

*tokarka karuzelowa,
napęd, dynamika,
synchronizacja,*

Franciszek ORYŃSKI¹
Grzegorz BECHCIŃSKI¹
Witold PAWŁOWSKI¹

EKSPERYMENTALNE BADANIA DYNAMIKI UKŁADÓW NAPĘDOWYCH I ICH SYNCHRONIZACJI W KARUZELOWEJ TOKARCE TCW 3100

Przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań układów napędowych oraz ich synchronizacji w prototypie karuzelowej tokarki dwustojakowej sterowanej numerycznie typu TCW 3100. Obrabiarka ta jest przeznaczona do wysokowydajnej obróbki wykorbień składanych wałów korbowych silników okrętowych. Badaniom poddano zdwojone, niezależne napędy kolumn oraz belki poprzecznej. Celem badań było zmierzenie czasu osiągnięcia pełnej zadanej prędkości przez badany układ napędowy oraz charakterystycznych częstotliwości wzbudzanych podczas uruchamiania i zatrzymywania napędu. Synchronizację napędów zbadano poprzez porównanie czasowych przebiegów sygnału przyspieszenia napędzanych elementów maszyny. Wyniki badań świadczą o dobrych właściwościach dynamicznych badanych napędów oraz poprawnie dobranych silnikach w stosunku do bezwładności elementów napędzanych. Wskazują też na właściwy sposób elektrycznego sprzężenia silników napędowych i poprawny dobór algorytmów w układzie sterowania tymi silnikami.

1. WSTĘP

Badania dynamiki układów napędowych prowadzone są w celu określenia charakterystyk dynamicznych układów napędowych. Badania przeprowadza się podczas uruchomienia i zatrzymania układów napędowych poprzez wyznaczenie czasowego przebiegu przyspieszeń elementów napędzanych [1]. Na podstawie tych informacji możliwe jest również określenie właściwości dynamicznych badanego układu, przedstawiając wyniki pomiaru w dziedzinie częstotliwości. Celem badań jest zmierzenie czasu osiągnięcia pełnej zadanej prędkości przez badany układ napędowy oraz charakterystycznych częstotliwości wzbudzanych podczas uruchamiania i zatrzymywania napędu [2].

Badania synchronizacji napędów są uzasadnione przy równoczesnym włączaniu kilku układów napędzających ten sam zespół. W przypadku dużych obrabiarek, dla których zastosowano konstrukcję o budowie bramowej, stosuje się zarówno układy napędowe sprzężone mechanicznie, jak również niezależne układy napędowe sprzężone jedynie za pomocą sterownia [3]. W przypadku sprzężenia mechanicznego zagadnienie synchronizacji

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15

napędów ogranicza się do analizy podatności elementów sprzęgających oraz ich wpływu na różnicę w czasie włączenia napędów.

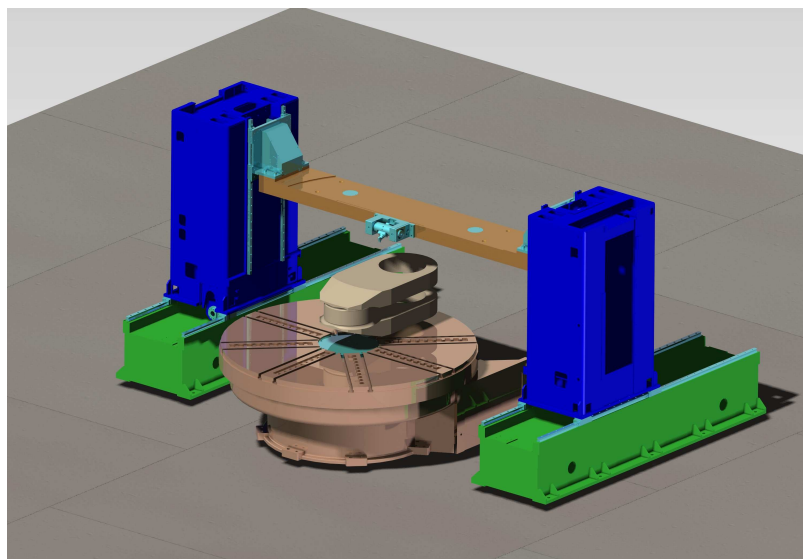
2. WARUNKI BADAŃ

Badaniom poddano prototyp dwustojakowej karuzelowej tokarki TCW 3100 sterowanej numerycznie w 4 osiach (rys. 1), która jest przeznaczona do wysokowydajnej obróbki wykorbień składanych wałów korbowych silników okrętowych. Kolumny przesuwiają się po prowadnicach zamocowanych do łóż, otrzymując ruch od dwóch napędów sterowanych numerycznie CNC. Podobnie, belka poprzeczna przesuwa się po prowadnicach zamocowanych do kolumn, otrzymując ruch od dwóch napędów sterowanych numerycznie CNC. W skład napędu posuwu wchodzi:

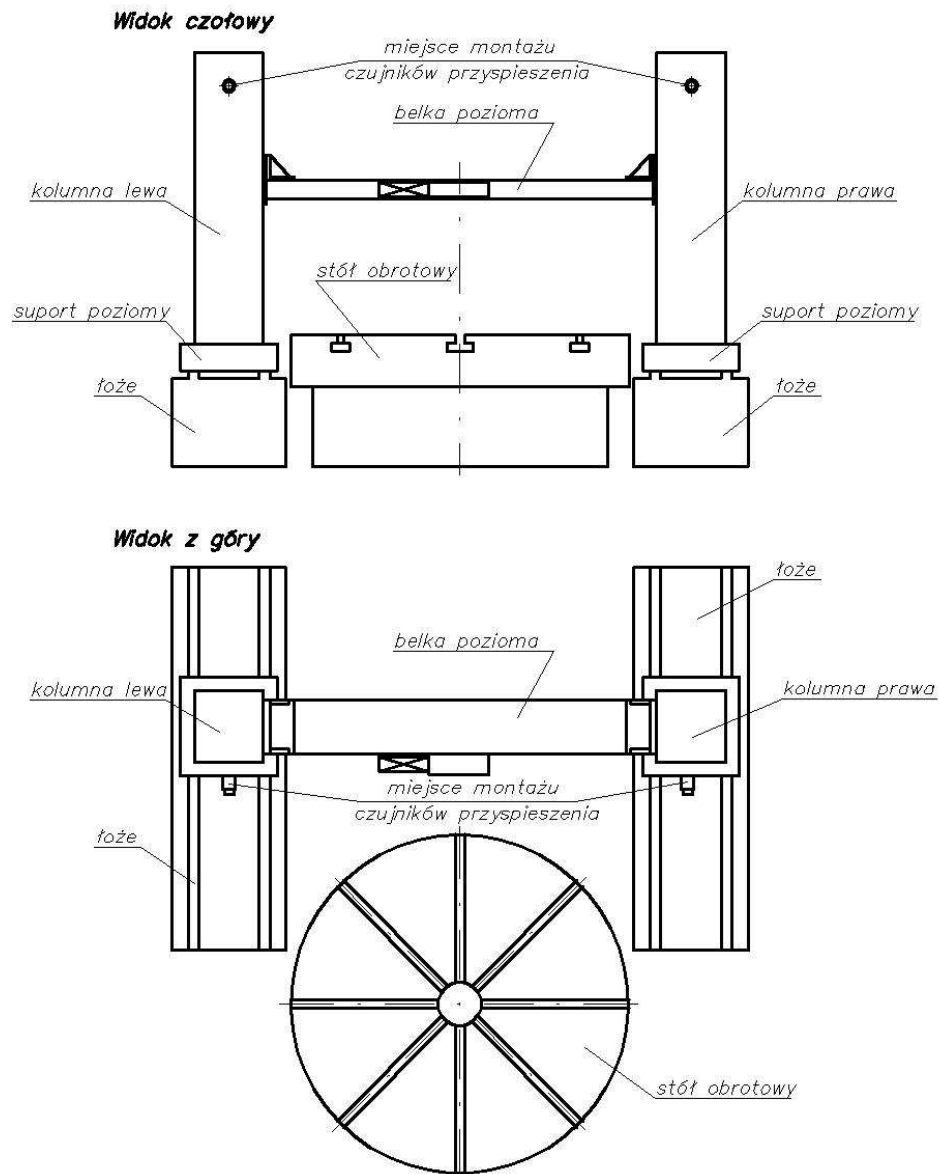
- silnik 1FK7 SIEMENS,
- reduktor P801S,
- sprzęgło ROTEX GS55,
- zespół śruba – nakrętka toczna.

