

OPTYMALIZACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ NARZĘDZIA PODCZAS FREZOWANIA - PROCEDURA EKSPLOATACYJNA

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI¹, MAREK A. GALEWSKI²,
MICHAŁ R. MAZUR³, NATALIA MORAWSKA⁴

Politechnika Gdańska

Wydział Mechaniczny,

Katedra Mechaniki i Mechatroniki,

Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

¹ *kkalinsk@o2.pl*, ² *marek.galewski@pg.edu.pl*,

³ *mazur.m.r@gmail.com*, ⁴ *natmoraw@gmail.com*

SŁOWA KLUCZOWE: redukcja drgań, modelowanie procesu obróbki, optymalizacja obróbki

STRESZCZENIE

W pracy zaproponowano metodę wyznaczenia optymalnej prędkości obrotowej narzędzia podczas frezowania na podstawie symulacji procesu obróbki przeprowadzonej dla uproszczonego modelu przedmiotu wraz z modelem procesu skrawania. Parametry modelu określone są bezpośrednio na podstawie wyników identyfikacji (eksperymentalna analiza modalna) co znacznie skraca czas doboru prędkości względem pełnej procedury modalnej. Tworzony jest model hybrydowy procesu obróbki. Następnie dopasowywane są parametry symulacji i dla wybranych prędkości obrotowych narzędzia realizowane są symulacje procesu skrawania. Jako optymalna wybierana jest prędkość, dla której uzyskano najniższą wartość RMS drgań. W pracy zawarto wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

1. Wstęp

Optymalizacja prędkości obrotowej narzędzia podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych z wykorzystaniem procedury modalnej [1] jest czasochłonna, a ponadto wymaga dostępu do rozbudowanej infrastruktury sprzętowej oraz specjalistycznego oprogramowania. Stąd jej skuteczne zastosowanie jest możliwe jedynie w instytucjach posiadających odpowiednie

zaplecze naukowo-badawcze. Inną alternatywą, rysującą obiecujące perspektywy zastosowań zwłaszcza w praktyce gospodarczej przedsiębiorstw, jest opisana w niniejszym rozdziale procedura eksploatacyjna.

2. Procedura eksploatacyjna optymalizacji prędkości

Proponowana metoda doboru optymalnej prędkości obrotowej zapewniającej minimalizację drgań podczas frezowania polega na wyznaczeniu optymalnej prędkości obrotowej narzędzia na podstawie symulacji procesu obróbki przeprowadzonej dla uproszczonego modelu przedmiotu obrabianego wraz z modelem procesu skrawania. Wywodzi się ona z modalnej procedury optymalizacji prędkości obrotowej narzędzia przedstawionej w [1]. Modyfikacja polega na znacznym uproszczeniu, a co za tym idzie przyspieszeniu realizacji całej procedury, na etapie przygotowania i tworzenia hybrydowego modelu procesu obróbki. Pierwszym krokiem procedury jest identyfikacja parametrów modelu dyskretnego MES przedmiotu obrabianego obiektu. Jednakże, w porównaniu z procedurą modalną [1], w miejsce przygotowania i walidacji modelu MES proponowana jest interpolacja liniowa postaci drgań własnych przedmiotu, zidentyfikowanych dzięki eksperymentalnej analizie modalnej [2]. W celu interpolacji modelu obliczeniowego procesu obróbkowego niezbędne są także dane dotyczące geometrii przedmiotu obrabianego.

