

Kazimierz KRÓL<sup>1</sup>  
Krzysztof OLEJARCZYK<sup>2</sup>  
Marcin WIKŁO<sup>3</sup>  
Zbigniew SIEMIĄTKOWSKI<sup>4</sup>  
Krzysztof KOŁODZIEJCZYK<sup>5</sup>

### **INDYWIDUALNOŚĆ DYNAMICZNA UKŁADU GŁOWICA WIERTARSKA – RURA WIERTARSKA – WAŁ PODZAS WIERCENIA GŁĘBOKICH OTWORÓW**

Proces wiercenia głębokich otworów charakteryzuje się, z dynamicznego punktu widzenia, szerokim zakresem zmienności sztywności układu rura wiertarska – głowica wiertarska – element obrabiany i szerokim zakresem zmiany masy elementu obrabianego. Powoduje to zmiany, w procesie wiercenia głębokich otworów, indywidualności dynamicznej wyrażonej w częstotliwościach drgań własnych podstawowych i pobocznych. Zmiany takie uniemożliwiają skuteczne działanie dynamicznych eliminatorów drgań. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analiz modalnych układu głowica wiertarska – rura wiertarska – wał oraz analiz modalnych wymienionych elementów składowych tego układu. Uwzględniono zmianę odległości podpór układu podczas wiercenia, zmianę masy i sztywności wierconego wału. Wykonane w niniejszej pracy analizy numeryczne stanowią wstępną ocenę do opracowania nowych sposobów tłumienia drgań podczas wiercenia głębokich otworów.

### **INDIVIDUALITY DYNAMIC SYSTEM DRILLING HEAD – PIPE DRILLING – SHAFT DURING DRILLING DEEP HOLE**

The deep hole drilling process is characterized from a dynamic point of view, a wide range of variation of the stiffness of the pipe drilling - drilling head - the element and a wide range change of the element mass. This causes a change in the process of deep holes drilling, dynamic individuality expressed in primary and secondary frequency of vibrations. This paper presents the results of modal analysis of the drilling head - Drill pipe - shaft and modal analysis mentioned components of the system. Takes into account the change of distance support system during drilling, change in weight and stiffness of the drill shaft. Such modifications prevent the effective effect the dynamic vibration eliminators. Identifiable cause intensified vibration and proposes ways to reduce them. Performed in the present work numerical analysis are an initial assessment to develop ways to damp vibrations during deep holes drilling.

## **1. WSTĘP**

Proces wiercenia głębokich otworów, tzn. takich, których głębokość przekracza 10-krotnie średnicę, w stali dostarcza wielu problemów. Wśród nich są wzmożone drgania w początkowym i końcowym okresie wiercenia oraz zmienna w szerokim zakresie i niedostatecznie wysoka sztywność rury wiertarskiej z głowicą.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analiz modalnych układu głowica wiertarska – rura wiertarska – wał oraz analiz modalnych wymienionych elementów składowych tego układu. Uwzględniono zmianę odległości podpór układu podczas wiercenia, zmianę masy i sztywności wierconego wału o długości 1270[mm] i średnicy zewnętrznej 145[mm]. Średnica wierconego otworu 76,2[mm]. Analizy modalne będą wykorzystane do ustalenia przyczyny wzmożonych drgań oraz do opracowania sposobów ich zmniejszenia.

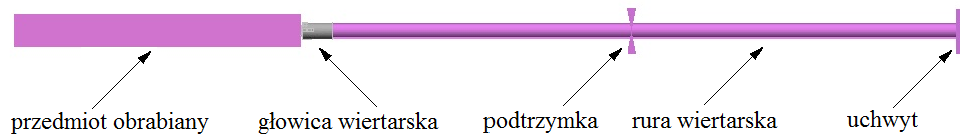
<sup>1</sup> Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny; Instytut Mechaniki Stosowanej i Energetyki, 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54. Tel: + 48 48 361-71-16, k.krol@uthrad.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny; Instytut Mechaniki Stosowanej i Energetyki, 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54. Tel: + 48 48 361-71-16, k.olejarczyk@uthrad.pl

<sup>3</sup> Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny; Instytut Mechaniki Stosowanej i Energetyki, 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54. Tel: + 48 48 361-71-16, m.wiklo@uthrad.pl

<sup>4</sup> Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54, tel: + 48 48 361-76-17 e-mail: z.siemiatkowski@uthrad.pl

