ HAŁASU W KOPARKO-ŁADOWARCE PRZY POMOCY KAMERY AKUSTYCZNEJ

Abstract: There are many noise sources in mining machinery and construction equipment, which influence the level of acoustic power emitted to environment. The knowledge about main noise sources is essential in noise reduction. In this paper the method of identification of noise sources using acoustic camera on the example of excavator Mecalac is presented.

1. Wstęp

Maszyny budowlane cechują się wysokimi poziomami hałasu zewnętrznego. Hałas maszyn budowlanych bardzo często nie zagraża operatorom tych maszyn- ponieważ hałas w kabinach zazwyczaj jest obniżony do warunków normowych- natomiast hałas na zewnątrz tych maszyn bardzo często przekracza wartości normowe i zagraża osobom znajdującym się w bezpośrednim ich sąsiedztwie. Skuteczna redukcja hałasu maszyn możliwa jest tylko wówczas, gdy ustalone jest jakie źródła hałasu dominują w procesie jego powstawania. Stąd lokalizacja głównych źródeł hałasu jest zagadnieniem kluczowym dla ustalenia metod redukcji hałasu maszyn.

2. Źródła hałasu w koparko-ładowarce

Podstawowym źródłem powodującym hałas w maszynach jest bardzo często silnik spalinowy. Głównym źródłem hałasu w silniku spalinowym jest hałas mechaniczny. Dynamiczne obciążenia spowodowane wybuchowym spalaniem mieszanki paliwowo-powietrznej powodują powstawanie wibracji, które przenoszone są na obudowę silnika i powodują powstawanie hałasu. Dodatkowymi przyczynami są uderzeniowy charakter pracy tłoków oraz praca układu rozrządu. Elementy wyposażenia silnika takie jak turbosprężarka, również generują powstawanie hałasu. Częstotliwościami dominującymi w hałasie pochodzącym z silników spalinowych są częstotliwości pracy cylindrów związane z prędkością obrotową wału korbowego.

Również elementy hydrauliczne i układy hydrauliczne mogą być źródłem hałasu o wysokich poziomach. Głównymi elementami wytwarzającymi hałas są pompy i silniki hydrauliczne.

Głównymi przyczynami powstawania hałasu pomp i silników hydraulicznych są szybkie zmiany ciśnienia od ciśnienia ssania do ciśnienia tłoczenia występujące podczas procesów przesterowania. Czynniki wpływającymi na intensywność generowanego hałasu mają również parametry pracy układu hydraulicznego takie jak ciśnienie ssania, kawitacja oraz pulsacja ciśnienia.

Częstotliwość zmian obciążeń w pompach wporowych oraz częstotliwość pulsacji ciśnienia zależy od prędkości obrotowej i można ją określić na podstawie wzoru:

$$f_k = \frac{n \cdot z}{60} [Hz] \quad (1)$$

gdzie:

n - prędkość obrotowa,

z - liczba elementów wporowych w pompie (np.

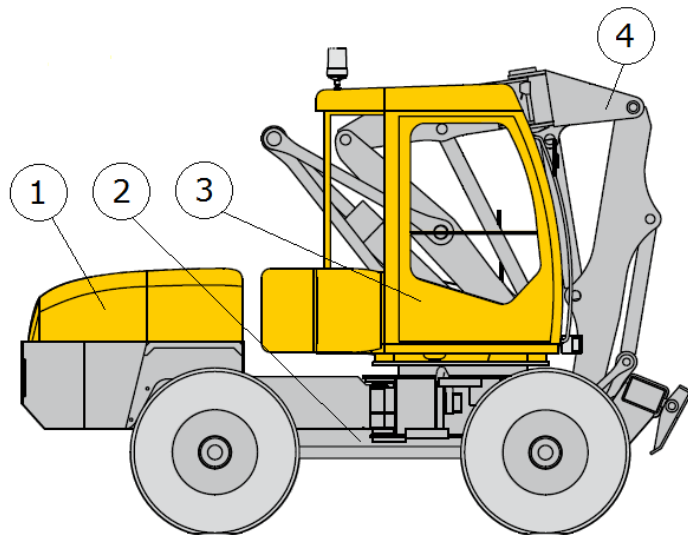
liczba zębów, tłoczków, łopatek).