W badanej tokarce karuzelowej zastosowano niezależne napędy sprzężone za pomocą układu sterowania. Dlatego konieczne było przeprowadzenie badań synchronizacji włączenia napędu kolumn oraz napędu belki poziomej, gdyż tam zastosowano zdwojone, niezależne napędy.

Miejsca zamocowania do obrabiarki czujników akcelerometrycznych pomiaru przyspieszenia przedstawione zostały na rysunkach 2 i 3.



Rys. 1. Widok tokarki karuzelowej TCW 3100
Fig. 1. The view of vertical lathe TCW 3100



Rys. 2. Stanowisko badawcze przyspieszeń kolumn tokarki w kierunku wzdłużnym w celu zbadania właściwości dynamicznych napędów i ich synchronizacji

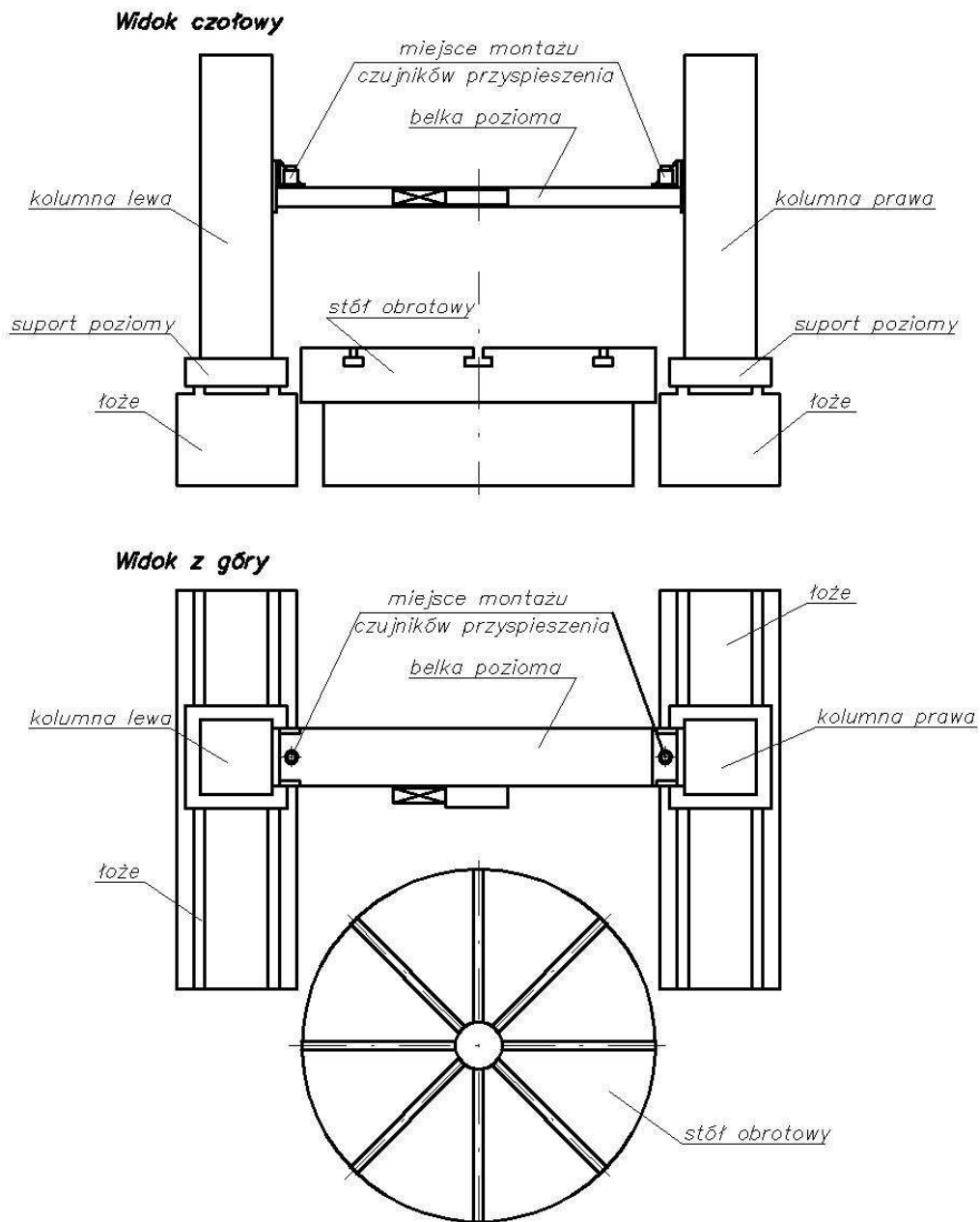
Fig. 2. The test stand of the columns acceleration in longitudinal direction to analyse dynamical characteristics of the drives and their synchronization

Podczas przeprowadzonych badań zostały spełnione wymagania dotyczące warunków przeprowadzenia badań dynamicznych [4-5] i [6], a w szczególności:

- stabilizacja cieplna badanych zespołów obrabiarki,
- stabilizacja cieplna aparatury pomiarowej,
- zabezpieczenie przed zewnętrznym promieniowaniem cieplnym i słonecznym,
- maszyna w pełni sprawna,
- maszyna kompletnie zmontowana, wypoziomowana i osiowana,
- maszyna nieobciążona, tzn. bez przedmiotu obrabianego.

Doświadczalna analiza dynamiki napędów oraz ich synchronizacji została przeprowadzona dla napędów kolumn oraz dla napędów belki poziomej przy trzech wybranych wartościach prędkości ruchu:

- minimalnej – 0,02 m/min,
- pośredniej – 2 m/min,
- maksymalnej – 4 m/min.



Rys. 3. Stanowisko badawcze przyspieszeń belki poziomej w kierunku pionowym w celu zbadania właściwości dynamicznych napędów i ich synchronizacji

Fig. 3. The test stand of the transversal beam acceleration in vertical direction to analyse dynamical characteristics of the drives and their synchronization

3. METODYKA BADAŃ

Sposobem określenia właściwości dynamicznych napędów tokarki karuzelowej TCW 3100 jest analiza czasowych przebiegów przyspieszeń elementów napędzanych oraz wyznaczenie autospektrum sygnałów przyspieszeń (widmowej gęstości własnej). Dzięki tej analizie można wyznaczyć czas osiągnięcia zadanej prędkości ruchu. Można również określić częstotliwości drgań, które zostaną wzbudzone przy włączaniu napędu. Synchronizację można zbadać poprzez porównanie czasowych przebiegów sygnału przyspieszenia napędzanych elementów maszyny [7]. W tym celu wykonano:

- charakterystyki amplitudowo-czasowe przebiegu przyspieszenia,
- charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe przebiegu przyspieszenia,
- jednoczesne charakterystyki amplitudowo-czasowe przyspieszeń z dwóch czujników akcelerometrycznych, umieszczonych w różnych miejscach na napędzanych elementach badanej konstrukcji.