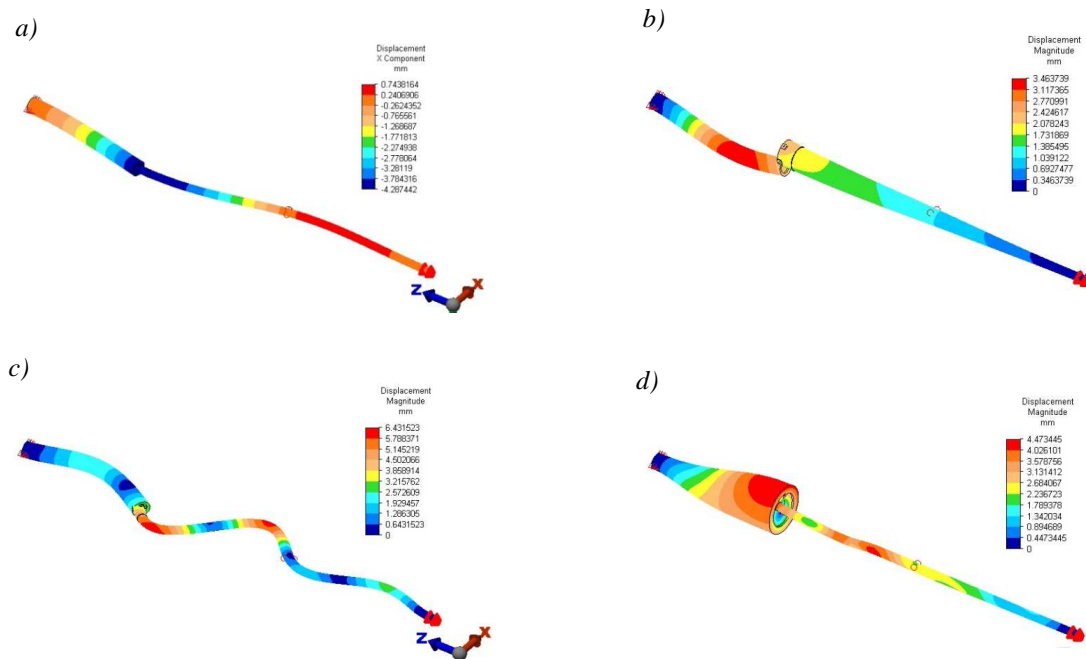
<sup>5</sup> Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny; Instytut Mechaniki Stosowanej i Energetyki, 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54. Tel: + 48 48 361-71-16, k.kolodziejczyk@uthrad.pl



Rys. 1. Układ do wiercenia głębokich otworów

## 2. CZĘSTOTLIWOŚCI DRGAŃ WŁASNYCH I POSTACI DRGAŃ UKŁADU PRZEDMIOT OBRABIANY – GŁOWICA WIERTARSKA – RURA WIERTARSKA

Wyznaczono za pomocą metody elementów skończonych częstotliwości drgań własnych układu składającego się z przedmiotu obrabianego o zmiennej głębokości otworu i zmiennej masie, głowicy wiertarskiej i rury wiertarskiej ze zmiennym względem tej ostatniej położeniem podtrzymki. Wyniki zamieszczono w tabeli 1 i na rysunku 2.



Rys. 2. Pierwsza – a) giętna w płaszczyźnie  $xz$  z częstotliwością 53,7Hz; szósta b) giętna przedmiotu obrabianego sprzężona ze skrętną rurą wiertarską z częstotliwością 203,1Hz; ósma c) giętna w płaszczyźnie  $xz$  z częstotliwością 321,7Hz i czternasta d) skrętna przedmiotu obrabianego sprzężona z giętną rurą wiertarską z częstotliwością 633,4Hz postaci drgań układu przedmiot obrabiany – głowica wiertarska – rura wiertarska w początkowej fazie wiercenia

Wyniki podane w tabeli 1 pozwalają stwierdzić, że w procesie wiercenia głębokich otworów następuje zmiana częstotliwości własnych i postaci drgań. Na przykład podstawowa częstotliwość własna układu przedmiot obrabiany – głowica wiertarska – rura wiertarska:

- na początku wiercenia wynosi 53,7[Hz] - drgania giętne układu w płaszczyźnie „xz”;
- w połowie głębokości wiercenia 54,4[Hz] - drgania giętne rury wiertarskiej z głowicą w płaszczyźnie „yz”;
- w końcu wiercenia 36,1[Hz] - drgania giętne rury wiertarskiej z głowicą w płaszczyźnie „yz”.

