

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

## Nowoczesna obróbka mechaniczna stopów magnezu i aluminium

### Modern mechanical working of magnesium and aluminium alloys

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska

#### Wyniki badań Results

#### Oprogramowanie do analizy stabilności

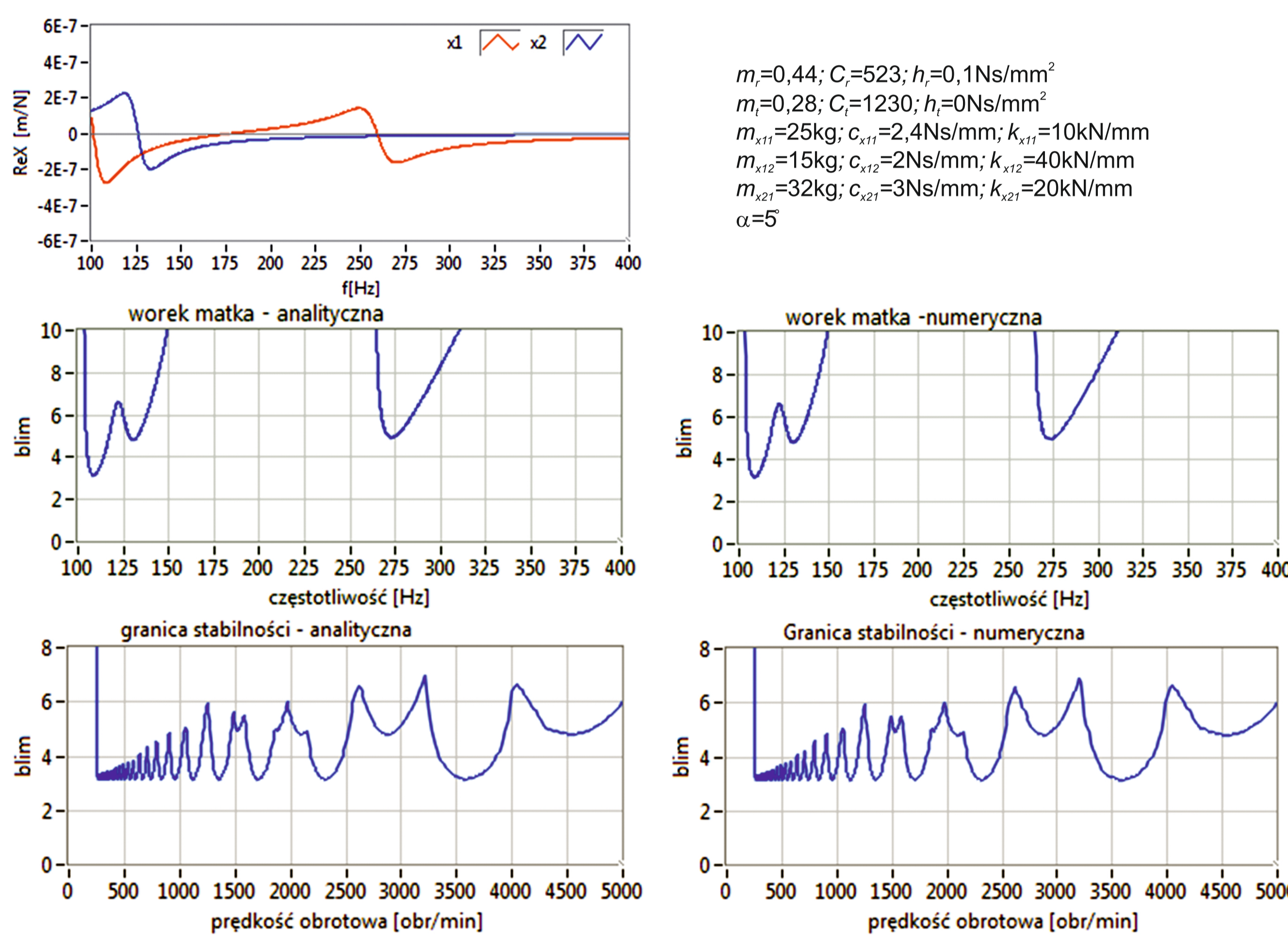
Klasyczna analiza stabilności oparta jest na rozwiązywaniu równań stabilności dynamicznego układu OUPN. Mimo bardzo znacznego rozwoju takich metod, mają one istotne ograniczenie – bardzo trudne lub wręcz niemożliwe jest uwzględnienie w nich nieciągłości, nieliniowości oraz zmienności w czasie parametrów analizowanego układu. Podstawową cechą numerycznej symulacji drgań jest wyznaczenie kolejnych położeń, prędkości i przyspieszeń drgających elementów, w kolejnych iteracjach (chwilach czasu) na podstawie stanu tych parametrów w poprzedniej iteracji oraz aktualnie działających na układ sił. Siły te wyznaczone są także w każdym kroku iteracji na podstawie chwilowego (aktualnego) przekroju warstwy skrawanej i prędkości skrawania. Takie podejście umożliwia uwzględnienie dowolnie skomplikowanego opisu tak procesu skrawania jak układu OUPN.