Pulsacja ciśnienia jest zjawiskiem szkodliwym zarówno dla pompy jak i całego układu hydraulicznego. Jej obniżenie przyczynia się do zwiększenia trwałości jak również do obniżenia

wibracji całego układu, a co za tym idzie do redukcji poziomu hałasu przez niego generowanego. Obniżenie pulsacji ciśnienia jest szczególnie istotne w przypadku maszyn mobilnych.

3. Opis badanej maszyny.

Do badań posłużyła uniwersalna maszyna kołowa MECALAC 12 MXT. Jej schemat przedstawia rys.1.



1. Komora silnika
2. Układ napędowy z silnikiem hydraulicznym przekazującym napęd na koła.
3. Kabina operatora.
4. Układ roboczy – wysięgnik wraz z siłownikami hydraulicznymi.

Rys.1. Schemat koparko-ładowarki Mecalac z wyszczególnionymi głównymi jej elementami.

Podstawowymi podzespołami i elementami maszyny są:

- silnik spalinowy,
 - o Diesel, 4-cylindrowy, rzędowy,
 - o Moc 74kW przy 2200 obr/min,
 - o Pojemność skokowa 3900 cm³,
- układ hydrauliczny
 - o układ hydrauliczny roboczy wysięgnika
 - o układ hydrauliczny obrotu
- kabina,
- wysięgnik roboczy,
- układ przenoszenia napędu,
- układ hamulcowy,
- układ elektryczny.

W skład układu napędowego maszyny wchodzi ponadto:

- przekładnia hydrostatyczna,
- mechaniczny reduktor,
- mosty napędowe przedni i tylny,
 - o mechanizm różnicowy,
 - o półosie napędowe,
 - o piasty kół,
 - o zwolnice.

Maszyna posiada napęd na obie osie.

Układ hydrauliczny:

Koparko-ładowarka MECALAC posiada trzy niezależne układy hydrauliczne: napęd hydrostatyczny, hydrauliczny układ roboczy obsługujący siłowniki wysięgnika oraz układ obrotu i skrętu maszyny. Każdy z nich jest napędzany niezależnie działającą pompą.

W skład napędu hydrostatycznego mechanizmu jazdy wchodzi:

- Pompa: osiowa pompa tłoczkowa o zmiennej wydajności
 $q_{\max}=63\text{cm}^3/\text{obr}$,
- Silnik hydrauliczny: silnik osiowy tłoczkowy o zmiennej chłonności
 $q_{\max}=140\text{cm}^3/\text{obr}$,

max. ciśnienie robocze 430 bar, max. wydajność 156 l/min.

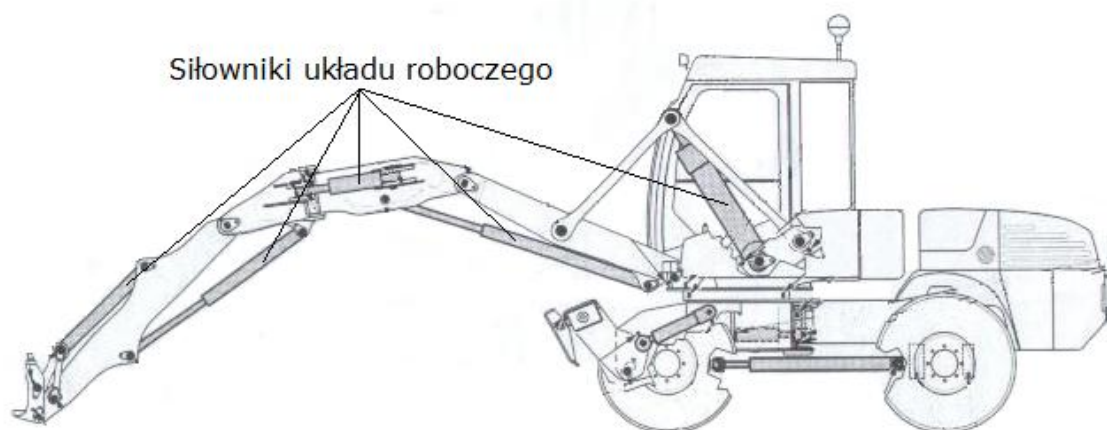
- Filtry
- Przewody i złącza.