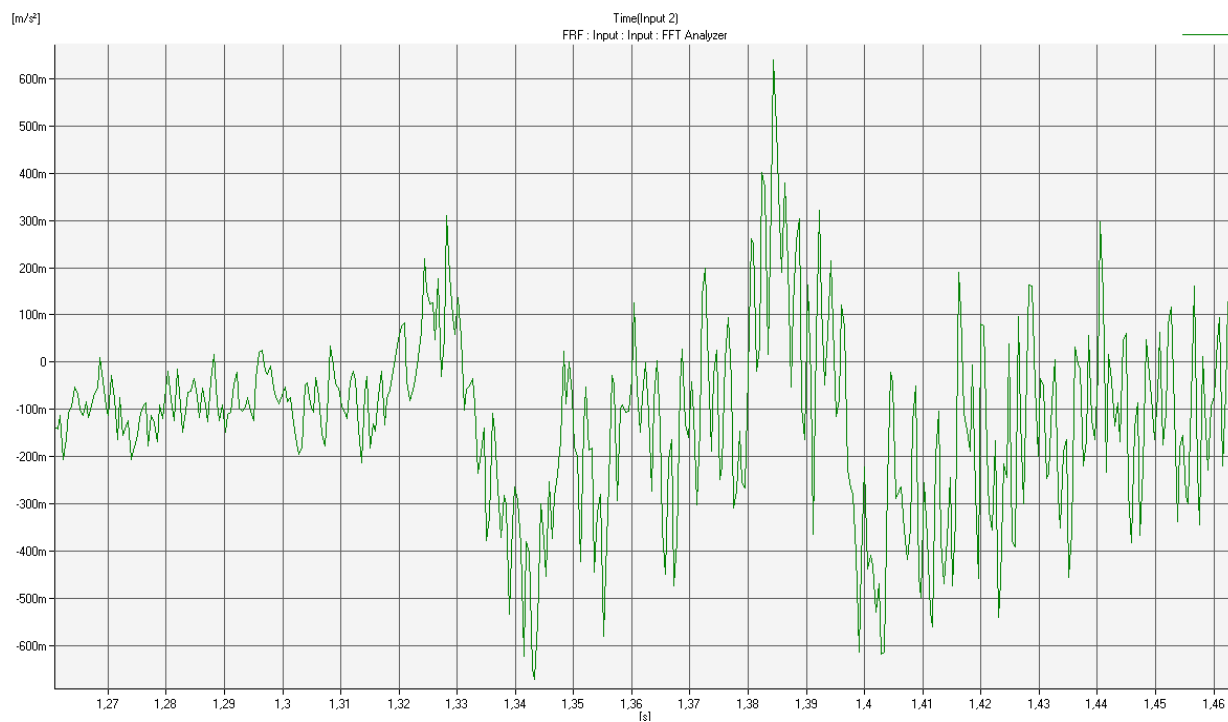
Badania wykonano z wykorzystaniem systemu Pulse firmy Brüel & Kjær®, zawierającego: moduł pomiarowy 3560L, program analizy FFT w 2 kanałach oraz dwa akcelerometry typu 4514. Oprogramowanie wchodzące w skład pakietu jest wymagane do akwizycji danych pomiarowych oraz określania czasowych przebiegów przyspieszeń badanych elementów, gęstości widmowej własnej sygnału pomiarowego przyspieszenia oraz porównawczego, czasowego przebiegu sygnałów przyspieszeń par elementów współdziałających w napędzie odpowiednio kolumn i belki poziomej.

Parametry techniczne sprzętu pomiarowego wykorzystywanego do przeprowadzenia analizy modalnej to:

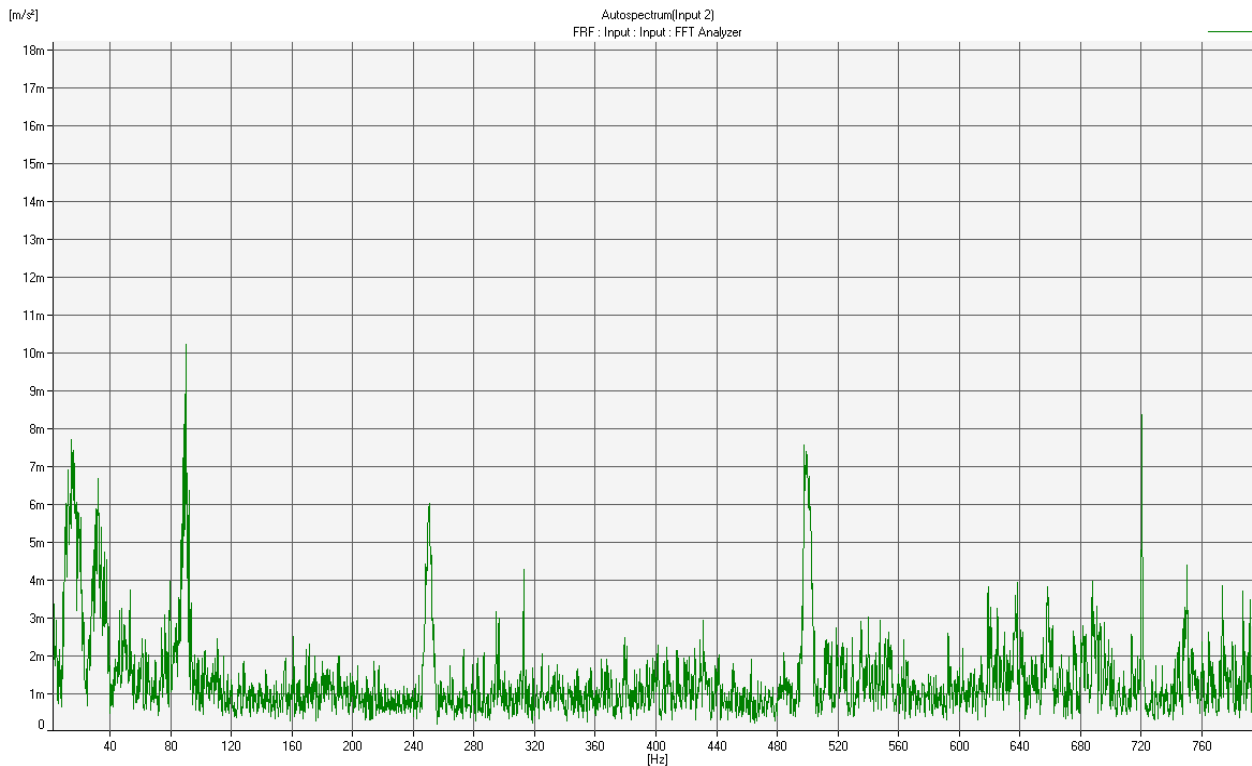
- moduł pomiarowy 3560L Pulse Lite: zakres pomiarowy 7-20000 Hz, 2 kanały pomiarowe oraz 2 kanały tacho,
- dwa akcelerometry 4514: typ piezoelektryczny, czułość 1mV/ms^{-2} , zakres pomiarowy 1-10000 Hz,