W środowisku LabVIEW opracowano program, w którym można porównać granicę stabilności wyznaczoną metodą analityczną lub numeryczną z wynikami symulacji. Symulacja numeryczna z założenia pozwala na większą elastyczność konfiguracji danych wejściowych, m. in.:

- dynamiczna charakterystyka sił skrawania może mieć dowolny przebieg,
- uwzględnienie podstawowej nieliniowości procesu skrawania, jaką jest wychodzenie narzędzia z materiału obrabianego, powodujące zanik sił skrawania,
- symulacja numeryczna umożliwia uwzględnienie nieliniowości wynikającej z interferencji powierzchni przyłożenia z powierzchnią skrawania, która odgrywa szczególną rolę przy niskich prędkościach skrawania wywołując znany efekt stabilności niskich prędkości. Efekt ten nie jest możliwy do wyznaczenia w oparciu o liniową analizę stabilności,
- symulacja numeryczna pozwala na uwzględnienie bardziej złożonych przypadków procesu skrawania. Dla procesu toczenia istotne jest, iż symulacje mogą być wykonane dla toczenia nieswobodnego (dla nieliniowej krzywizny skrawającej, z uwzględnieniem narażenia nieortogonalnego i praktycznie o dowolnej liczbie stopni swobody),
- w najnowszej wersji oprogramowania dokonano znacznych zmian w programie, w tym: przyspieszono jego działanie,
- przy wyznaczeniu krzywej workowej za pomocą symulacji numerycznej narzucono liczbę obrotów na 30,
- zmieniono kryterium stabilności: po zakończeniu symulacji w ustalonych warunkach skrawania program ocenia stabilność układu na podstawie podwójnej amplitudy drgań w czasie ostatniego obrotu, porównując ją z dopuszczalną, zadeklarowaną przez użytkownika (ampl lim). Przekroczenie tej amplitudy oznacza niestabilność.
- dodano wyznaczenie granicy stabilności metodą numeryczną,
- w obliczeniach metodą analityczną i numeryczną uwzględniono układy wielomodalne o dwóch stopniach swobody.

#### Wyniki analizy stabilności uzyskanych metodą analityczną i numeryczną

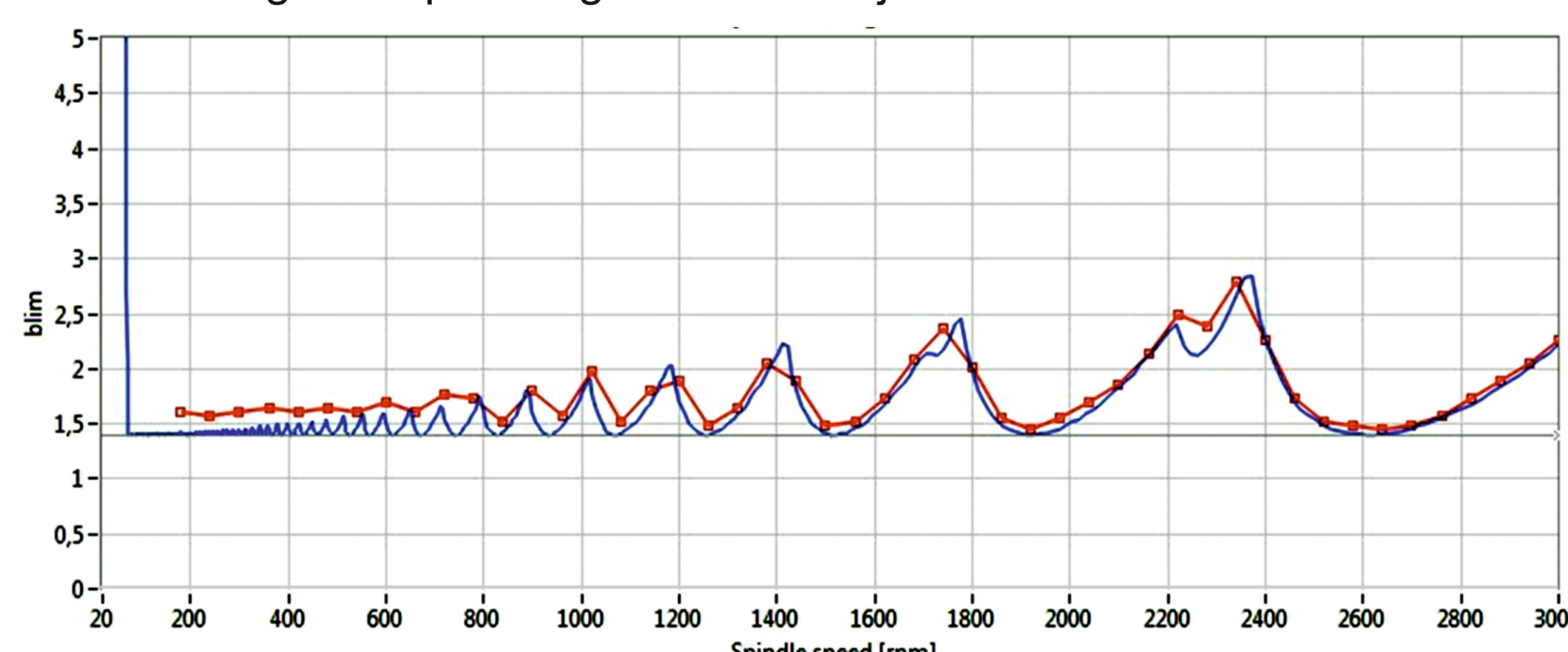
Metoda numeryczna podobnie jak metoda analityczna bazuje na macierzowym zapisie układu równań różniczkowych OUPN. Zaletą metody numerycznej jest łatwość uzyskania rozwiązań poprzez odpowiednie zakodowanie postaci macierzowej w dowolnym języku programowania, w tym wypadku w środowisku LabVIEW. W metodzie analitycznej złożoność zapisu matematycznego wyprowadzonych równań może prowadzić do błędów zarówno w trakcie wyprowadzania rozwiązania jak i kodowania. Stopień trudności rośnie wraz ze stopniem złożoności układu MDS. Do oceny metod przyjęto zestawy danych testowych, w których badano wpływ współczynnika tłumienia procesu skrawania, kąta obrotu układu MST o dwóch stopniach swobody względem kierunku r. Przykłady uzyskanych wyników przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wyniki analizy stabilności dla dwóch mas modalnych na kierunku  $x_1$ , i jednej na kierunku  $x_2$ , direction and a two modal masses on the  $x_2$ , direction