Zmienna wydajność oraz wielotłoczkowy osiowy silnik i pompa pozwalają na bezstopniową zmianę momentu w całym zakresie prędkości maszyny.

Elementem napędowym układu roboczego wysięgnika jest:

- Pompa: pompa wielotłoczkowa osiowa o zmiennej wydajności $q_{\max} = 63 \text{ cm}^3/\text{obr}$, max. ciśnienie robocze 280 bar, max. wydajność 140 l/min

W skład układu hydraulicznego wchodzi również zawory proporcjonalne sterujące kierunkiem przepływu, zawory bezpieczeństwa, siłowniki robocze wysięgnika (rys.2).



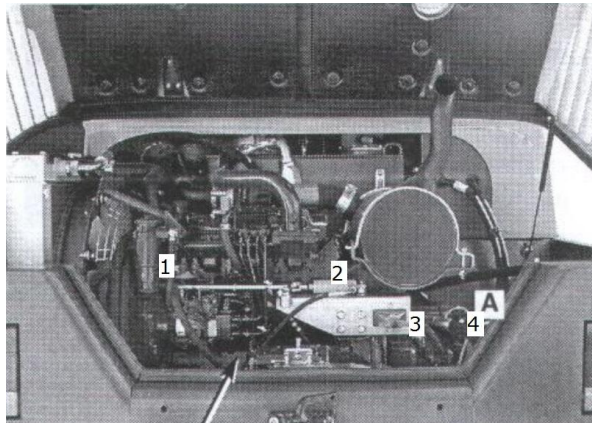
Rys. 2. Rozmieszczenie siłowników układu roboczego w maszynie

W skład układu hydraulicznego mechanizmu obrotu wchodzi:

- Pompa zębata Pompa zębata o zazębieniu zewnętrznym i stałej wydajności $q = 14 \text{ cm}^3/\text{obr}$
- Silnik hydrauliczny Max. ciśnienie robocze 230 bar, prędkość obrotowa 7 obr/min
- Orbitrol
- Siłowniki
- Przewody i złącza.

Głównymi źródłami hałasu pochodzącymi od układu hydraulicznego są pompy i silniki hydrauliczne. W omawianej maszynie występują 3 pompy oraz 2 silniki hydrauliczne i generowane przez nie wibracje i hałas będą miały wpływ na ogólny poziom hałasu maszyny.

Rys. 3 przedstawia schematyczne rozmieszczenie podzespołów, które emitują dźwięk o najwyższym poziomie: silnika spalinowego oraz pomp układu hydraulicznego. Jak wynika to z dalszych badań – w komorze silnika umieszczone są główne źródła hałasu w maszynie.



- 1 – Silnik spalinowy
- 2 – Sprzęgło
- 3 – Hydrauliczna pompa jazdy
- 4 – Hydrauliczna pompa robocza

Rys. 3. Rozkład podzespołów maszyny w komorze silnika

4. Metoda pomiaru

Do lokalizacji źródeł hałas zastosowano kamerę akustyczną Noise Inspector. Pozwala ona na konwersję emisji dźwięku do postaci obrazu. Dzięki temu umożliwia ona wizualizację dźwięku na zdjęciu lub filmie wideo oraz szybką i dokładną lokalizację źródła hałasu. Dzięki zastosowaniu kamery akustycznej można lokalizować zarówno źródło dźwięku jak i poziom hałasu przez nie generowanego.

Kamera składa się z matrycy mikrofonowej, kamery wideo wbudowanej w matrycę, oraz moduły do przetwarzania obrazu i sygnału. Całość współpracuje z urządzeniami do obróbki obrazu i dźwięku (np. komputer przenośny).



Rys. 4. Zestaw do pomiaru poziomu dźwięku z kamerą akustyczną.

Z uwagi na różne pozycje mikrofonów w matrycy względem źródła dźwięku sygnał dźwiękowy z niego pochodzący dociera do mikrofonów w różnym odstępie czasu. Podczas przetwarzania tych sygnałów przy użyciu metody kształtowania wiązki (Beamforming) określa się kierunek pochodzenia dźwięku i jego poziomy..