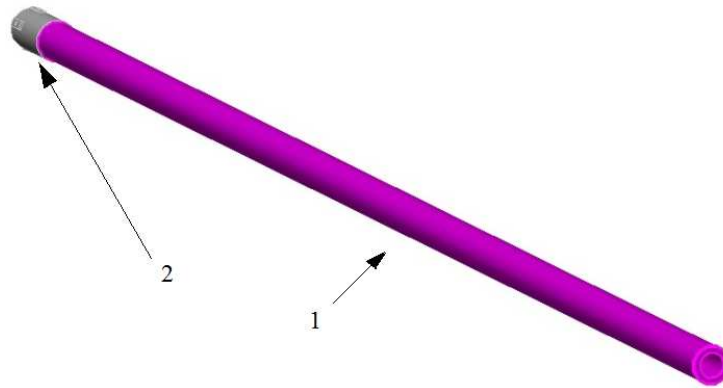
Podobne różnice występują przy wyższych częstotliwościach i postaciach własnych na początku, w środku i na końcu wiercenia. Wśród otrzymanych 16 podstawowych częstotliwości własnych dominują drgania giętne. Drgania skrętne zaczynają się pojawiać przy częstotliwościach powyżej 200[Hz]. Podstawowe częstotliwości własne są kilkakrotnie wyższe od częstotliwości wymuszenia wynoszącej 6[Hz] oraz 24[Hz] (cztery krawędzie tnące i prowadząca na obwodzie głowicy).

Tab. 1. Częstotliwości własne i postaci drgań układu przedmiot obrabiany – głowica wiertarska – rura wiertarska do głębokich otworów w początkowej, środkowej i końcowej fazie wiercenia

Lp.	Początkowa faza wiercenia	Środkowa faza wiercenia	Końcowa faza wiercenia
1.	53,7[Hz]; giętne układu w płaszczyźnie „xz”	54,4[Hz]; giętne rury wiertarskiej z głowicą w pł. „yz”	36,1[Hz]; giętne rury wiertarskiej z głowicą w pł. „yz”
2.	92,5[Hz]; giętne rury wiertarskiej z głowicą w pł. „yz”	55,8[Hz]; giętne układu w pł. „xz”	40[Hz]; giętne rury wiertarskiej z głowicą w pł. „xz”
3.	106,6[Hz]; giętne rury wiertarskiej z głowicą w pł. „xz”	72,5[Hz]; giętne układu w pł. „xz”	56,2[Hz]; giętne przedmiotu obrabianego w pł. „yz”
4.	160,7[Hz]; giętne rury wiertarskiej z głowicą w pł. „yz”	132[Hz]; giętne przedmiotu obrabianego sprzężone ze skrętnymi rury wiertarskiej i głowicy	58,1[Hz]; giętne przedmiotu obrabianego w pł. „xz”
5.	164,7[Hz]; giętne rury wiertarskiej z głowicą w pł. „xz”	174,7[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „yz”	114[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „yz”
6.	203,1[Hz]; skrętne rury wiertarskiej z głowicą sprzężona z giętnymi przedmiotu obrabianego w pł. „yz”	184,3[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „xz”	120[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „xz”
7.	312,1[Hz]; giętno-skrętne rury wiertarskiej z głowicą	327,5[Hz]; giętno-skrętne rury wiertarskiej i głowicy sprzężone z giętnymi przedmiotu obrabianego	233,1[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „yz”
8.	321,7[Hz]; giętne układu w płaszczyźnie „xz”	349,8[Hz]; giętne układu w płaszczyźnie „xz”	242,9[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „xz”
9.	353,4[Hz]; giętno-skrętne rury wiertarskiej z głowicą sprzężona z giętnymi przedmiotu obrabianego w pł. „yz”	364,8[Hz]; skrętno-giętne rury wiertarskiej i głowicy sprzężone z giętnymi przedmiotu obrabianego	352,6[Hz]; skrętno-giętne rury wiertarskiej i głowicy
10.	377,5[Hz]; giętne układu w płaszczyźnie „xz”	381,8[Hz]; giętne układu w płaszczyźnie „xz”	367,9[Hz]; skrętno-giętne rury wiertarskiej i głowicy sprzężone z giętnymi przedmiotu obrabianego
11.	450[Hz]; giętno-skrętne rury wiertarskiej z głowicą sprzężona z giętnymi przedmiotu obrabianego w pł. „yz”	447,6[Hz]; giętne układu w płaszczyźnie „yz”	370[Hz]; giętne przestrzenne rury wiertarskiej i głowicy oraz giętne przedmiotu obrabianego
12.	458,7[Hz]; giętne układu w płaszczyźnie „xz”	461,4[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „xz”	406,3[Hz]; giętne rury wiertarskiej i głowicy w pł. „xz”
13.	499,2[Hz]; giętno-skrętne układu	475,9[Hz]; skrętno-giętne rury wiertarskiej i głowicy sprzężone z giętnymi przedmiotu obrabianego	414,8[Hz]; skrętno-giętne rury wiertarskiej i głowicy
14.	633,4[Hz]; skrętne przedmiotu obrabianego sprzężone z wzdłużno-giętnymi rury wiertarskiej z głowicą	630,5[Hz]; skrętne przedmiotu obrabianego sprzężone z wzdłużno-giętnymi rury wiertarskiej z głowicą	596,4[Hz]; skrętno-giętne rury wiertarskiej i głowicy
15.	662[Hz]; skrętne przedmiotu obrabianego sprzężone ze skrętno-giętnymi rury wiertarskiej i głowicy	645,8[Hz]; giętne przestrzenne rury wiertarskiej i głowicy	601,9[Hz]; skrętno-giętne rury wiertarskiej i głowicy
16.	702,2[Hz]; giętno-skrętne rury wiertarskiej z głowicą	657[Hz]; skrętne przedm. obr. sprzężone ze skrętno-giętnymi rury wiertarskiej z głowicą	603,7[Hz]; skrętne przedm. obr. sprzężone z giętnymi rury wiertarskiej i głowicy