4. WYNIKI BADAŃ

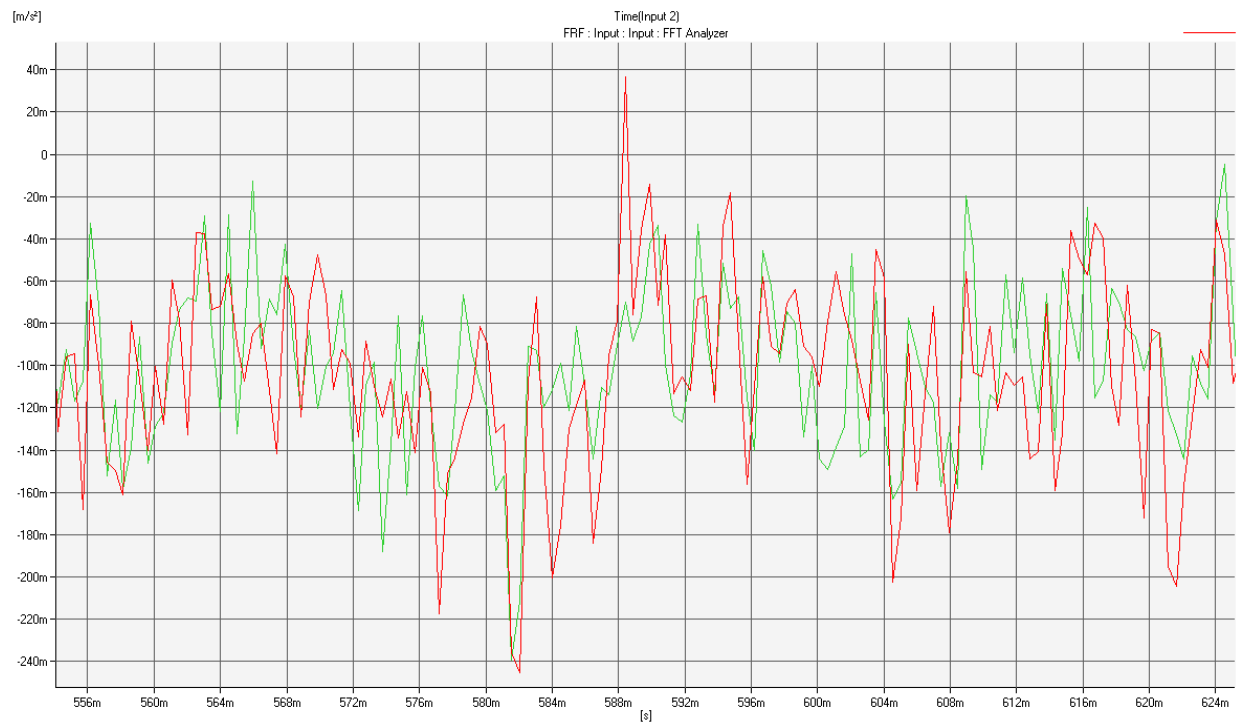
Pomiary dynamiki i synchronizacji napędu kolumn wykonano dla włączania napędu w kierunku wzdłużnym do przodu (w kierunku stołu) i do tyłu (w kierunku przeciwnym do stołu), dla trzech wybranych prędkości kolumn według schematu przedstawionego na rysunku 2. Przykładowe wyniki pomiarów dynamiki i synchronizacji napędu kolumn w kierunku wzdłużnym do przodu przy zadanej prędkości maksymalnej 4m/min zaprezentowano na rysunkach 4, 5 i 6. Natomiast wyniki pomiarów dynamiki i synchronizacji napędu kolumn w kierunku wzdłużnym do tyłu przy zadanej prędkości maksymalnej 4m/min zaprezentowano na rysunkach 7, 8 i 9.



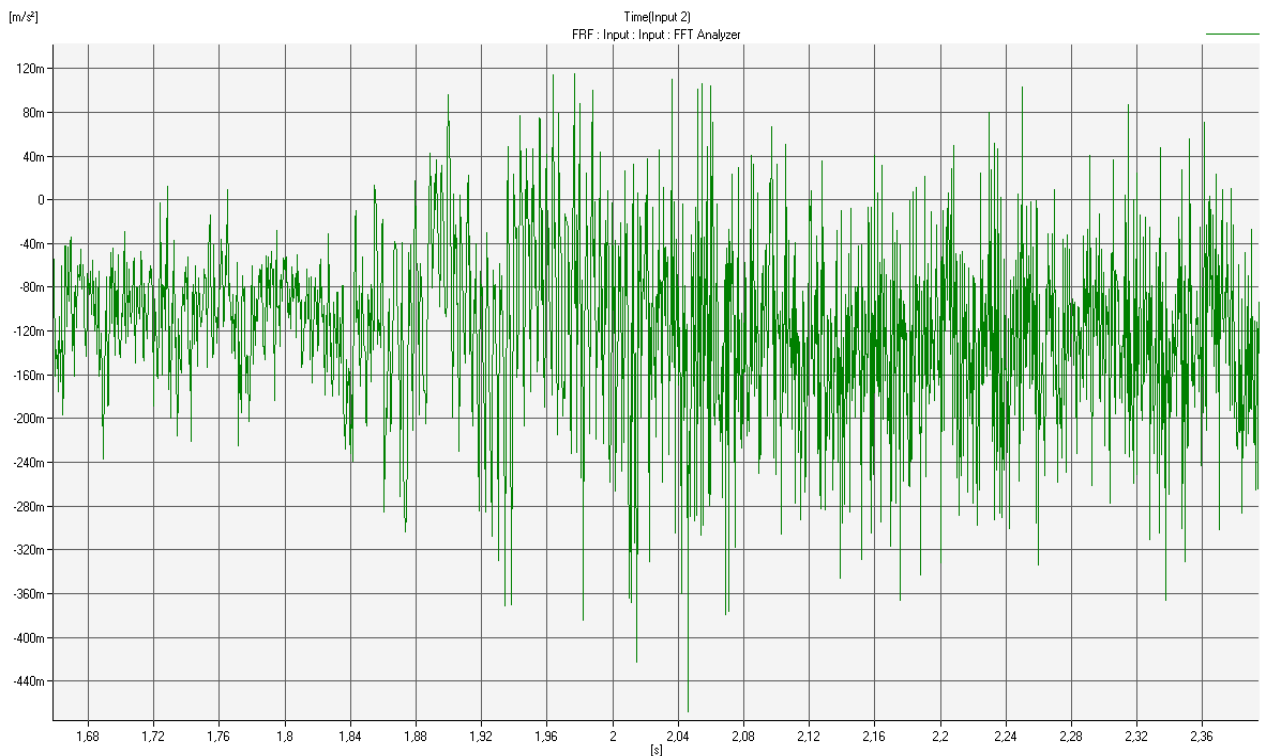
Rys. 4. Charakterystyka amplitudowo-czasowa przebiegu przyspieszenia kolumny napędzanej do przodu
Fig. 4. The attenuation diagram of acceleration vs time of column motion forwards