Matryca kamery jest jednokierunkowa tzn. wszystkie mikrofony znajdują się w tej samej płaszczyźnie i skierowane są w tą samą stronę. W takim wypadku najlepiej sprawdzają się pomiary powierzchni zbliżonych do płaskich, a pomiar odbywa się w kierunku prostopadłym.

5. Wyniki pomiarów

Pomiary wykonane były na otwartej przestrzeni dla uniknięcia zakłóceń od odbicia fal akustycznych od elementów otoczenia. Pomiar był wykonywany w odległości 5m i 10m. Maszyna była badana podczas pracy (kopanie ziemi z gruzem) przy zmiennej prędkości obrotowej silnika oraz bez obciążenia na biegu jałowym dla prędkości obrotowych 1700 obr/min i 2150 obr/min. Dodatkowo wykonano pomiary przy otwartej osłonie komory silnika.

Rysunki 5 i 6 przedstawiają zdjęcia prawej strony maszyny wykonane z odległości 5m dla dwóch prędkości obrotowych: 1700 obr/min oraz maksymalnej 2150 obr/min. Maksymalny poziom dźwięku to ok 83,5 dB dla 2150 obr/min.



Rys. 5. Maszyna podczas pracy jałowej – strona prawa
 $n = 1700$ obr/min, odległość zdjęcia 5m,
zakres częstotliwości: 2050-2200 Hz



Rys. 6. Maszyna podczas pracy jałowej – strona prawa
 $n = 2150$ obr/min, odległość zdjęcia 5m,
zakres częstotliwości: 340-2800 Hz

Na rysunkach 7 oraz 8 przedstawiono również prawą stronę maszyny. Zdjęcie zostało wykonane z odległości 10 m, dla tych samych prędkości obrotowych. Rozbieżność w najwyższych poziomach dźwięku jest znaczna i wynosi ok. 12 dB. Maksymalny poziom dźwięku wynosi 85 dB.



Rys. 7. Maszyna podczas pracy jałowej – strona prawa
 $n = 1700$ obr/min, odległość zdjęcia 10m,
zakres częstotliwości: 340-2800 Hz



Rys. 8. Maszyna podczas pracy jałowej – strona prawa
 $n = 2150$ obr/min, odległość zdjęcia 10m,
zakres częstotliwości: 340-2800 Hz

Kolejne rysunki (9 oraz 10) pokazują lewą stronę maszyny z odległości 5m dla prędkości obrotowych 1700 obr/min oraz 2150 obr/min. Maksymalny poziom dźwięku wyniósł 88 dB.



Rys. 9. Maszyna podczas pracy jałowej – strona lewa
 $n = 1700$ obr/min, odległość zdjęcia 5m,
 zakres częstotliwości: 2050-2200 Hz



Rys. 10. Maszyna podczas pracy jałowej – strona lewa
 $n = 2150$ obr/min, odległość zdjęcia 5m,
 zakres częstotliwości: 340-2800 Hz

Rysunki 11 oraz 12 to lewy bok maszyny, odległość 10m. Maksymalny poziom dźwięku to 88 dB dla 2150 obr/min, a różnica w porównaniu do niższej prędkości obrotowej to 13 dB.



Rys. 11. Maszyna podczas pracy jałowej – strona lewa
 $n = 1700$ obr/min, odległość zdjęcia 10m,
 zakres częstotliwości: 340-2800 Hz



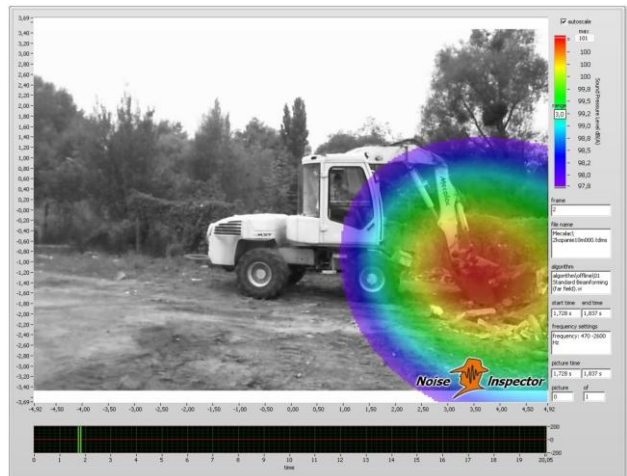
Rys. 12. Maszyna podczas pracy jałowej – strona lewa
 $n = 2150$ obr/min, odległość zdjęcia 10m,
 zakres częstotliwości: 340-2800 Hz