Podczas identyfikacji przyjmuje się założenie, że tylko kilka pierwszych postaci drgań własnych obrabianego przedmiotu ma istotny wpływ na dynamikę procesu skrawania. Dla pierwszych postaci drgań, których kształt nie jest złożony, można użyć stosunkowo małej liczby punktów pomiarowych do odwzorowania ich kształtu. Dla poszczególnych punktów pomiarowych wyznaczone są za pomocą eksperymentu modalnego widmowe funkcje przejścia (FRF), w wyniku czego otrzymuje się tzw. pełne modele modalne, tj. zbiory częstotliwości dominujących postaci drgań własnych f , bezwymiarowych współczynników tłumienia ζ , znormalizowanych oraz skalowanych (masa modalna równa jedności) wektorów postaci Ψ_x . Podczas analizy danej powierzchni brane są pod uwagę dane wejściowe (pobudzenie) i odpowiedzi (przyspieszenia) tylko dla zbioru punktów leżących na wybranej powierzchni. Ma to na celu uzyskanie jak najlepszego stosunku sygnału pomiarowego do szumu (czyli koherencji) dla estymowanych widmowych funkcji przejścia, a przez to ograniczenie wpływu słabo pobudzonych punktów pomiarowych na kształt postaci. W ogólnym przypadku uzyskanie



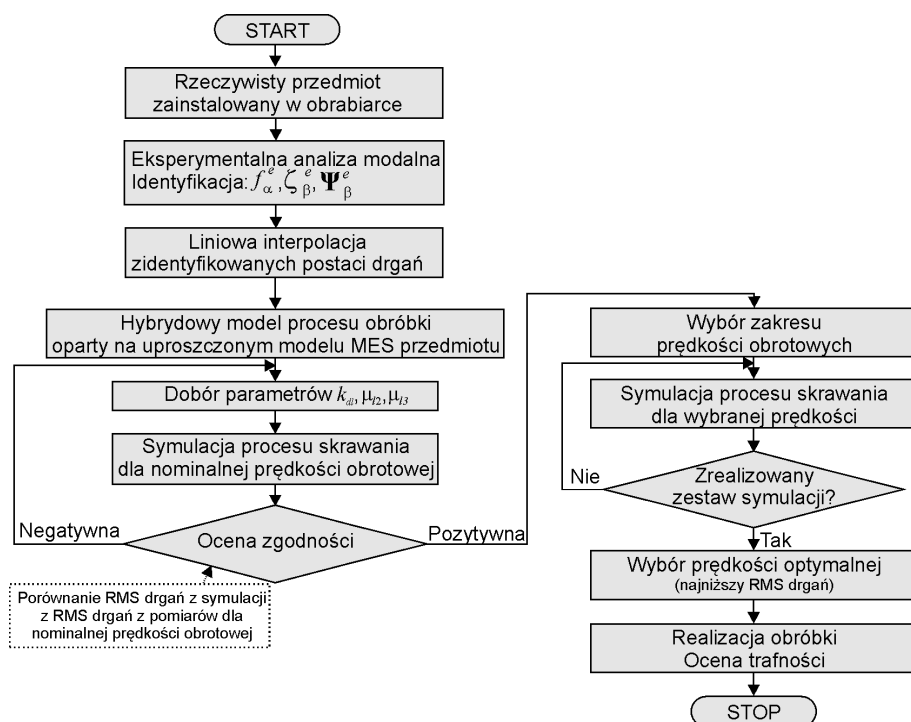
zadawalających wartości funkcji koherencji dla masywnych przedmiotów montowanych za pomocą licznych podpór i docisków może być trudne. Następnie, dla wymaganego przez program symulacyjny obróbki frezowaniem zbioru punktów leżących na powierzchni obrabianej wyznaczone są wektory postaci drgań Ψ przy wykorzystaniu interpolacji i ekstrapolacji liniowej z pochodzących z identyfikacji wektorów postaci Ψ_x . Przemieszczenia pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi są interpolowane liniowo w celu uzyskania odpowiedniej rozdzielczości opisu geometrii przedmiotu koniecznej dla dalszych symulacji (rozwiązanie takie jest m.in. powszechnie stosowane w programach do wizualizacji wyników pomiarowych z użyciem modeli siatkowych (ang. *wireframe*). W przypadku obróbki powierzchni o prostych kształtach zwykle łatwo jest wyróżnić dominujący kierunek interpolacji kształtu postaci wzdłuż punktów pomiarowych. Wyznaczone przy pomocy interpolacji wartości Ψ , f i ζ tworzą model modalny przedmiotu który wraz z modelem MES narzędzia oraz zależnościami opisującymi siły skrawania stanowi istotne elementy składowe modelu hybrydowego procesu obróbki [3].