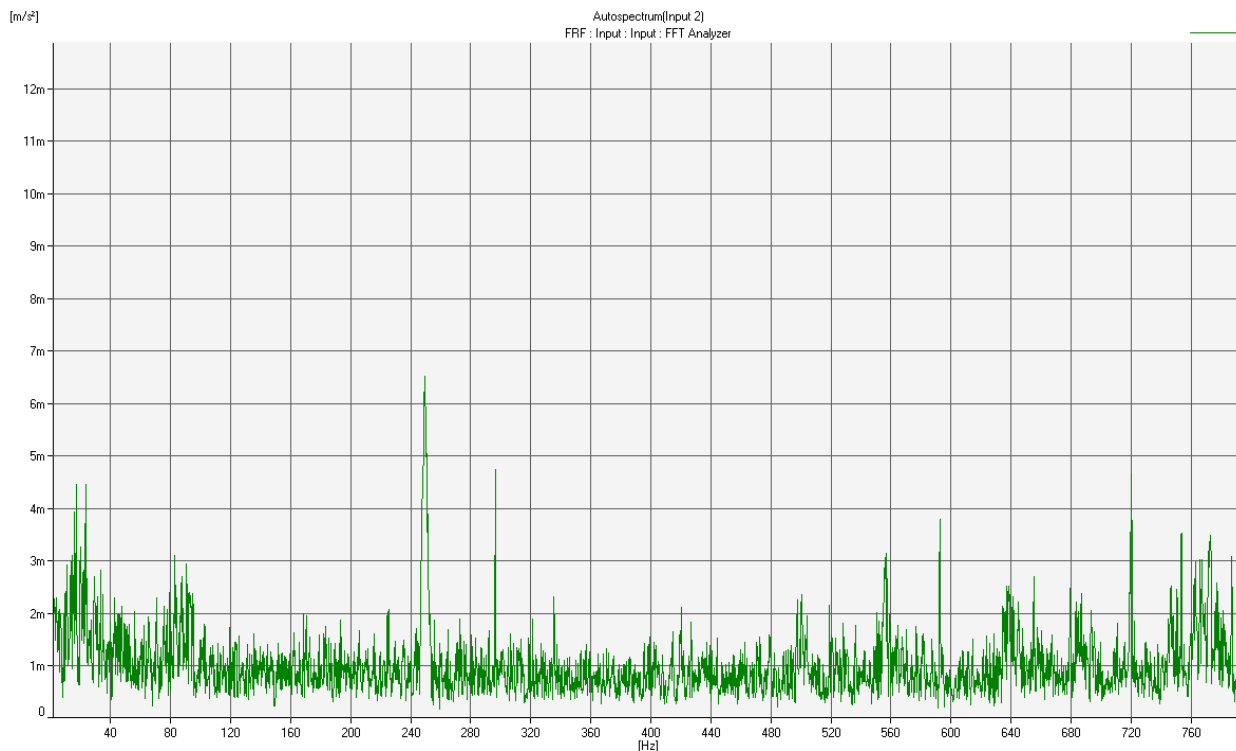
Rys. 5. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przebiegu przyspieszenia kolumny napędzanej do przodu
Fig. 5. The attenuation diagram of acceleration vs frequency of column motion forwards



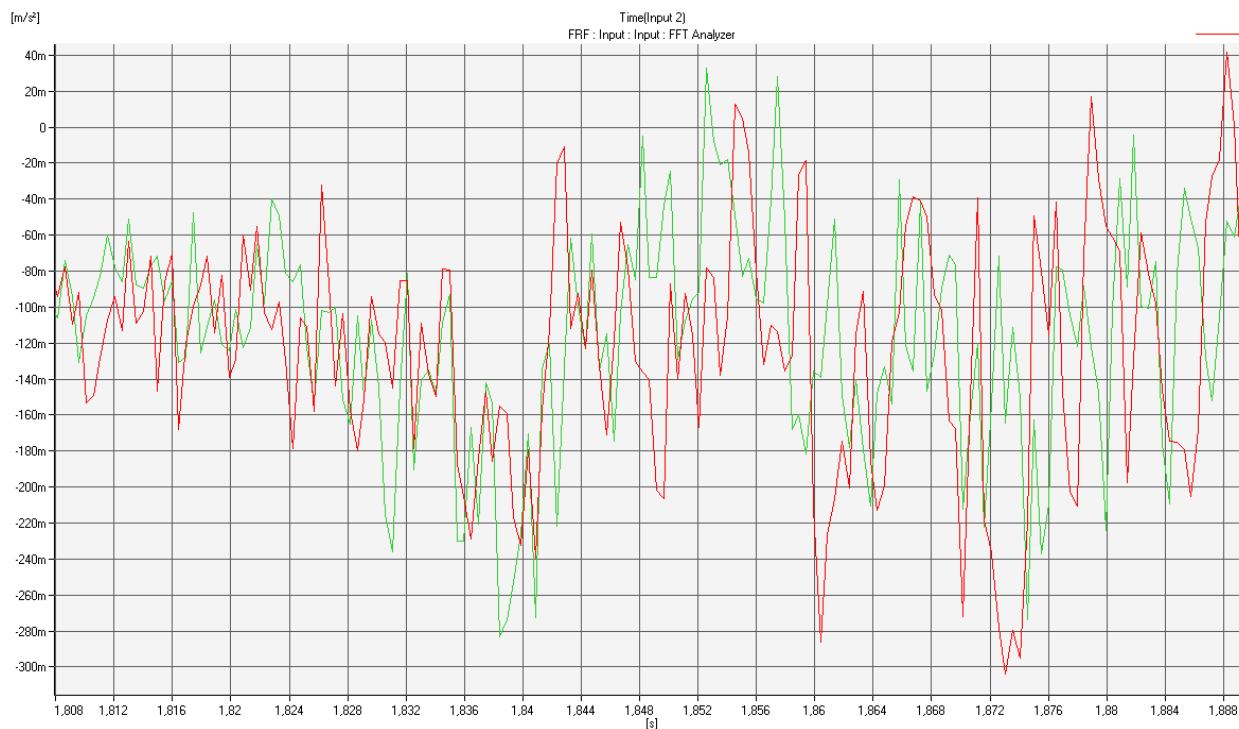
Rys. 6. Jednoczesne charakterystyki amplitudowo-czasowe przyspieszeń kolumn napędzanych do przodu
Fig. 6. Simultaneous attenuation diagram of acceleration vs time of column motion forwards



Rys. 7. Charakterystyka amplitudowo-czasowa przebiegu przyspieszenia kolumny napędzanej do tyłu
Fig. 7. The attenuation diagram of acceleration vs time of column motion backwards

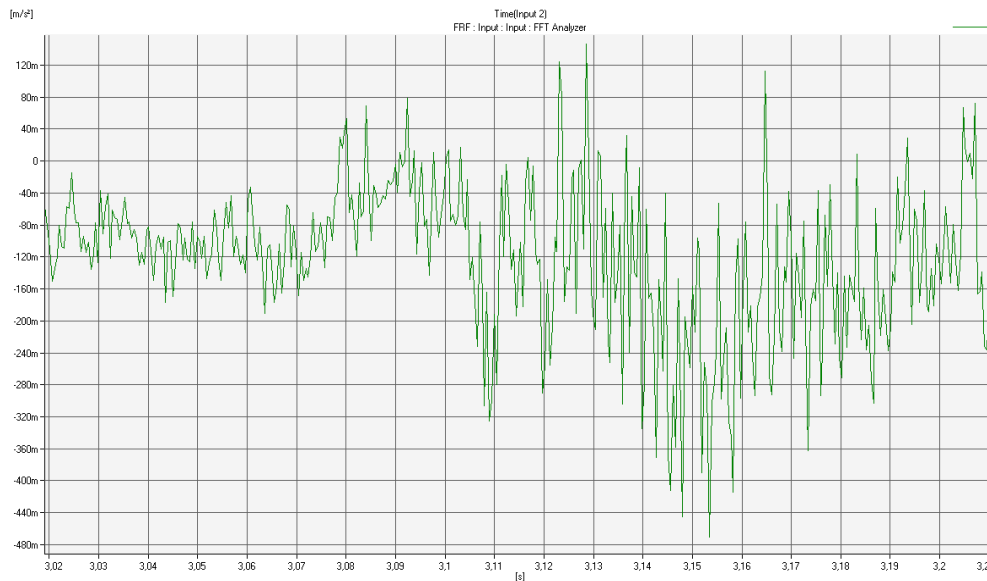


Rys. 8. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przebiegu przyspieszenia kolumny napędzanej do tyłu
Fig. 8. The attenuation diagram of acceleration vs frequency of column motion backwards