### 3. ANALIZA MODALNA RURY WIERTARSKIEJ Z GŁOWICĄ ORAZ GŁOWICY

Analiza modalna rury wiertarskiej z głowicą oraz oddzielnie głowicy ma na celu wyznaczenie indywidualności dynamicznej układu i narzędzia wyrażonej w częstotliwościach drgań własnych i ich postaciach. Na takiej podstawie można ustalić jakiego rodzaju drgania są istotne podczas procesu wiercenia (wymuszone okresowym łamaniem wióra, parametryczne spowodowane okresowo zmienną sztywnością głowicy lub zmianą sztywności giętej rury, lub samowzбудne spowodowane zmianą współczynnika tarcia między narzędziem i przedmiotem) i jakiego typu wzbudzenia drgań występują (parametryczne, cierne lub siłowo-momentowe).



**Rys. 3.** Rura wiertarska (1) z głowicą wiertarską (2) do wykonywania głębokich otworów (rura wiertarska o długości  $l_p=3500[\text{mm}]$ , masie  $m_p=56,291[\text{kg}]$  oraz masowym momencie bezwładności względem osi obrotu  $J_p=46,6 \cdot 10^{-3}[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ; głowica wiertarska o masie  $m_{GW}=2,114[\text{kg}]$  i masowym momencie bezwładności względem osi obrotu  $J_{GW}=1,9 \cdot 10^{-3}[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ )

Średnice zewnętrzna i wewnętrzna rury wiertarskiej

$$D_{zp}=68[\text{mm}]; d_{wp}=44,7063[\text{mm}].$$

Geometryczny biegunowy moment bezwładności przekroju poprzecznego rury wiertarskiej

$$J_{sp}=\pi \cdot (68^4 - 44,7063^4) / 32 = 1\,706\,941[\text{mm}^4].$$

Sztywność skrętna rury wiertarskiej gdy  $l=3500[\text{mm}]$

$$c_{sp,3500}=G \cdot J_{sp} / l = 76923 \cdot 1\,706\,941 / 3500 = 37,514 \cdot 10^6[\text{Nmm/rad}].$$

Przy założeniu podstawowej częstości drgań skrętnych rury wiertarskiej z głowicą  $\omega_b$  jako układu ciągoty-dyskretnej utwierdzonego na końcu rury wiertarskiej (rura wiertarska – element ciągły, głowica - element dyskretny) otrzymamy

$$\omega_b = (c_{sp} / J)^{0,5} = (37514,3 / 17,43 \cdot 10^{-3})^{0,5} = 1467[\text{rad/s}] = 233,5[\text{Hz}];$$

$$J = J_{GW} + J_p / 3 = 1,9 \cdot 10^{-3} + 46,6 \cdot 10^{-3} / 3 = 17,43 \cdot 10^{-3}[\text{kg} \cdot \text{m}^2];$$

$J$  – zredukowany do głowicy masowy moment bezwładności układu rura -głowica.

