

ZYGMUNT BASISTA, MAREK A. KSIĄŻEK, JANUSZ TARNOWSKI*

**TESTOWE BADANIA DOŚWIADCZALNE REAKCJI
CZŁOWIEKA-OPERATORA NARZĘDZIA RĘCZNEGO
PRZY SINUSOIDALNYM SYGNALE WEJŚCIOWYM**

**TESTING OF REACTIONS
OF HAND-HELD TOOL HUMAN OPERATOR
TO INPUT SINUSOIDAL SIGNAL**

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono opis i wyniki wstępnych badań doświadczalnych, których celem jest zbudowanie modelu człowieka-operatora opisującego proces sterowania, realizowany podczas pracy ręcznym narzędziem udarowym. Przyjęto, że funkcją sterującą jest zmienna siła nacisku wywierana przez operatora na rękojeść. Badany człowiek-operator działa w układzie kompensacyjnym, minimalizując różnicę pomiędzy siłą zadaną a siłą realizowaną. Układ ten modeluje proces sterowania ręcznym narzędziem. Siła zadana zmieniała się sinusoidalnie, z ustalonymi amplitudą i częstotliwością. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów odpowiedzi na sygnał sinusoidalny, następnie dokonano analizy zmian odpowiedzi w funkcji częstotliwości siły zadanej.

Słowa kluczowe: model człowieka-operatora, narzędzia ręczne

Abstract

In the paper the description and results of the preliminary, test experimental investigations concerning the reactions of human-operator control system on visual signal of reference test force were done. Pressure force exerted by operator on handle was considered as control parameter. The task of the operator, during the experiment, was to realize pressure force and to keep it in the vicinity of the reference given force. The reference force had the sinusoidal character with known amplitude and frequency. The obtained results were analysed and graphically presented.

Keywords: model of human-operator, hand tools

*Dr inż. Zygmunt Basista, prof. dr hab. inż. Marek A. Książek, dr inż. Janusz Tarnowski, Instytut Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Celem przedstawionych w artykule badań doświadczalnych jest uzyskanie danych do budowy modelu człowieka-operatora pracującego ręcznym narzędziem udarowym. Chodzi tu o zbudowanie takiego modelu, który w kategoriach układu człowiek–maszyna [1, 2] będzie opisywał świadome i aktywne działanie człowieka, z jakim mamy do czynienia podczas operowania ręcznym narzędziem udarowym. Aktywne działanie człowieka, czyli sterowanie pracą narzędzia udarowego polega głównie na wywieraniu odpowiedniej siły nacisku na rękojeść. Dysponowanie tego rodzaju modelem jest niezbędne dla właściwego sformułowania i rozwiązania problemu wibroizolacji rękojeści narzędzi udarowych, zwłaszcza na etapie projektowania i badań symulacyjnych aktywnych układów wibroizolacji [3–6, 8]. Problem polega bowiem na tym, że układ wibroizolacji, redukując poziom drgań rękojeści, może równocześnie na tyle utrudnić operowanie i sterowanie narzędziem, że nie uzyska akceptacji operatora. Model matematyczny człowieka-operatora można zidentyfikować na podstawie zarejestrowanych odpowiedzi człowieka na skokowy sygnał zadany. Wyniki takich badań przedstawiono w [7]. Tego rodzaju testy nie ujmują jednak wszystkich aspektów zachowania się człowieka w procesie ręcznego sterowania, takich jak np. adaptacja do sygnału wejściowego czy antycypacja jego zmian. Jednym ze sposobów ujęcia tych aspektów jest badanie zachowania się człowieka w reakcji na sygnał sinusoidalnie zmienny. Opisane w artykule badania doświadczalne przeprowadzono w celu przetestowania takiej właśnie metodyki wypracowania metod analizy otrzymanych wyników, prowadzącej w konsekwencji do zbudowania odpowiedniego modelu matematycznego ujmującego wspomniane wyżej właściwości charakterystyki człowieka-operatora.