Kolejnym etapem procedury jest dopasowanie parametrów procesu skrawania tj. dynamicznego oporu skrawania powierzchniowego właściwego k_{dl} oraz współczynników siły skrawania μ_2 i μ_3 . Dobór ich wartości odbywa się iteracyjnie, poprzez realizację symulacji procesu skrawania dla nominalnej prędkości obrotowej i porównanie wyników tej symulacji (w szczególności, porównanie wartości RMS drgań) z wynikiem pomiaru drgań podczas testowej realizacji rzeczywistej obróbki przeprowadzonej dla prędkości nominalnej. Po dopasowaniu parametrów obróbki wybierany jest dopuszczalny zakres badanych prędkości obrotowych i dla wybranych prędkości z tego zakresu realizowane są symulacje procesu skrawania. Po ich zakończeniu, jako optymalna wybierana jest ta prędkość, dla której uzyskano najniższą wartość RMS drgań.

Przedstawione kroki procedury (poza początkowym krokiem identyfikacji modelu i interpolacji postaci), tj. symulacyjne dopasowanie parametrów obróbki do wyników skrawania dla prędkości nominalnej a następnie symulacje dla wybranych prędkości skrawania w celu wyboru z nich prędkości optymalnej, są takie same jak w procedurze modalnej.

Schemat eksploatacyjnej procedury optymalizacji prędkości obrotowej narzędzia w procesie frezowania przedmiotów wielkogabarytowych z wykorzystaniem wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem (WPWE), przedstawiono na rys. 1. Tworząc niestacjonarny

model obliczeniowy procesu frezowania powierzchni, w celu spełnienia warunku zgodności RMS symulowanych przemieszczeń drgań z pomierzonymi podczas obróbki, przy nominalnych parametrach technologicznych stosowanych dla rozpatrywanego przedmiotu, dopasowano wartości parametrów modelu hybrydowego [4] i proporcjonalnego modelu procesu skrawania [3].

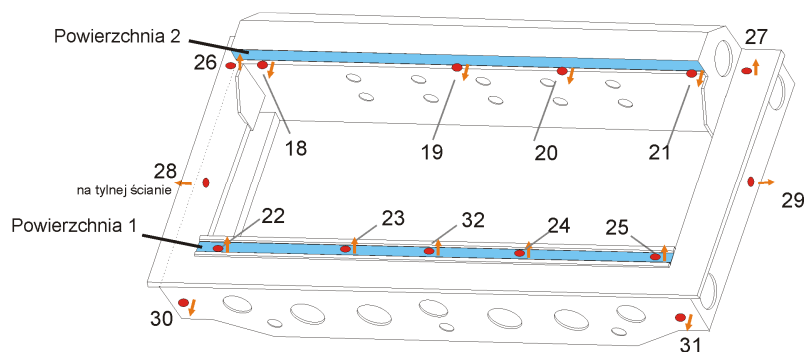


Rys. 1. Schemat optymalizacji prędkości obrotowej narzędzia w procesie frezowania przedmiotów wielkogabarytowych z wykorzystaniem wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem – procedura eksploacyjna

3. Przykładowe rezultaty zastosowania metody nadzorowania

Badania eksperymentalne prowadzone były na obiekcie przedstawionym na rys 2.

Zgodnie z proponowaną procedurą przeprowadzono eksperymentalną analizę modalną i na podstawie jej wyników wykonano interpolację liniową postaci drgań własnych. Badania symulacyjne MES rozważanego przedmiotu i powierzchni obrabianych wykazały, że dla pierwszych 10 postaci drgań



Rys. 2. Schemat przedmiotu obrabianego z zaznaczonymi miejscami mocowania czujników i powierzchniami obrabianymi

własnych dla wszystkich punktów leżących na obrabianej powierzchni, których przemieszczenia zostały interpolowane lub ekstrapolowane liniowo względem przemieszczeń w wybranych punktach pomiarowych, wskaźnik MAC osiąga wartości co najmniej 99% przy porównaniu z przemieszczeniami postaci drgań własnych wyliczonych bezpośrednio. Ponadto zauważono, że stosowanie innych metod interpolacji (np. wielomianami wyższych rzędów) nie tylko nie powoduje poprawy wyników zgodności, ale również może prowadzić do błędnego odwzorowania kształtu postaci wyznaczonych eksperymentalnie, ale z małą dokładnością.