Na rys. 1 wykres pierwszy przedstawia przebieg części rzeczywistej częstotliwościowej funkcji przejścia (FRF) układu MST na kierunku  $x_1$  i  $x_2$ . Porównując workę matkę z tymi wynikami zaobserwować można znaną zależność częstotliwości drgań od minimów części rzeczywistej FRF, a przede wszystkim łatwo zidentyfikować postaci drgań odpowiedzialne za niestabilność układu. Kształt krzywych workowych ma zasadniczy wpływ na granicę stabilności, której minima nie leżą na jednym poziomie, ale są zależne od minimów worka matki.

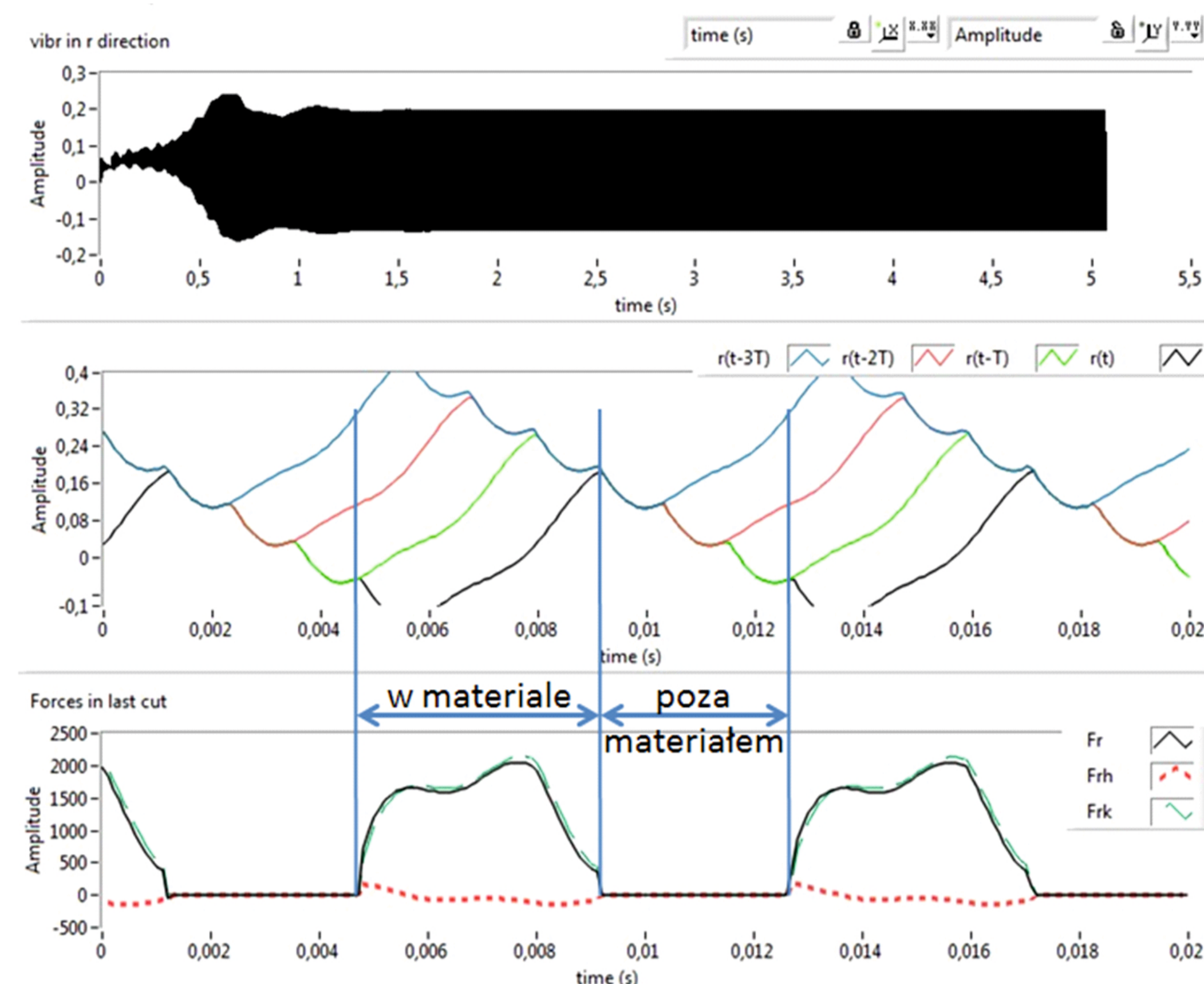
W opracowanym symulatorze zjawiska towarzyszące procesowi skrawania oraz pojawieniu się i rozwojowi drgań samowzbudnych, jak również wpływ wszelkich nieliniowości procesu skrawania użytkownik może dodatkowo analizować dzięki przedstawieniu przebiegów drgań w kierunku promieniowym r, śladów pozostawionych na powierzchni skrawania przy 4 kolejnych obrotach przedmiotu obrabianego oraz przebiegów sił w funkcji czasu.