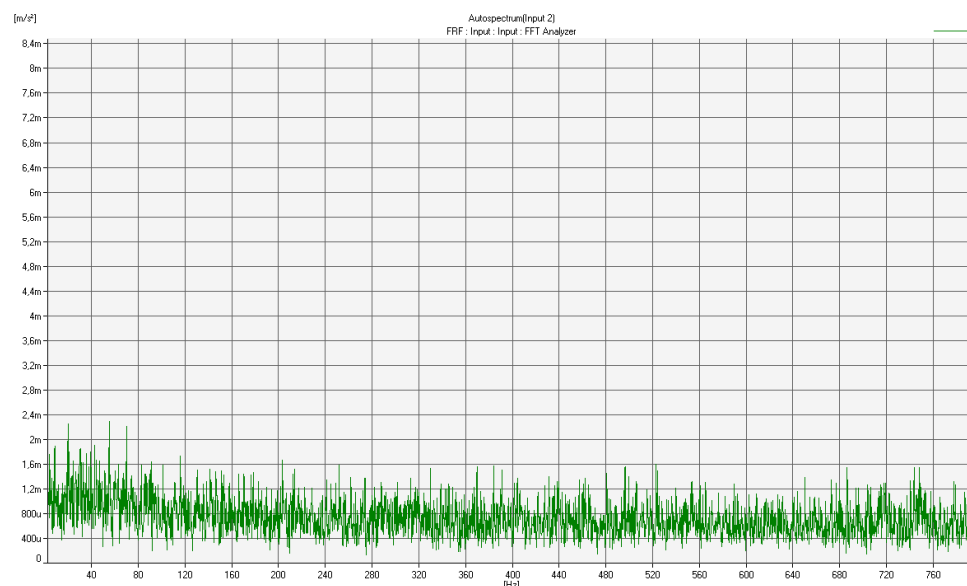


Rys. 9. Jednoczesne charakterystyki amplitudowo-czasowe przyspieszeń kolumn napędzanych do tyłu
Fig. 9. Simultaneous attenuation diagram of acceleration vs time of column motion backwards

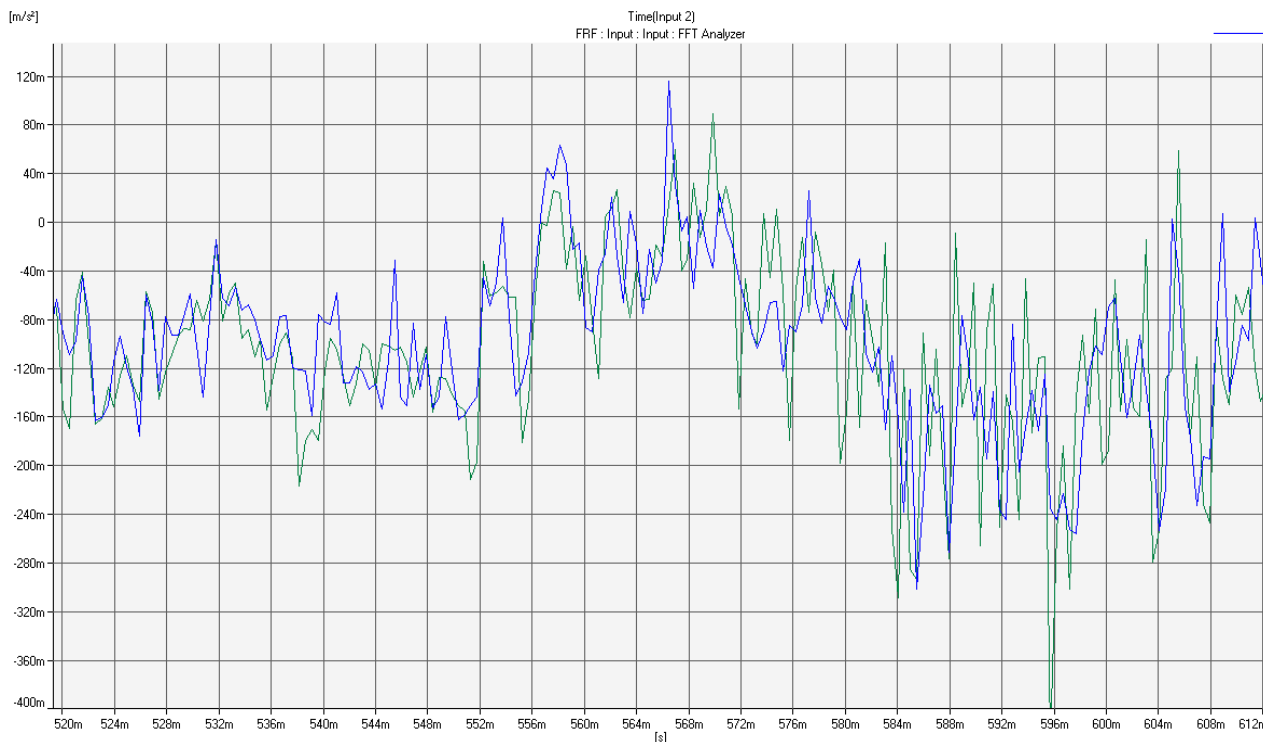
Pomiary dynamiki i synchronizacji napędu belki poziomej wykonano przy włączaniu napędu w kierunku pionowym do góry i do dołu dla trzech wybranych prędkości belki według schematu przedstawionego na rysunku 3. Przykładowe wyniki pomiarów dynamiki i synchronizacji napędu belki poziomej w kierunku pionowym do góry dla zadanej prędkości maksymalnej 4 m/min zaprezentowano na rysunkach 10, 11 i 12. Natomiast przykładowe wyniki pomiarów dynamiki i synchronizacji napędu belki poziomej w kierunku pionowym do dołu dla zadanej prędkości maksymalnej 4 m/min zaprezentowano na rysunkach 13, 14 i 15.



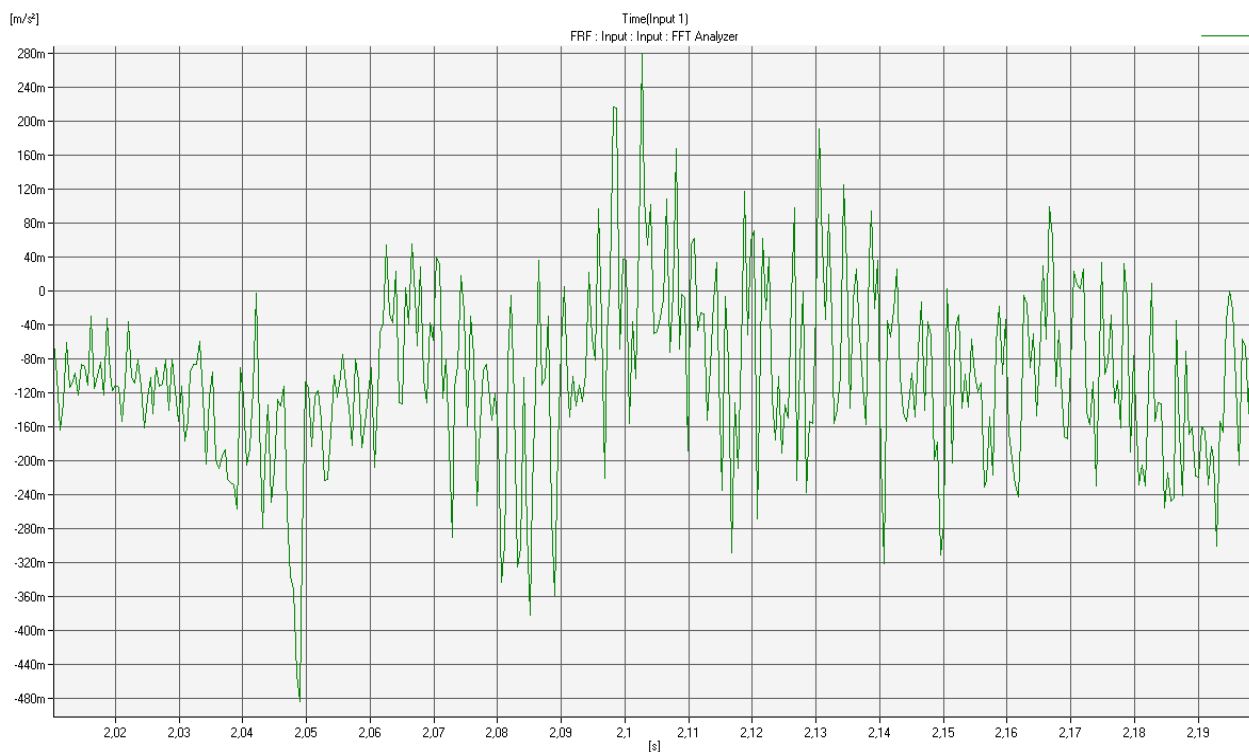
Rys. 10. Charakterystyka amplitudowo-czasowa przebiegu przyspieszenia belki napędzanej do góry
Fig. 10. The attenuation diagram of acceleration vs time of transversal beam motion upward