2. Uwagi ogólne

Zachowanie się człowieka-operatora w procesie ręcznego sterowania maszyną [1, 2] wyróżniają następujące cechy charakterystyczne:

- Czas reakcji – istnienie opóźnienia reakcji lub opóźnienia fazowego, co najlepiej można zaobserwować w odpowiedzi operatora na skokowo zadany sygnał wejściowy.
- Filtrowanie wysokich częstotliwości – człowiek wykazuje tendencję do coraz słabszej reakcji na składowe o coraz wyższej częstotliwości zawarte w sygnale wejściowym.
- Adaptacja do celu sterowania – zdolność człowieka do zmiany w szerokim zakresie swojej charakterystyki, w zależności od danego celu (zadania) sterowania.
- Zależność od czasu – charakterystyka człowieka-operatora zmienia się w czasie na skutek:
 - uczenia się,
 - wyczuwania zmian zachodzących w otoczeniu (obiekcie sterowania).
- Przewidywanie – zdolność człowieka do przewidywania zmian wielkości wejściowej na podstawie przeszłych przebiegów.
- Nieliniowość – w pewnych zadaniach sterowania zachowanie człowieka jest liniowe, podczas gdy dla innych zadań jego zachowanie może być nieliniowe.
- Przypadkowość – człowiek jest układem niedeterministycznym, ponieważ jego charakterystyka zmienia się w czasie jednego eksperymentu, z badania na badanie. Jednak ta zmienność staje się niewielka, jeżeli czas uczenia się danego zadania jest dostatecznie

długi i jeżeli zadanie do wykonania nie jest zbyt trudne. Dlatego model deterministyczny wykorzystywany do opisu charakterystyki człowieka-operatora ma sens statystyczny.

W świetle powyższych uwag można zauważyć, że badania doświadczalne prowadzone w celu wyznaczenia modelu człowieka-operatora wymagają dużej staranności. Przede wszystkim, w zależności od tego, na jaki aspekt działania operatora i na jakie jego cechy chcemy zwrócić uwagę, powinniśmy opracować odpowiedni rodzaj testu, który w możliwie najwyższym stopniu eliminowałby czynniki niepożądane dla danego badania (zakłócenia), a równocześnie wpływające na wynik pomiaru. Z tych powodów, jak również ze względu na to, że przebadano tylko trzy osoby, przedstawione tutaj wyniki badań można potraktować jako swego rodzaju rozpoznanie, służące do oceny zastosowanej metody pomiarów. Przeprowadzona analiza wyników jest ograniczona do zbadania głównych wskaźników, takich jak przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem zadaniem a realizowanym, zmiana tego przesunięcia w czasie jednej próby, a także jego zależność od częstotliwości sygnału zadanego. Ponadto analizowano wpływ częstotliwości sygnału zadanego na wariancję odpowiedzi oraz jej wartość średnią.

3. Opis stanowiska badawczego i metody badań

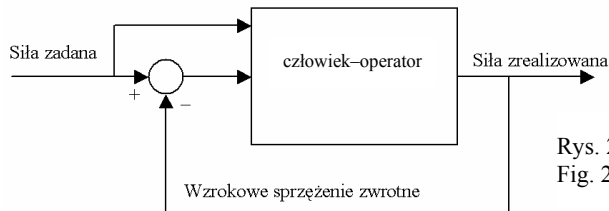
Badany człowiek znajdował się w pozycji stojącej i wywierał mierzony i rejestrowany nacisk na nieruchomą rękojeść w kierunku poziomym (rys. 1). Realizowana przez niego siła nacisku była wynikiem obserwacji monitora, na którym wartości obydwu sił, zadanej i realizowanej, były przedstawione w postaci przylegających do siebie „słupków”, zmieniających swoją wysokość proporcjonalnie do wartości tych sił. Zanim na ekranie pojawiła się zmienna siła zadana badany operator wywierał stały nacisk (przyjęto wartość 50 N).



Rys. 1. Widok stanowiska podczas pomiarów
Fig. 1. View of stand during measurements

W pewnej, nieprzewidywanej przez badanego chwili siła zadana zaczynała się zmieniać sinusoidalnie wokół ustalonej wartości, równej naciskowi operatora przed tą chwilą, z amplitudą 30 N. Zadaniem badanego operatora było nadążanie możliwie najdokładniej za zadaniem sygnałem. Badany człowiek-operator działał więc w układzie kompensacyjnym pokazanym schematycznie na rys. 2.