Rys. 2. Porównanie metody analitycznej z wynikami symulacji dla bazowych parametrów.

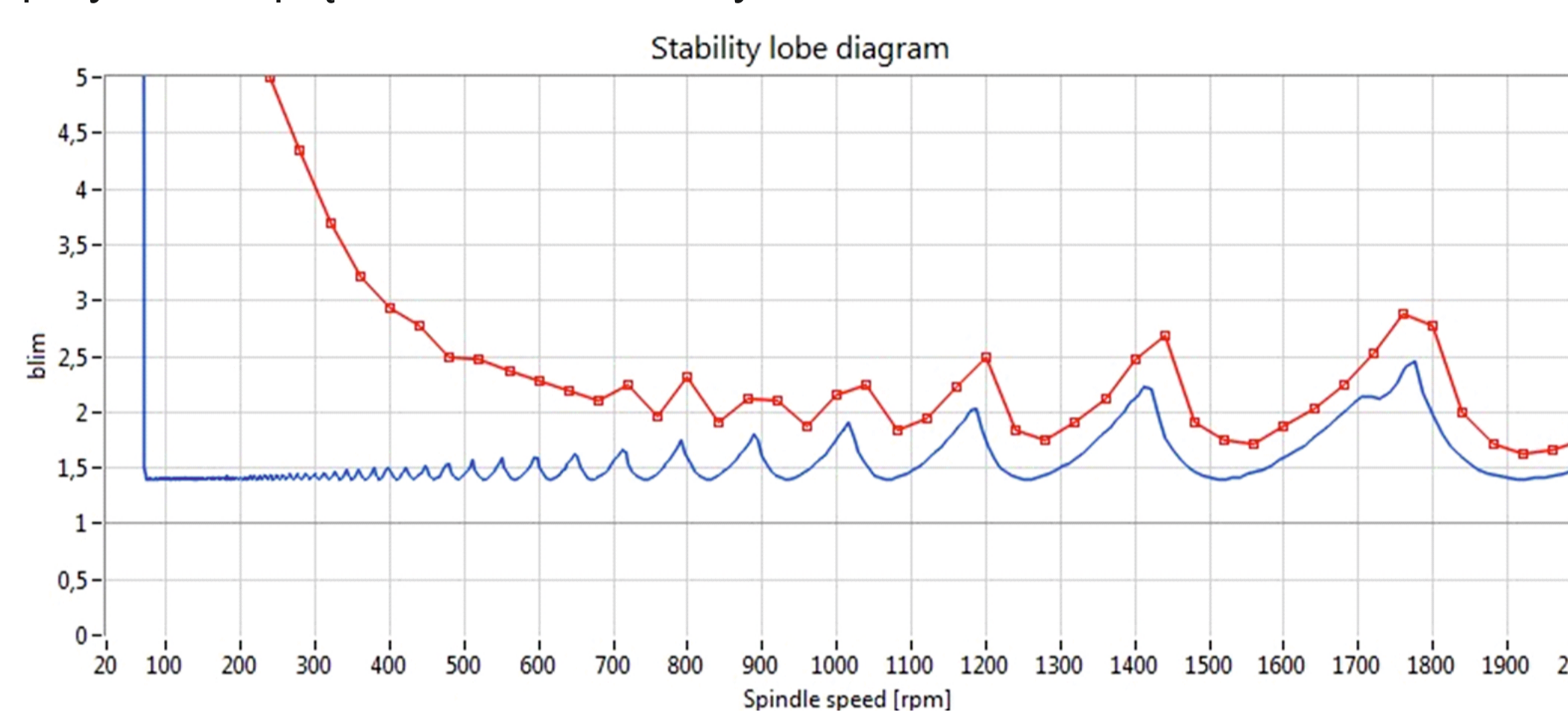
Na rys. 3 przedstawiono ustalenie cyklu granicznego, spowodowane wychodzeniem narzędzia z materiału. Zjawisko to widoczne jest na przecinających się torach ruchu narzędzia w kolejnych obrotach przedmiotu i przebiegach sił skrawania.