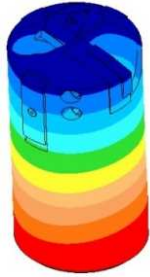
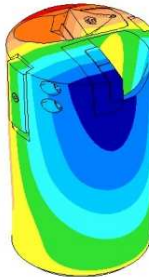
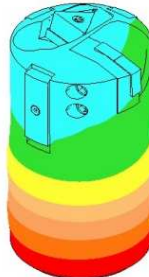

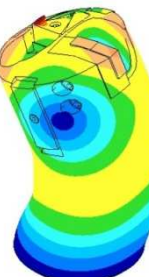
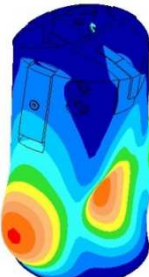
Podstawowe częstotliwości drgań giętych rury wiertarskiej z głowicą utwierdzonej na końcu rury i podpartych w odległości 2000[mm] od czoła głowicy są następujące: 10,2[Hz]; 67,8[Hz]; 145,6[Hz]; 213,1[Hz]. W szczegółowej analizie występują obok wymienionych częstotliwości pierwszej, trzeciej i czwartej różniące się mniej niż 1% od nich częstotliwości. Taka bliskość częstotliwości giętych spowodowana jest okresową zmianą sztywności głowicy podczas obracania się i świadczy o możliwości występowania drgań parametrycznych.

Przy takim sposobie zamocowania i podparcia podstawowa częstość drgań giętych rury z głowicą jest bliska dwukrotnej częstości wymuszenia wynoszącej 6[Hz]. Cztery najniższe częstotliwości drgań giętych rury z głowicą „wyprzedzają” pierwszą częstotliwość drgań skrętnych.

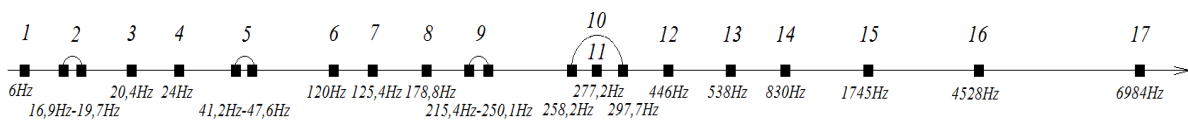
W tabeli 2 zamieszczone są podstawowe częstotliwości drgań własnych głowicy w przypadku zamrożenia punktów na krawędzi styku z rurą wiertarską.

Z przedstawionych w tabeli 2 rezultatów wynika, że częstości drgań własnych głowicy są kilkaset razy wyższe od częstości wymuszenia. Częstość wymuszenia przy prędkości 80[m/min] i średnicy 76[mm] wynosi 6[Hz].

Tab. 2. Sześć podstawowych częstotliwości i postaci drgań głowicy wiertarskiej

1745[Hz]	4527,8[Hz]	6016,5[Hz]
		
Drgania giętne	Drgania skrętne	Drgania wzdłużne (ściskanie-rozciąganie)
6983,6[Hz]	7275,1[Hz]	9636,4[Hz]
		
Drgania giętne	Drgania giętne	Zapadanie się i uwypuklanie dolnej powłoki

#### 4. CZĘSTOTLIWOŚĆ WYMUSZENIA I CZĘSTOTLIWOŚCI WŁASNE UKŁADU DRGAJĄCEGO: WIERCONY WAŁ – GŁOWICA WIERTARSKA Z RURĄ WIERTARSKĄ DO WIERCENIA GŁĘBOKICH OTWORÓW



Rys. 4. Zestawienie częstotliwości wymuszenia i częstotliwości własnych układu drgającego: wiercony wał - głowica wiertarska z rurą wiertarską do wiercenia głębokich otworów

- 1 – podstawowa częstość wymuszenia – obroty głowicy wiertarskiej  $n=360[\text{obr}/\text{min}]=6\text{Hz}$ ,
- 2 – zakres zmian częstotliwości drgań giętnych pionowych wierconego wału  $\phi 145 \times 1270\text{mm}$ : 16,9 Hz - wał pełny; 17,1 Hz - wał przewiercony na głębokość 50mm; 19,7 Hz - przewiercony na głębokość 1270mm,
- 3 – pierwsza częstotliwość drgań własnych giętnych rury wiertarskiej o długości 3500mm zamocowanej na długość 760mm (prawy koniec) i podpartej w odległości 1315mm od lewego końca,
- 4 – wielokrotność częstotliwości wymuszenia wynikająca z liczby ostrzy na głowicy wiertarskiej
- 5 – zakres zmian częstotliwości drgań własnych giętnych poziomych wierconego wału  $\phi 145 \times 1270\text{mm}$ :
- 6 – średnia częstotliwość łamania wióra podczas wiercenia wału,