Badania testowe wykonano na trzech wolontariuszach dla częstotliwości siły zadanej: 0,1, 0,35, 0,5, 0,65, 0,8 i 1 Hz. Z każdą osobą przeprowadzono kilka prób, dla różnych częstotliwości sygnału zadanego. Czas trwania takiej próby wynosił ok. 30 s. Przed



Rys. 2. Schemat blokowy badanego układu
Fig. 2. Block diagram of the investigated system

wykonaniem badań każdy badany wykonał krótkie próbne ćwiczenie. Zarówno generacja siły zadanej, jak i wizualizacja obu sił (zadanej i zrealizowanej), a także rejestracja sygnałów były wykonywane w środowisku LabView 7.1 z wykorzystaniem karty pomiarowej DAQ – Card 6024E firmy National Instruments (USA) i komputera typu notebook, który pełnił jednocześnie rolę monitora. W torze pomiarowym zastosowano tensometryczny czujnik siły CL14s (produkcji ZEPWN Marki – Polska). Przyjęto częstotliwość próbkowania 5 kHz dla każdego kanału pomiarowego.

4. Wyniki badań

Analiza zarejestrowanych sygnałów była wykonana z zastosowaniem pakietu programowego D-Plot firmy HydeSoft (USA). Przykładowe przebiegi czasowe siły zadanej (sinusoidea) oraz siły realizowanej przez kolejne badane osoby, dla różnych częstotliwości siły zadanej (sygnału wejściowego), przedstawiono na rys. 3 i 4. Analizując otrzymane przebiegi, dokonano uśrednienia zarejestrowanych sygnałów, biorąc wszystkie zarejestrowane próbki w czasie każdego z eksperymentów (dla wszystkich operatorów i wszystkich zadawanych częstotliwości zmiany siły). Obliczono wartości średnie sygnału realizowanego, średnią wartość kąta przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem zadany a sygnałem realizowanym oraz odchylenie standardowe obu sygnałów

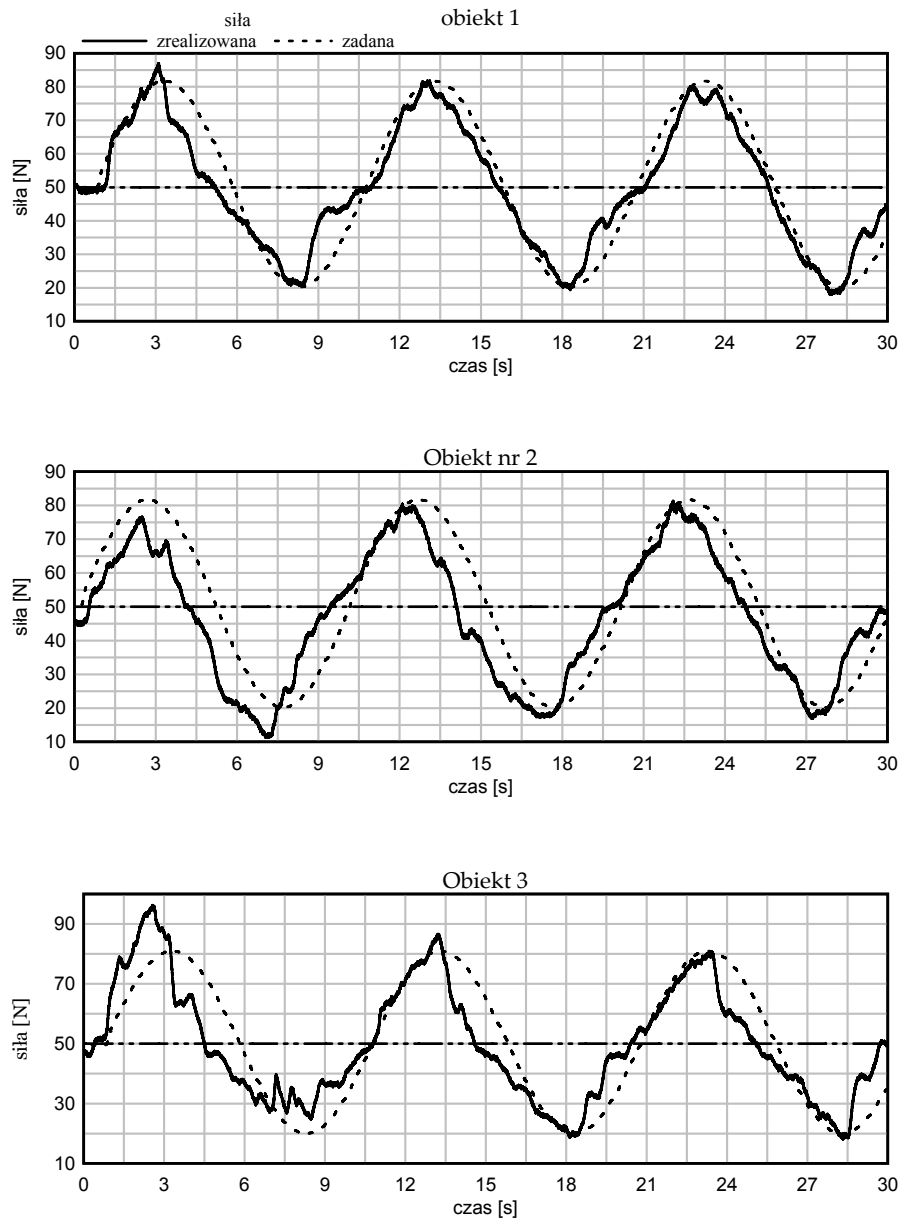
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \mu)^2}$$

gdzie:

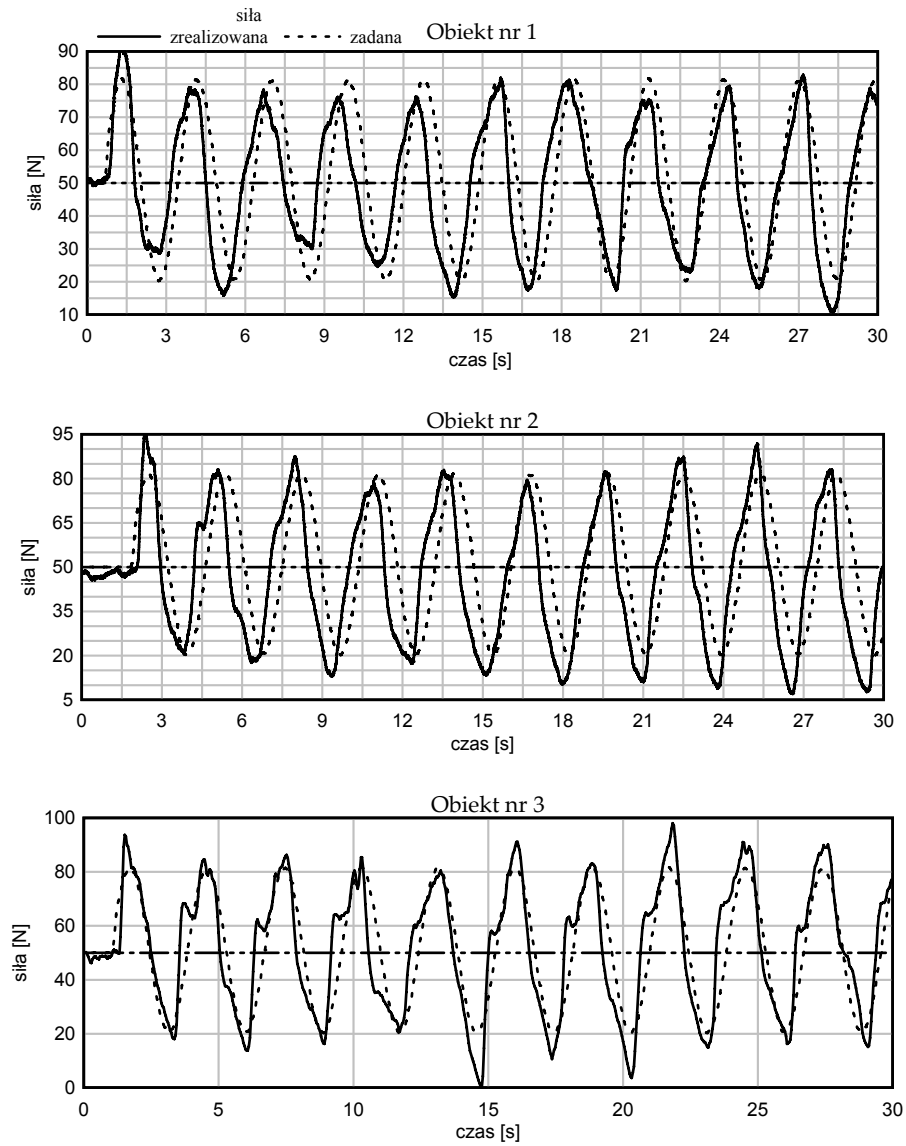
μ – wartość średnia,

N – ilość próbek.