Gdy ostrze jest w materiale, wtedy siły są różne od zera, gdy ostrze jest poza materiałem, siły są z definicji równe zero, zarówno pochodzące od sztywności jak tłumienia procesu skrawania. To fundamentalna nieliniowość procesu skrawania, trudna do uwzględnienia analitycznie.



Rys. 3. Przykładowe wyniki symulacji z ustaleniem cyklu granicznego, spowodowanego wychodzeniem narzędzia z materiału dla bazowych parametrów

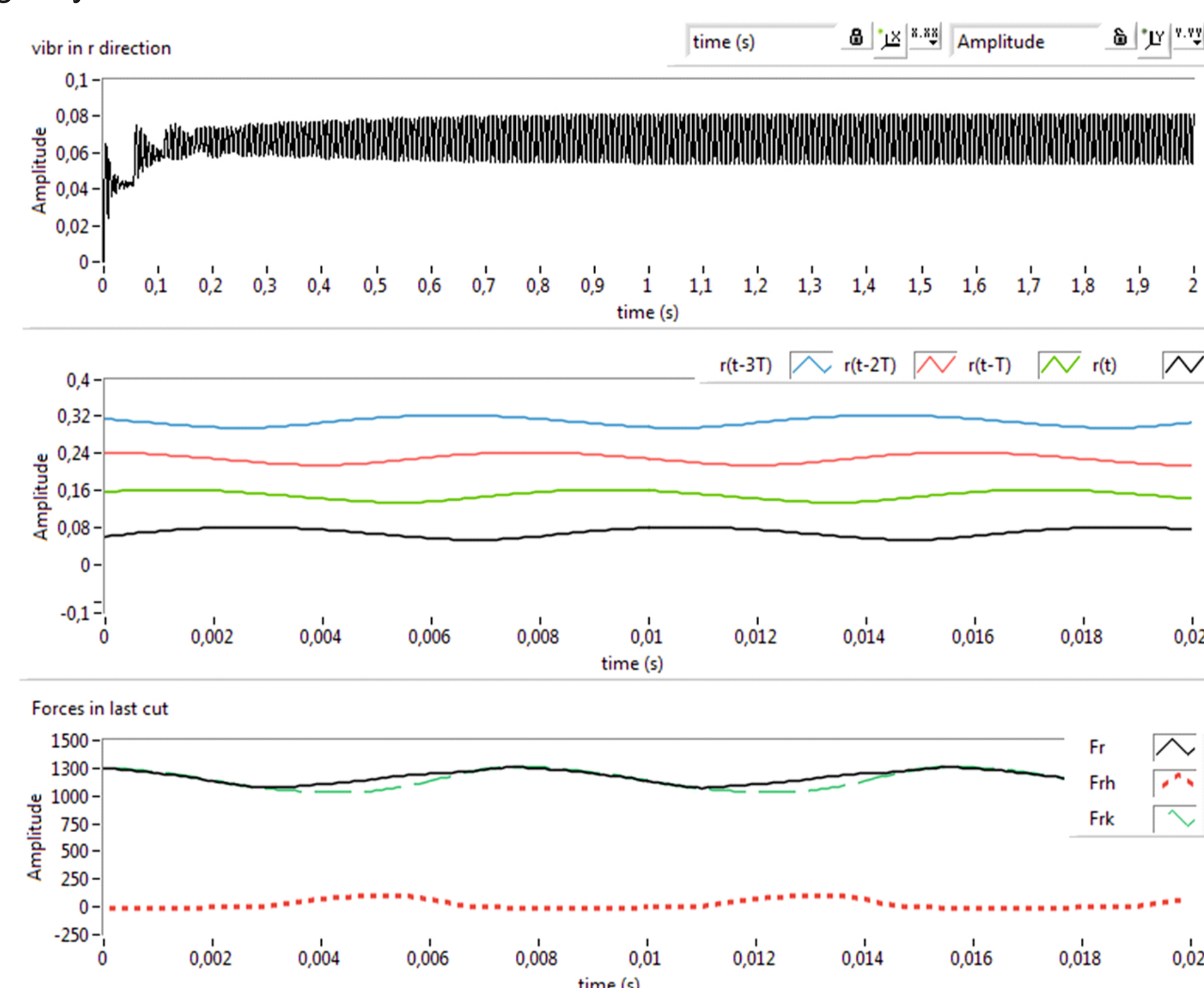
Po uwzględnieniu efektu stabilności niskich prędkości skrawania ( $LSS=200$ , pozostałe parametry bez zmian) w symulacji numerycznej (rys. 4), dla wyższych prędkości obrotowych można zaobserwować nieznaczne przesunięcie granicy stabilności w kierunku większych głębokości skrawania. Charakterystyczne zwiększenie się stabilności widać jednak szczególnie wyraźnie przy niskich prędkościach obrotowych.