Interpolacja kształtu postaci umożliwiła uzyskanie odpowiedniej rozdzielczości, która wymagana jest przez autorski program symulacji obróbki *Amikro4*. Za pomocą eksperymentu modalnego wyznaczono FRF w punktach pomiarowych zaznaczonych na powierzchniach obrabianych (rys. 2). Identyfikację przeprowadzono z wykorzystaniem programu FEGraph metodą p-LSCFD [5] dla dwóch zbiorów danych (FRF) osobno dla pierwszej i drugiej powierzchni, w wyniku czego otrzymano tzw. pełne modele modalne.

W kolejnym kroku procedury doboru prędkości wykonano obróbkę obu powierzchni dla parametrów nominalnych standardowo stosowanych przy obróbce badanego przedmiotu w normalnym cyklu produkcyjnym. Dla powierzchni 1 wykonywane były dwa przejścia: najpierw frezowanie pełne 4-ostrzową głowicą frezową $\phi 44$ mm, przemieszczającą się względem przedmiotu od lewej strony (począwszy od okolic czujnika 22) do prawej, a następnie frezowanie współbieżne, w stronę przeciwną. Długość powierzchni 1778 mm, szerokość 57,5 mm, nominalna prędkość obrotowa freza $n = 1300$ obr/min, prędkość posuwu $v_f = 600$ mm/min, głębokość skrawania $a_p = 1$ mm. Obróbkę powierzchni 2 realizowano w jednym przejściu, czyli frezowaniu współbieżnym 11-ostrzową głowicą frezową $\phi 125$ mm, przemieszczającą się

względem przedmiotu od lewej strony (począwszy od okolic czujnika 18) do prawej. Długość powierzchni 1778 mm, szerokość 55 mm, nominalna prędkość obrotowa freza $n = 560$ obr/min, prędkość posuwu $v_f = 1233$ mm/min, głębokość skrawania $a_p = 1$ mm.

Na podstawie rezultatów obróbki dobrano parametry symulacji procesu skrawania, dla każdej z powierzchni. W cyklu symulacji wyznaczono prognozowane wartości prędkości optymalnych, dla których następnie realizowano proces frezowania. Do symulacji procesu frezowania powierzchni wykorzystano autorski program komputerowy *Amikro4* wsparty autorskimi skryptami w środowisku *Matlab*.

Wyniki prognozy dla prędkości optymalnej i wyniki obróbki dla prędkości optymalnej przedstawiono w tab. 1.

Podczas analizy wyników symulacji, na etapie prognozowania rezultatów dla różnych prędkości obrotowych, obserwowano następujące wskaźniki: $RMS_{95\%}$, A_{max} , $RMS_{A_{max}5\%}$, i $RMS_{95\%}$ względem średniej (opis wskaźników w [1]). Za najważniejszy ze wskaźników przyjęto $RMS_{95\%}$ względem średniej, a pozostałe traktowano pomocniczo. Wskaźnik ten jest wartością RMS drgań wyznaczoną dla 95% czasu obróbki (co zapobiega uwzględnianiu w RMS procesów przejściowych w czasie wchodzenia i wychodzenia narzędzia z przedmiotu), ale obliczoną względem wartości średniej z uwzględnianego przebiegu. Wskaźnik ten jest więc równoważny odchyleniu standardowemu przebiegu. Interpretować go można, jako wskaźnik poziomu drgań po skorygowaniu odkształcenia powierzchni obrabianej wynikającego z nacisku narzędzia. Odpowiada to lepiej sposobowi pomiaru drgań podczas rzeczywistej obróbki tj. pomiarowi przyspieszeń, podczas którego pomija się „statyczne” składowe ugięcia powierzchni obrabianej / przemieszczenia przedmiotu. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji z zaznaczonymi wartościami wskaźników. Na rys. 4 i 5 przedstawiono wykresy ilustrujące symulowane wartości wszystkich wskaźników w funkcji prędkości obrotowej narzędzia. Na ich podstawie wybrano dla powierzchni 1 jako optymalną prędkość obrotową $n = 1500$ obr/min, a następnie zrealizowano obróbkę z tą prędkością. Dla powierzchni 2 jako prędkość optymalną wybrano $n = 700$ obr/min. W celu zapewnienia stałej wartości posuwu na ostrze f_z , przeskalowano wartości prędkości posuwu v_f , proporcjonalnie do zmienionych wartości prędkości obrotowej. Następnie zrealizowano obróbkę dla wybranych parametrów.