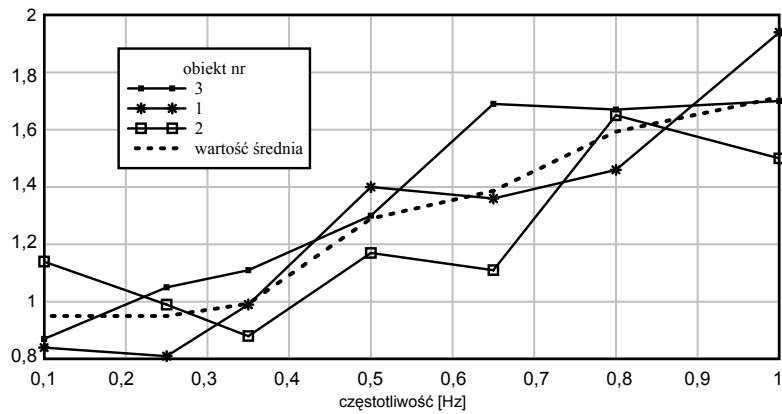
Jako miarę fluktuacji sygnału wokół wartości średniej przyjęto wariancję σ^2 , następnie obliczono stosunki wariancji siły zrealizowanej do wariancji siły zadanej. Stosunki te pozwalają porównać ilościowo obie zmienne siły podczas każdego z wykonanych eksperymentów, co zostało przedstawione na rys. 5. Z kolei na rysunku 6 pokazano obliczone zmiany wartości kąta przesunięcia fazowego pomiędzy siłą zadaną i zrealizowaną. Wykonana analiza wyników ujawniła również zmieniające się wraz z częstotliwością siły zadanej przesunięcie wartości średnich siły wykonanej. Przesunięcie to wyrażone w % wartości średniej siły zadanej zostało zaprezentowane na rys. 7.



Rys. 3. Przebiegi czasowe sił zadanej i realizowanej z częstotliwością 0,1 Hz
Fig. 3. Time histories of forces given and realized with frequency 0,1 Hz

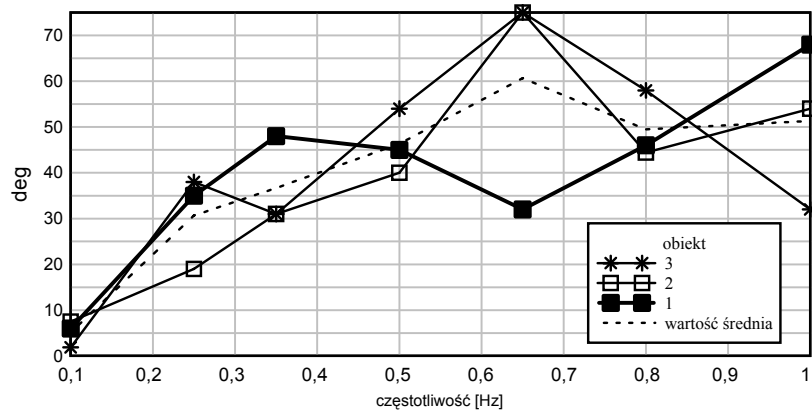


Rys. 4. Przebiegi czasowe sił zadanej i realizowanej z częstotliwością 0,35 Hz
Fig. 4. Time histories of forces given and realized with frequency 0,35 Hz



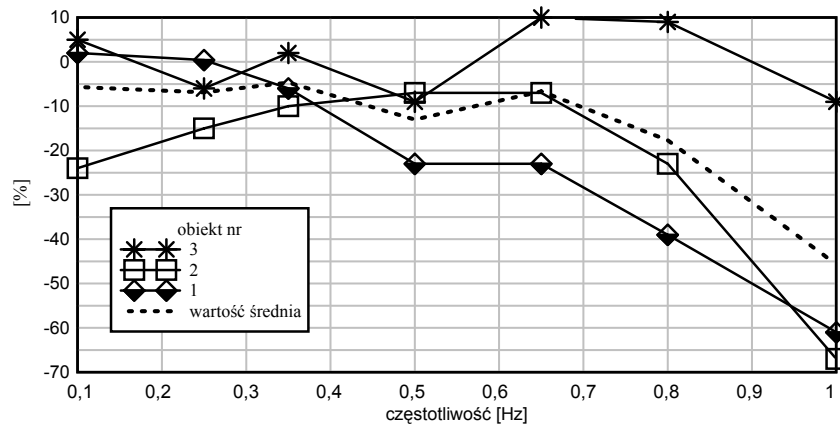
Rys. 5. Stosunek wariancji siły zrealizowanej do wariancji referencyjnej siły zadanej w funkcji częstotliwości siły zadanej

Fig. 5. Ratio of variance of realized force to variance of reference given force in function of frequency of given force



Rys. 6. Średni kąt przesunięcia fazowego pomiędzy referencyjną siłą zadaną i zrealizowaną w funkcji częstotliwości siły zadanej