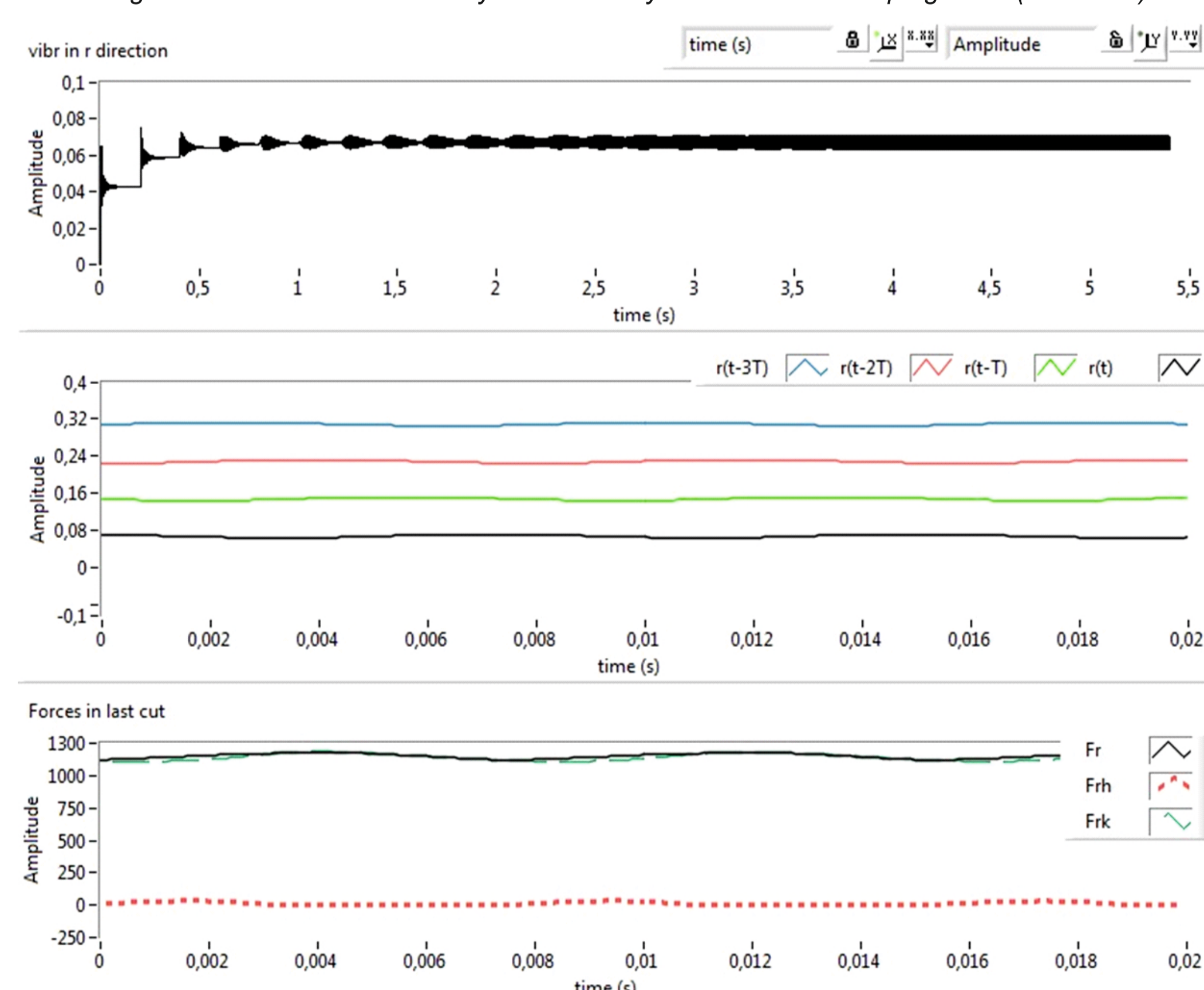
Rys. 4. Porównanie metody analitycznej dla 2 stopni swobody z wynikami symulacji przy uwzględnieniu nieliniowego tłumienia,  $LSS=200$

Na rys. 5 przedstawiono ustalenie cyklu granicznego, jednak nie jest ono spowodowane wychodzeniem z materiału, lecz nieliniowym tłumieniem procesu skrawania  $LSS=200$  – widoczne są wyraźnie nadwyżki siły tłumiącej ( $F_{nl}$ ) przy wchodzeniu narzędzia w materiał obrabiany, podczas gdy w pozostałym czasie jest ona znikoma. Podwójna amplita drgań jest znaczna (ok. 0.03mm), układ uznany za niestabilny.

Dla mniejszych prędkości obrotowych (rys. 6,  $n=300$ , nadal  $LSS=200$ ) zjawisko stabilności niskich prędkości skrawania powoduje znaczny wzrost sił tłumiących. Pojawiające się wtedy drgania mają niewielką podwójną amplitudę (mniejszą niż 0.01mm), co oznacza spełnienie przyjętego kryterium stabilności.