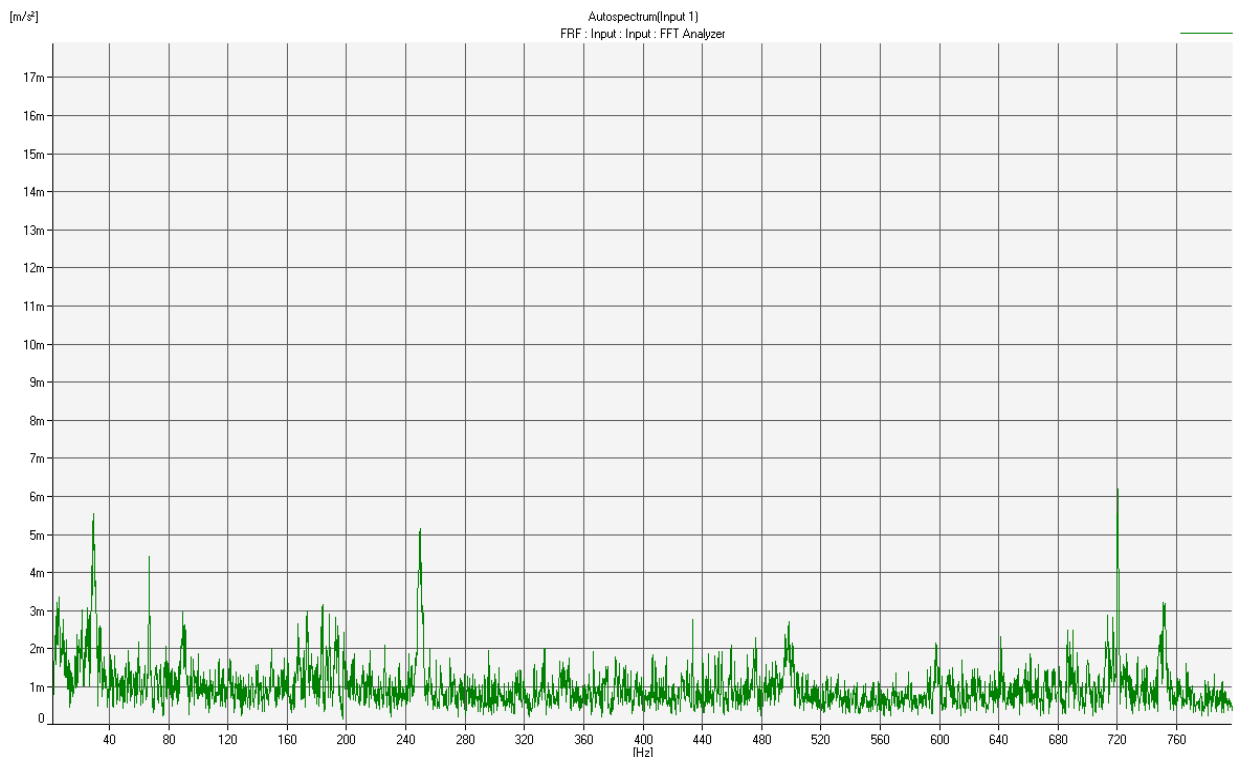
Rys. 11. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przebiegu przyspieszenia belki napędzanej do góry
Fig. 11. The attenuation diagram of acceleration vs frequency of transversal beam motion upward



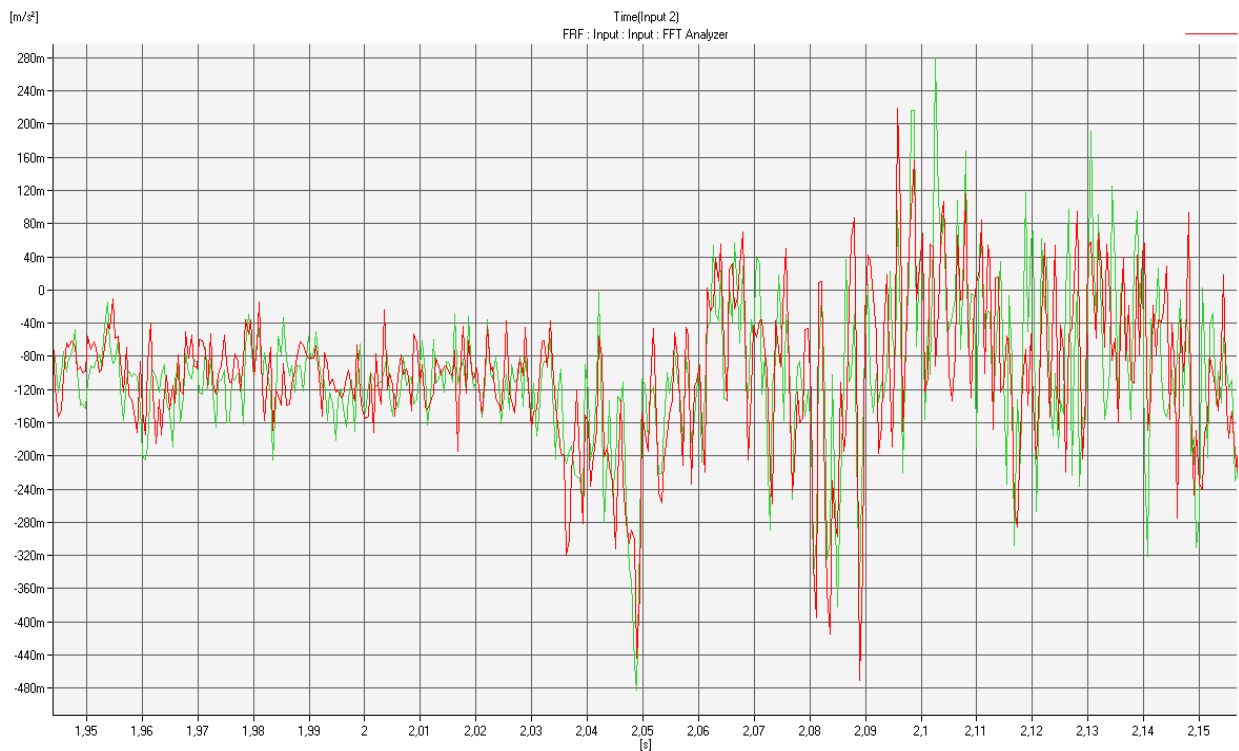
Rys. 12. Jednoczesne charakterystyki amplitudowo-czasowe przyspieszeń belki napędzanej do góry
Fig. 12. Simultaneous attenuation diagram of acceleration vs time of transversal beam motion upward