Fig. 6. Average phase shift between realized and reference given force in function of frequency of given force



Rys. 7. Przesunięcie wartości średniej siły zrealizowanej w stosunku do zadanej w funkcji częstotliwości siły zadanej wyrażone w procentach

Fig. 7. Displacement of average value of realized force to reference given force in function of frequency of reference force expressed in percentage

5. Wnioski i kierunki dalszych badań

Jak już wspomniano, przede wszystkim ze względu na zbyt małą liczbę przebadanych osób otrzymane wyniki traktujemy jako swego rodzaju rozpoznanie, które pomoże nam w wyborze najlepszych wskaźników, za pomocą których będzie można analizować otrzymane wyniki i w przyszłości zbudować odpowiedni model matematyczny człowieka-operatora. Na tym etapie ograniczono się do spostrzeżeń, których można dokonać, biorąc pod uwagę zarejestrowane przebiegi oraz wskaźniki i zależności uwidocznione na rys. 5–7. Z analizy tych rysunków wynikają następujące wnioski:

- W badanym zakresie wraz ze wzrostem częstotliwości siły zadanej następuje wzrost amplitudy, jak i przesunięcie wartości średniej siły realizowanej. Przesunięcie wartości średniej może świadczyć o nieliniowości, której uwzględnienie może okazać się konieczne przy formułowaniu modelu człowieka-operatora.
- Przesunięcie fazowe siły realizowanej w stosunku do sygnału zadanego, jak widać z przedstawionych przebiegów, jest przez krótki czas początkowy nieznacznie ujemne (opóźnienie), by jednak po kilku wahaniciach stać się przesunięciem dodatnim, czyli wyprzedzeniem. Jest to efekt adaptacji człowieka do sygnału zadanego i antycypacji (przewidywania przyszłych zmian) tego sygnału. Jeśli brać pod uwagę kąt fazowy wyprzedzenia, to widoczne jest, że wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału zadanego kąt ten ma tendencję wzrostową.
- Odchylenie standardowe siły realizowanej przez operatora rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości siły zadanej, co wiąże się ze wspomnianym już wzrostem amplitudy sygnału realizowanego.
- Widoczne są różnice w zachowaniu pomiędzy osobami badanymi – aby uchwycić prawidłowości statystyczne, wymagane są dalsze badania na większej liczbie obiektów (osób badanych).

- W celu lepszego uchwycenia zjawiska adaptacji człowieka do zadanego sygnału należy w trakcie dalszych badań analizować zmienność różnych wskaźników zachodzącą w czasie podczas jednego badania.

This paper was supported by Polish Scientific Committee: PB 1255/T02/2007/32.

Literatura

- [1] Sheridan T.B., Ferrell W., *Man-Machine Systems*, The MIT Press, Cambridge 1974.
- [2] De Vlugt E., Schouten A., Van der Helm F., *Adaptation of reflexive feedback during arm posture to different environments*, Biol. Cybern. 87, 2002, 10-26.
- [3] Basista Z., *Modelowanie i symulacja układu człowiek-narzędzie-podłoże*, Zeszyty Naukowe, seria Mechanika 83, Politechnika Krakowska, Kraków 2001, 21-30.
- [4] Basista Z., Książek M., *Estimation of comfort parameters of an active vibration isolation system of handle of percussive power tool*, Proceedings „INTER-NOISE ’2004”, Prague, Czech Republic, 22-25.
- [5] Basista Z., *Symulacja eksperymentu dla zbadania wpływu układu wibroizolacji na jakość operowania ręcznym narzędziem udarowym*, Folia Scientiarum Universitatis Technicae Resoviensis, 222, Rzeszów 2005, 11-18.
- [6] Basista Z., *Simulation investigation of an active vibration protection system of an operator of a hand-held percussive tool*, Engng. Trans. 54, 3, 2006, 173-187.
- [7] Basista Z., Książek M., Tarnowski J., *Determination of human-operator characteristics as a pressure force regulator in man – hand tool system*, Proceedings, 8th Conference on „Active Noise and Vibration Control Methods”, Kraków–Krasieczyn, Poland, June 2007, 11-14.
- [8] Basista Z., Książek M., *Modelling of human-operator and criteria of estimation of active vibration isolation system in hand-held percussive tools*, Proceedings, 8th Conference on „Active Noise and Vibration Control Methods”, Kraków–Krasieczyn, Poland, June 2007, 11-14.