Rys. 5. Ustalenie cyklu granicznego spowodowane nieliniową siłą tłumiącą ( $LSS=200$ )



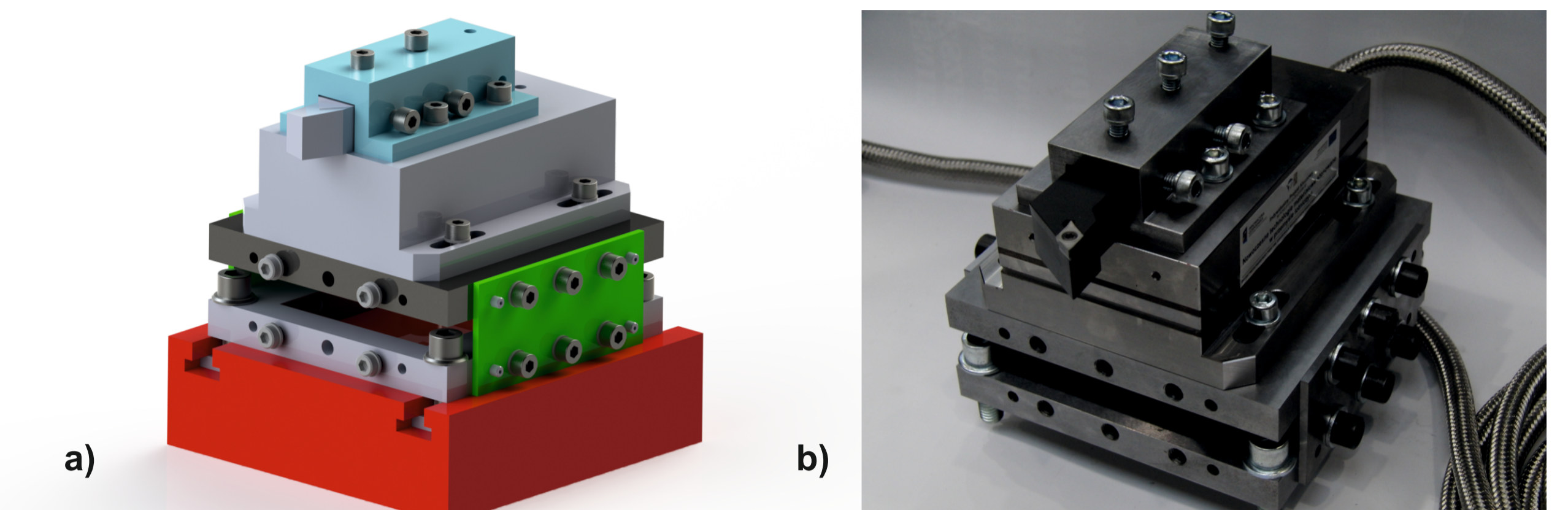
Rys. 6. Zjawisko stabilności niskich prędkości skrawania ( $n=300$ ,  $LSS=200$ )

#### Budowa stanowiska do pomiaru dynamicznych składowych sił skrawania

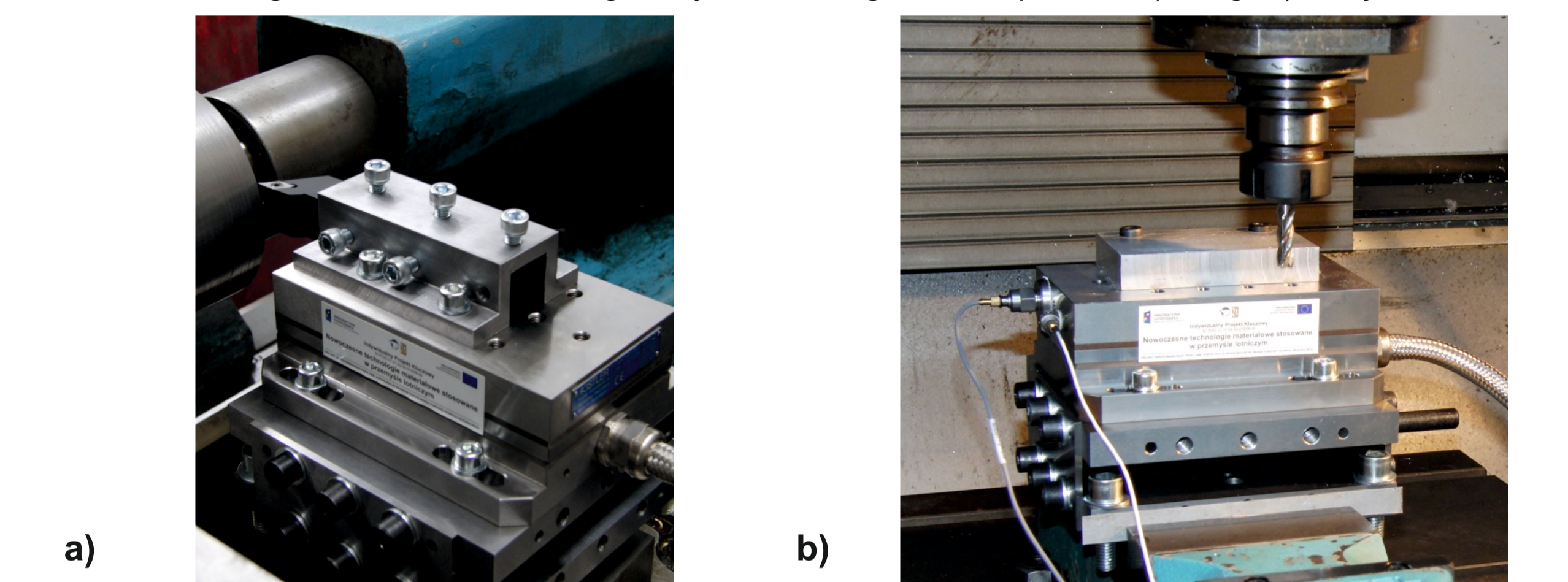
Zaprojektowano i wykonano urządzenie przeznaczone do pomiaru dynamicznych składowych sił skrawania w procesie toczenia i frezowania. Projekt ten został zgłoszony do Urzędu Patentowego. Stanowisko charakteryzuje się:

- dużą uniwersalnością zastosowań,
- możliwością badania układów o 1 lub 2 stopniach swobody,
- możliwością wyboru kierunku podatności przy testach układów o 1 stopniu swobody,
- możliwością rejestrowania siły w trzech osiach siłomierza.