- 7 – druga częstotliwość drgań własnych giętnych rury wiertarskiej,
- 8 – trzecia częstotliwość drgań własnych giętnych rury wiertarskiej,
- 9 – zakres zmian drugiej częstotliwości drgań giętnych pionowych wierzonego wału  $\phi 145 \times 1270$ mm:
- 10 – zakres zmian drugiej częstotliwości drgań giętnych poziomych wierzonego wału  $\phi 145 \times 1270$ mm:
- 11 – częstotliwości drgań własnych skrętnych rury wiertarskiej z głowicą wiertarską,
- 12 – częstotliwości drgań wzdłużnych rury wiertarskiej z głowicą wiertarską,
- 13 – częstotliwości drgań skrętnych wału wierzonego  $\phi 145 \times 1270$ mm,
- 14 – druga częstotliwość drgań skrętnych rury z głowicą,
- 15, 16, 17 – częstotliwości drgań własnych głowicy wiertarskiej.

Częstotliwości drgań własnych wału wierzonego dla kilku stanów różniących się głębokością wywierzonego otworu – wyniki analiz modalnych

	wał pełny nie wiercony	wał przewiercony na głębokość 5 cm	wał przewiercony na 1/2 głębokości	wał nie przewiercony na 5cm głębokości	wał przewiercony na całej głębokości
<b>częstotliwości drgań pionowych</b>	16,88Hz; 223,2Hz	17,1Hz; 226,9Hz	19,4Hz; 235,5Hz	19,7Hz; 250,1Hz	19,36Hz; 249,95Hz
<b>częstotliwości drgań poziomych</b>	41,2Hz; 266,8Hz	41,9Hz; 271,1Hz	47,6Hz; 281,6Hz	46,9Hz; 297,7Hz	46,26Hz; 296,54Hz

## 5. WNIOSKI

1. Proces wiercenia głębokich otworów w stali dostarcza wielu problemów, wśród których są wzmożone drgania w początkowym i końcowym okresie wiercenia doprowadzające do pogorszenia stanu obrabianej powierzchni.
2. Podstawowe częstości drgań giętnych rury wiertarskiej z głowicą zamocowanych na końcu rury i podpartych w odległości 2000[mm] od czoła głowicy są bliskie dwukrotnej częstości wymuszenia wynoszącej 6[Hz]. Osiem pierwszych częstości drgań giętnych rury z głowicą „wyprzedzają” pierwszą częstość drgań skrętnych.
3. Z przedstawionych w tabeli 2 rezultatów wynika, że częstości drgań własnych głowicy są kilkaset razy wyższe od częstości wymuszenia. Częstość wymuszenia przy prędkości 80[m/min] i średnicy 76[mm] wynosi 6[Hz].
4. Podstawowe częstości drgań własnych głowicy są ponad siedmiokrotnie wyższe od częstości drgań całego narzędzia składającego się z rury i głowicy.
5. Należy zwrócić uwagę na bliskość częstości giętnych (pierwszej i drugiej, piątej i szóstej, siódmej i ósmej) spowodowanych okresową zmianą sztywności giętej podczas obracania się głowicy. Takie wyniki świadczą o możliwości występowania drgań parametrycznych.
6. Proces wiercenia głębokich otworów charakteryzuje się, z dynamicznego punktu widzenia, szerokim zakresem zmienności sztywności układu rura wiertarska – głowica wiertarska – element obrabiany i szerokim zakresem zmiany masy elementu obrabianego. Powoduje to zmiany, w procesie wiercenia głębokich otworów, indywidualności dynamicznej wyrażonej w częstotliwościach drgań własnych podstawowych i pobocznych. Zmiany takie uniemożliwiają skuteczne działanie dynamicznych eliminatorów drgań.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Procznost, ustojczivost, kolebanija*. Spravocznik v 3 tomach. Tom3. Pod red. I.A.Birgera i Ja.G.Panovko. Maszynostrojenije, Moskwa, 1968. s.567.
- [2] *Narzędzia skrawające. Wiercenie głębokich otworów*. Katalog produktów i poradnik zastosowania SANDVIK Coromant.