Tab. 1. Wartości RMS przemieszczeń podczas frezowania powierzchni. Wyniki pogrubione są lepsze od uzyskanych podczas obróbki wg parametrów nominalnych; n - prędkość obrotowa narzędzia, v_f - prędkość posuwu, a_p - nominalna głębokość skrawania

	Rodzaj frezowania	n [obr/min]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	RMS _{95%wś} przemieszczeń [mm]
Powierzchnia 1					
Obróbka (parametry nominalne)	Pełne	1300	600	1	0,000287
	Współbieżne	1300	600	1	0,000955
Symulacja (parametry nominalne)	Pełne	1300	600	1	0,000289
	Współbieżne	1300	600	1	
Prognoza (n optymalne)	Pełne	1500	692	1	0,000254
	Współbieżne	1500	692	1	
Obróbka (n optymalne)	Pełne	1500	692	1	0,000311
	Współbieżne	1500	692	1	0,000512
Powierzchnia 2					
Obróbka (parametry nominalne)	Współbieżne	560	1233	1	0,002925
Symulacja (parametry nominalne)	Współbieżne	560	1233	1	0,002958
Prognoza (n optymalne)	Współbieżne	700	1541	1	0,000542
Obróbka (n optymalne)	Współbieżne	700	1541	1	0,001528

Na rys. 6 pokazano przebiegi przemieszczeń drgań uzyskanych na podstawie sygnałów zarejestrowanych w poszczególnych czujnikach umieszczonych wzdłuż powierzchni 2 przy frezowaniu współbieżnym z prędkością nominalną $n = 560$ obr/min, a na rys. 7 – z prędkością optymalną $n = 700$ obr/min. Wartości RMS przedstawione w tab. 1 są wartościami uśrednionymi z RMS zaznaczonych fragmentów przebiegów z poszczególnych czujników odpowiednio z rys. 6 i 7. Taki sposób wyznaczania przyjęto jako dający najbardziej zbliżone warunki analizy drgań między pomiarem w warunkach rzeczywistego procesu obróbkowego, a wynikami symulacji. Podczas symulacji drgania mierzone są względem lokalnego układu odniesienia przemieszczającego się wraz z frezem. Podczas rzeczywistej



obróbki czujniki pozostają nieruchome, a frez znajduje się w ich pobliżu tylko przez pewien czas.

W porównaniu z technologią standardową, w przypadku obróbki powierzchni 1 uzyskano zdecydowane obniżenie poziomu drgań (RMS przemieszczeń) dla frezowania współbieżnego o 46% przy niewielkim wzroście poziomu drgań w zabiegach frezowania pełnego o 8%. Towarzyszył temu wzrost prędkości obrotowej o 15% skutkujący skróceniem czasu głównego zdejmowania warstwy naddatku (2 zabiegi) o 0,79 min, czyli o 13%. W przypadku obróbki powierzchni 2 uzyskano zdecydowane obniżenie poziomu drgań dla frezowania współbieżnego o 48%. Towarzyszył temu wzrost prędkości obrotowej o 25% skutkujący skróceniem czasu głównego zdejmowania warstwy naddatku o 0,29 min, czyli o 20%.