Rysunki 13 oraz 14 przedstawiają maszynę podczas kopania. Prędkość obrotowa silnika jest dostosowana do obciążenia i waha się w przedziale 1500-2000 obr/min. Układ hydrauliczny jest obciążony. Na rys. 13 widać, że hałas o najwyższym poziomie jest generowany z komory silnika i osiąga wartość 83,5 dB. Jest to wartość niższa od osiąganych dla prędkości obrotowych 2150 obr/min i pracy jałowej bez obciążenia układu. Prędkości obrotowe silnika są jednak niższe od maksymalnych, co pokazuje jak silnie hałas od silnika dominuje nad hałasem generowanym przez inne podzespoły maszyny. Rysunek 14 pokazuje prawą stronę maszyny podczas kopania ziemi wymieszanej z gruzem. Źródło dźwięku o najwyższym poziomie jest zlokalizowane o okolicach łyżki ładowarkowej. Spowodowane jest to uderzaniem większych elementów gruzu o stalową łyżkę i generowanie wysokiego poziomu dźwięku. Poziom dźwięku osiąga wartość 101 dB. Należy zatem zwrócić uwagę na fakt, że nie tylko podzespoły maszyny są źródłem hałasu.

Rodzaj wykonywanej pracy może mieć również wpływ na maksymalne poziomy generowanego dźwięku.



Rys. 13. Maszyna podczas kopania – strona lewa
odległość zdjęcia 10m,
zakres częstotliwości: 500-850 Hz



Rys. 14. Maszyna podczas kopania – strona prawa
odległość zdjęcia 10m,
zakres częstotliwości: 470-2600 Hz

Rysunki 15 i 16 przedstawiają tył maszyny z odległości 5m. Prędkości obrotowe silnika wynoszą odpowiednio 1700 obr/min oraz 2150 obr/min. Maksymalny poziom hałasu to ponad 83 dB dla 2150 obr/min.



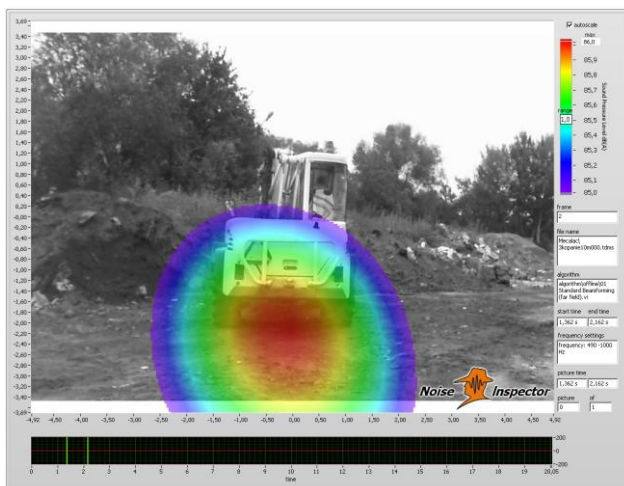
Rys. 15. Maszyna podczas pracy jałowej – tył maszyny
odległość zdjęcia 5m,
zakres częstotliwości: 2200-2400 Hz



Rys. 16. Maszyna podczas pracy jałowej – tył maszyny
odległość zdjęcia 5m,
zakres częstotliwości: 340-2600 Hz

Na rysunku 17 przedstawiono tył maszyny podczas kopania. Układ hydrauliczny jest w takim wypadku obciążony, a generowany hałas osiąga wartość 86 dB. Jest to wartość wyższa niż średni generowany hałas dla pracy jałowej przy najwyższych obrotach. Wynika to ze znacznego podwyższenia hałasu generowanego przez układ hydrauliczny podczas pracy pod wysokim ciśnieniem.

Rys. 18 przedstawia tył maszyny przy otwartej pokrywie komory silnika. Poziom dźwięku osiąga wartości bliskie 90 dB. Jest to wartość o ok. 5dB wyższa niż średnie najwyższe wartości poziomu dźwięku. Pokazuje to skuteczność osłon silnika w częściowej redukcji hałasu.