W odróżnieniu od innych rozwiązań, w zaprojektowanym stanowisku element podatny jest między siłomierzem a dolną płytą mocującą siłomierz (siłomierz możliwie najbliższy procesowi skrawania), co pozwala na dokładniejsze określenie zjawisk zachodzących w procesie.



Rys. 7. Urządzenie do pomiaru dynamicznych składowych sił skrawania: a) projekt b) gotowe urządzenie.



Rys. 8. Urządzenie do pomiaru dynamicznych składowych sił skrawania podczas a) toczenia, b) frezowania.

Podczas badań wstępnych stwierdzono wpływ podatności uchwytu na przebieg sił i drgań, potwierdzając poprawność działania oraz prawidłowy dobór elementów toru pomiarowego. Zakłada się kontynuację prac z wykorzystaniem stanowiska, przeprowadzając w ten sposób weryfikację proponowanych rozwiązań teoretycznych oraz badając dynamiczną charakterystykę procesu skrawania.

#### Wnioski Conclusions

Z porównania przeprowadzonych analiz wynika, że metoda numeryczna jest mniej dokładna od analitycznej. Jednakowoż zastosowanie zapisu macierzowego równań różniczkowych dla układów o większej liczbie swobody jest prostsze w porównaniu do rozwiązania równań metodą analityczną.

Metody analityczne wyznaczania granic stabilności są znacznie bardziej wydajne, jednakże symulacja numeryczna zapewnia znacznie większe możliwości, np. uwzględnienia wielu charakterystycznych zjawisk towarzyszących procesowi skrawania, nieliniowości, chwilowych zmian przekroju WS czy geometrii narażenia. Kolejny etap, będący kontynuacją prac, będzie obejmował opracowanie oprogramowania do analitycznego/numerycznego wyznaczania granicy stabilności dla układów o dwóch stopniach swobody podczas toczenia nieswobodnego oraz frezowania a także jego weryfikację i porównanie z metodami symulacyjnymi. Kolejnym krokiem rozwoju części programu do symulacji numerycznej będzie implementacja algorytmów odzwierciedlających zjawiska towarzyszące procesowi frezowania.

#### Conclusion

Comparison of the analyzes show that numerical method is less accurate than analytical. Calculation of the analytical method takes about one second while the numerical method of computation takes from a few to tens of seconds, depending on the number of input parameters - the number of modes. However the implementation of application which use matrix notation of differential equations with a greater degree of freedoms is easier than solving the analytical method equations.

Analytical methods for determining the limits of stability are much more efficient, however, numerical simulation provides more possibilities, for example, include many characteristic phenomena of the cutting process, nonlinearity, temporary changes of cutting layer section geometry or corner radius.

The next stage, which is a continuation of the work will include development of software for the analytical/numerical designation of the stability limit for systems with two degree of

#### Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Uzyskane wyniki pozwolą efektywniej prowadzić obróbkę detali oraz uzyskać lepszą jakość powierzchni obrabianej dzięki unikaniu drgań samowzbudnych.

#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

#### Publikacje:

1. Powalka B., Chodźko M., Jemieliński K.: Stability analysis in milling based on operational Modal data, Journal of Machine Engineering, Vol. 11, No. 4, 2011
2. Jemieliński K., Nejman M., Śniegulska-Grządka D.: Metody analizy stabilności przy toczeniu części I: Rozwiązania analityczne i numeryczne, Inżynieria Maszyn 2012
3. Jemieliński K., Wypysiński R.: Metody analizy stabilności przy toczeniu części II: Symulacja numeryczna, Inżynieria Maszyn 2012

#### Prace mgr, dr, hab.

#### Prace inżynierskie w realizacji:

- Ewelina Kulik: **Analiza stabilności obróbki zintegrowana z systemem CAM.** Promotor: dr inż. Rafał Wypysiński
- Jakub Grzesiuk: **Modelowanie wykresów stabilności zintegrowane z systemem CAM.** Promotor: dr inż. Rafał Wypysiński
- Damian Lewczuk: **Multimedialny kurs CAD/CAM z analizą funkcjonalności strategii dedykowanych do obróbki stopów aluminium i materiałów trudnoskrawalnych.** Promotor: dr inż. Rafał Wypysiński
- Tomasz Matejowski: **Projekt stanowiska laboratoryjnego do określenia charakterystyki dynamicznej.** Promotor: dr inż. Mirosław Nejman

#### Zgłoszenia patentowe

„Urządzenie do pomiaru dynamicznych składowych sił skrawania”. Zgłoszenie z dnia 15.04.2012 pod nr P-398818.