4. Wnioski

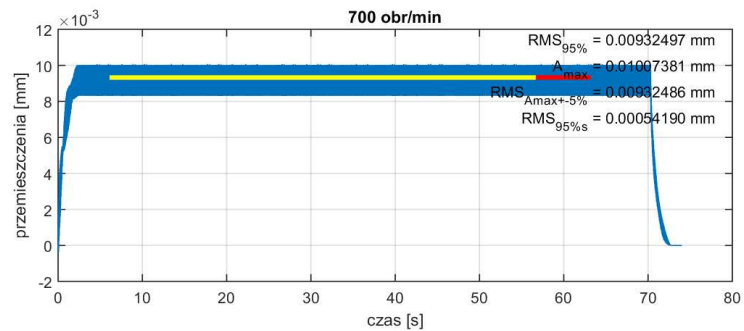
Potwierdzono skuteczność proponowanej metody nadzorowania drgań podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych, z wykorzystaniem dedykowanej techniki projektowania mechatronicznego, tj. wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem. Uzyskano zarówno redukcję drgań (szczególnie znaczącą podczas frezowania współbieżnego) jak i wydajne skrócenie czasu obróbki.

Bibliografia

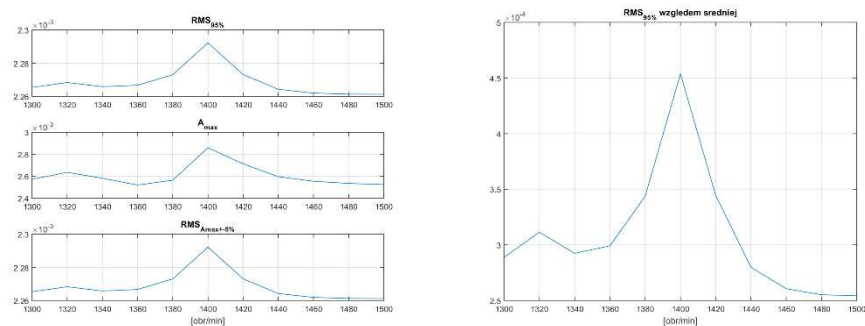
- [1] Kaliński K. J., Galewski M. A., Mazur M. R., Morawska N.: Optymalizacja prędkości obrotowej narzędzia podczas frezowania - procedura modalna. W: Projektowanie mechatroniczne. Zagadnienia wybrane. Red. M. Mańka. Kraków: Katedra Robotyki i Mechatroniki AGH 2018 (w druku).
- [2] Kaliński K. J., Galewski M. A., Mazur M., Morawska N.: Optimization of spindle speed during milling of high-dimensional structures with the use of techniques of experiment-aided virtual prototyping. ICMEM'2017: International Conference on Mechanical Engineering & Mechanics: Industrial Engineering, Mechatronics and Industry Future. Metz, France, December 10-12, 2017.
- [3] Kaliński K. J., Galewski M. A.: Optimal spindle speed determination for vibration reduction during ball-end milling of flexible details. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2015, 92, s. 19-30.
- [4] Kaliński K. J.: Nadzorowanie procesów dynamicznych w układach mechanicznych. Gdańsk: Wydawnictwo PG 2012
- [5] Heylen W., Lammens S., Sas P.: Modal Analysis Theory and Testing. Leuven: KU Leuven 2007. ISBN 90-73802-61-X.

Podziękowania

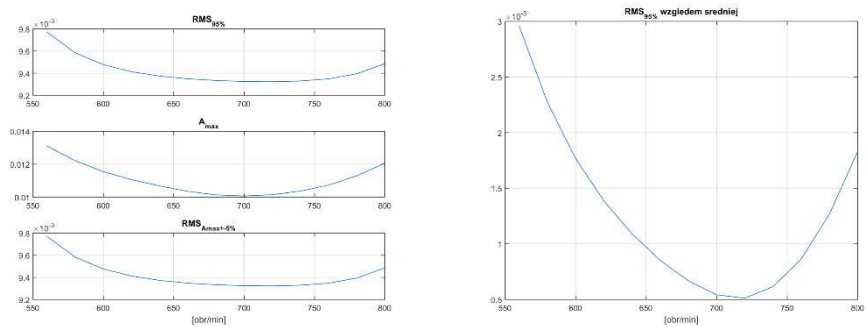
Prace badawcze zrealizowano we współpracy z PHS HYDROTOR S.A. w Tucholi w ramach projektu TANGO1/266350/NCBR/2015.