Rys. 17. Maszyna podczas kopania – tył maszyny
odległość zdjęcia 10m,
zakres częstotliwości: 490-1000 Hz



Rys. 18. Maszyna podczas pracy jałowej – tył maszyny
odległość zdjęcia 5m,
zakres częstotliwości: 340-2800 Hz

6. Podsumowanie

Wszystkie wyniki wyraźnie pokazują, że głównymi źródłami hałasu są silnik spalinowy, oraz napędzane przez niego pompy hydrauliczne. Dodatkowo na zdjęciach przedstawiających tylną część maszyny wyraźnie widać, że główne źródło znajduje się w lewej części komory. Potwierdza to również zdjęcie z otwartą pokrywą komory silnika. Widać na nim wyraźnie, że dominującym źródłem hałasu jest silnik spalinowy, a nie układ hydrauliczny.

Dodatkowo stwierdzono, że dla biegu jałowego i prędkości obrotowej 1700 obr/min, poziom dźwięku wynosił ok. 65 dB. W miarę wzrostu prędkości obrotowej poziom dźwięku znacznie wzrastał i dla 2150 obr/min wynosił ok. 85 dB. Wyniki pomiarów były zbliżone bez względu na ustawienie maszyny (prawy i lewy bok oraz tył) oraz bez względu na odległość pomiarową (5m lub 10m).

Pomiary przy otwartej obudowie komory silnika wykazały, że poziom hałasu jest średnio o 5 dB wyższy w porównaniu do pomiaru z obudową zamkniętą. Można jednak stwierdzić, że obudowa silnika nie zapewnia wystarczającej izolacyjności akustycznej i hałas zewnętrzny stwarza zagrożenie dla osób przebywających w otoczeniu maszyny.

Jeden z pomiarów podczas pracy maszyny (nabieranie urobku) wykazał, że hałas o najwyższych poziomach do 100 dB pochodził z okolic łyżki ładowarkowej maszyny. Hałas ten występował podczas załadunku ziemi z gruzem i był efektem uderzania dużych kamieni o metalową łyżkę. Wynik ten jasno wskazuje, że przy niektórych funkcjach jak np. załadunek twardego kruszywa lub kucie betonu, hałas generowany przez maszynę może znacznie przekraczać wartości maksymalne emitowane przez pracujący silnik.

Badania wyraźnie wskazują, że maszyny budowlane mogą generować stosunkowo wysokie poziomy hałasu w otoczeniu. Niejednokrotnie pracownicy, wykonujący inne prace na budowach, znajdują się w bezpośrednim ich sąsiedztwie, co stwarza dla nich zagrożenie. Maszyny te pracują często wewnątrz osiedli mieszkaniowych lub w miejscach o dużym natężeniu ruchu pieszych. Poziomy hałas generowane podczas pracy są na tyle wysokie, że mogą powodować znaczny dyskomfort bądź być szkodliwe dla zdrowia. Istnieje potrzeba opracowania metod redukcji hałasu zewnętrznego emitowanego przez maszyny budowlane oraz pracujące w przemyśle wydobywczym. Dalsze badania będą prowadzone dla szerszego zakresu maszyn roboczych, w tym maszyn kopalnianych, w celu wyznaczenia głównych źródeł hałasu dla oraz opracowaniu metod obniżenia hałasu np. poprzez zaprojektowanie obudów o lepszej izolacyjności akustycznej i innych metod redukcji hałasu.

7. Literatura

- [1] Engel Z., Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [2] Fiebig, W.; Górny, M.: Noise sources localization in loading machine with sound intensity method, Konferencja SIMP "Maszyny i pojazdy dla bódownictwa I górnictwa skalnego", Wrocław 20-21.09.2012r.
- [3] Chwastek S., Michałowski S.: "Redukcja obciążeń dynamicznych nieresorowanych maszyn na podwoziach kołowych", Czasopismo Techniczne, Zeszyt Mechanika 1-M/2006, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, ISSN 0011-4561, Kraków 2006, ss. 71-80.
- [4] Borkowski W., Konopka S., Prochowski L., *Dynamika maszyn roboczych*, WNT, Warszawa 2005.
- [5] Broszury informacyjne firmy Mecalac Polska Sp. z o.o.