Rys. 13. Charakterystyka amplitudowo-czasowa przebiegu przyspieszenia belki napędzanej do dołu
Fig. 13. The attenuation diagram of acceleration vs time of transversal beam motion downward



Rys. 14. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przebiegu przyspieszenia belki napędzanej do dołu
Fig. 14. The attenuation diagram of acceleration vs frequency of transversal beam motion downward



Rys. 15. Jednoczesne charakterystyki amplitudowo-czasowe przyspieszeń belki napędzanej do dołu
Fig. 15. Simultaneous attenuation diagram of acceleration vs time of transversal beam motion downward

Na podstawie zmierzonych charakterystyk amplitudowo – częstotliwościowych przebiegów przyspieszenia kolumn, zestawiono w tabeli 1, częstotliwości rezonansowe wzbudzone w strukturze kolumn przy ich napędzie do przodu oraz do tyłu. Kolumny napędzono z prędkością minimalną 0,02 m/min, prędkością pośrednią 2 m/min oraz prędkością maksymalną 4 m/min. Z wykresów charakterystyk amplitudowo-czasowych przyspieszeń kolumn napędzanych do przodu i do tyłu określono ich czasy rozpędzenia dla trzech zadanych prędkości napędów. Określono również różnicę wartości czasu startu dla obu zespołów napędowych kolumn celem oceny ich stopnia synchronizacji..

Tabela 1. Zestawienie wyników analizy dynamiki i synchronizacji napędów kolumn tokarki karuzelowej TCW 3100
Table 1. Test results of the analyse of dynamics and synchronization of the drives of the TCW 3100 vertical lathe's columns

	prędkość zadana v=4 m/min		prędkość zadana v=2 m/min		prędkość zadana v=0,02 m/min	
	do przodu	do tyłu	do przodu	do tyłu	do przodu	do tyłu
czas rozpędzania [s]	0,119	0,155	0,0625	0,056	0,011	0,021
częstotliwości wzbudzone [Hz]	14	17		17		
	26	23	21	21	25	25
	89	82	89		92	96
	250	248	249	249		
	497	516	496	489	492	
	720	719		687	720	
różnica wartości czasu startu [ms]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Tabela 2. Zestawienie wyników analizy dynamiki i synchronizacji napędów belki poziomej tokarki karuzelowej TCW 3100

Table 2. Test results of an analyse of dynamics and synchronization of the drives of the TCW 3100 vertical lathe's transversal beam

	prędkość zadana v=4 m/min		prędkość zadana v=2 m/min		prędkość zadana v=0,02 m/min	
	do góry	do dołu	do góry	do dołu	do góry	do dołu
czas rozpędzania [s]	0,076	0,068	0,034	0,039	0,012	0,013
częstotliwości wzbudzone [Hz]	22	29	28	28	23	
		163	150	160		
	310		313		296	296
	391		400	400		417
	496	498	502	501		
		726	720		725	
różnica wartości czasu startu [ms]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Analogicznie, na podstawie zmierzonych charakterystyk amplitudowo – częstotliwościowych przebiegów przyspieszenia belki, zestawiono w tabeli 2, częstotliwości rezonansowe wzbudzone w strukturze belki przy jej napędzie do góry oraz do dołu. Belkę

napędzono z prędkością minimalną 0,02 m/min, prędkością pośrednią 2 m/min oraz prędkością maksymalną 4 m/min. Z wykresów charakterystyk amplitudowo-czasowych przyspieszeń belki napędzanej do góry i do dołu określono jej czasy rozpędzenia dla trzech zadanych prędkości napędów. Określono również różnicę wartości czasu startu dla obu zespołów napędowych belki celem oceny ich stopnia synchronizacji.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Czas rozpędzania jest najmniejszy w przypadku rozpędzania belki poziomej do najniższej zadanej prędkości, a największy w przypadku rozpędzania kolumn do najwyższej zadanej prędkości. Jest to uzasadnione bezwładnością zespołów napędzanych oraz wartością zadanej prędkości docelowej. Na uwagę zasługuje fakt, że w przypadku napędu belki poziomej nie ma istotnej różnicy, co do czasu rozpędzania napędu w górę i w dół, co świadczy o wysokiej odporności napędu na obciążenie obrabiarki. W żadnej próbie czas rozpędzania nie przekroczył wartości 0,155s, co świadczy o dobrych właściwościach dynamicznych badanych napędów. Jest to jednocześnie dowód na to, że poprawnie został przeprowadzony proces doboru silników w stosunku do bezwładności elementów napędzanych.

Wzbudzone podczas rozruchu częstotliwości pokrywają się z częstotliwościami własnymi elementów tokarki, zidentyfikowanymi podczas badań amplitudowo-częstotliwościowych. To świadczy o poprawnym doborze napędów, nie powoduje wzbudzenia dodatkowych częstotliwości drgań w badanym układzie.

Różnica wartości czasu startu okazała się być wartością bardzo niską. Oszacowanie tej wartości na poziomie poniżej 0,5ms wynikało z faktu, że przyjęta rozdzielczość pomiaru wynosiła 0,488ms, co uniemożliwiło dokładniejsze określenie tej wielkości. Wartość różnicy czasu startu jest niezwykle istotna dla dynamiki pracy napędzanego układu, może to powodować zjawiska wzbudzenia drgań własnych poprzez przekoszenie i wprowadzenie naprężeń w napędzanym układzie. Oszacowana niska wartość 0,5ms świadczy o właściwym sposobie elektrycznego sprzężenia silników napędowych i poprawnym doborze algorytmów zastosowanych w układzie sterowania tymi silnikami.

LITERATURA

- [1] KOSMOL J., 1995, *Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem*, WNT, Warszawa.
- [2] MARCHELEK K., 1988, *Dynamika obrabiarek*, Wyd. II, WNT, Warszawa.
- [3] WROTNY L.T., 1973, *Podstawy konstrukcji obrabiarek*, WNT, Warszawa.
- [4] PN-84/M55265. Obrabiarki do metali. Tokarki karuzelowe sterowane numerycznie. Podstawowe parametry i wymiary przyłączeniowe.
- [5] PN-ISO 2589., 1994. Obrabiarki zespołowe. Zespoły posuwowe wbudowane w stojak.
- [6] PN-ISO 3655., 1994. Warunki odbioru tokarek karuzelowych jednostojakowych i dwustojakowych. Badanie dokładności.
- [7] PN-ISO 230-2., 1999. Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE DRIVES AND THEIR SYNCHRONIZATION
IN THE CNC TWO STANDS VERTICAL LATHE TCW 3100

In the article the experimental research of the dynamics of the drives and their synchronization in the CNC two stands vertical lathe TCW 3100 have been included. This machine-tool is destined to heavy duty machining of composed crankshafts of marine engines. The doubled independent drives of the columns and also transversal beam were tested. The aim of the research was to examine power transmission system e.g. time to achieve full speed and the natural frequencies excited during start and stop phase of motion. The synchronization of the drives was analyzed by comparison the curves of acceleration vs time of the analysed units. The results of tests confirm good dynamics properties of analysed drives as well as correct choice of motors in relation to the displacement inertia of the units driven. The correct way of coupling drive motors and correct choice of algorithms in the control system of those motors were confirmed experimentally in this paper.