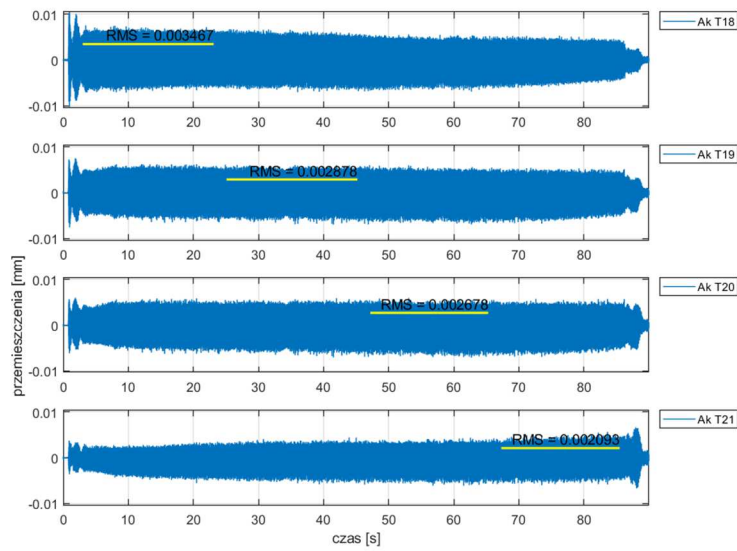
Rys. 3. Wynik symulacji drgań narzędzie-przedmiot obrabiany w procesie skrawania, procedura eksploatacyjna, powierzchnia 2, prędkość obrotowa $n=700$ obr/min



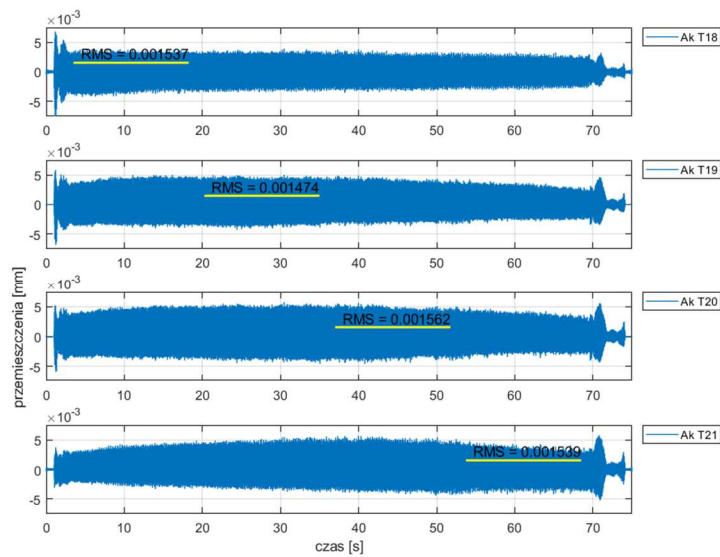
Rys 4. Wartości wskaźników poziomu drgań uzyskanych w wyniku symulacji procesu skrawania, procedura eksploatacyjna, powierzchnia 1



Rys 5. Wartości wskaźników poziomu drgań uzyskanych w wyniku symulacji procesu skrawania, procedura eksploatacyjna, powierzchnia 2



Rys. 6. Przeszyczenia drgań podczas frezowania współbieżnego powierzchni 2, uzyskane na podstawie pomiarów z poszczególnych akcelerometrów, $n = 560$ obr/min



Rys. 7. Przeszyczenia drgań podczas frezowania współbieżnego powierzchni 2, uzyskane na podstawie pomiarów z poszczególnych akcelerometrów, $n = 700$ obr/min