

## ZINTEGROWANY MODEL OBWODOWO-POLOWY UKŁADU WIRUJĄCYCH TALERZY DYSKU TWARDEGO W ŚRODOWISKU SIMULINK/FEMLAB

WOJCIECH ZYZIK  
MATEUSZ ZDZIEBLIK

*absolwenci Wydziału Elektrycznego, Zakładu Mechatronika IETiP, Politechnika Śląska*

ZBIGNIEW PILCH  
TOMASZ TRAWIŃSKI

*Wydział Elektryczny, Zakład Mechatroniki IETiP, Politechnika Śląska*

Streszczenie. W artykule przedstawiono zintegrowany model obwodowo-polowy układu wrzecionowego dysku twardego. Model łożyskowania, wirnika, stojana oraz talerzy zamodelowano z wykorzystaniem metody elementów skończonych w środowisku MATLAB-FEMLAB®. Model silnika wrzecionowego w postaci obwodowej zaimplementowano w środowisku MATLAB-SIMULINK.

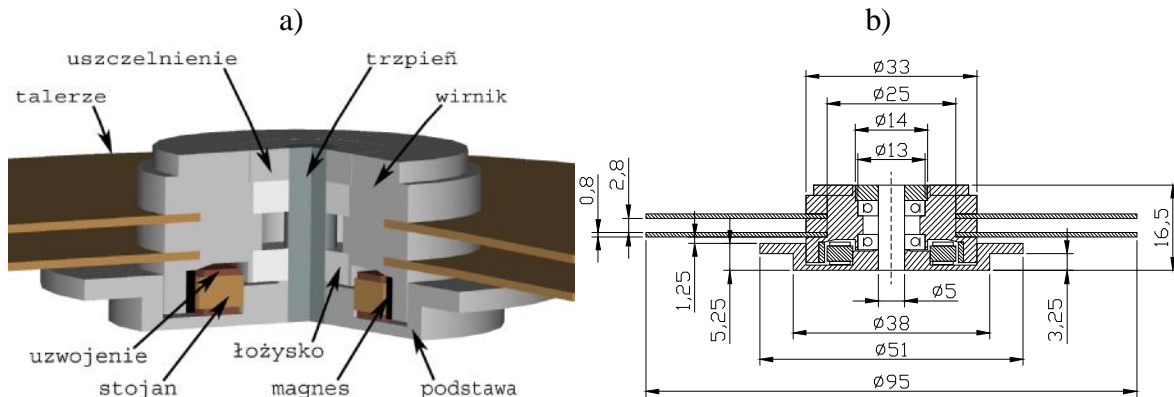
### 1. WSTĘP

Od inżynierów konstruujących dyski twarde wymaga się tworzenia urządzeń o jak największych pojemnościach, jak najwyższych prędkościach zapisu/odczytu informacji, jak najkrótszym czasie dostępu do informacji, nieulegających awariom, jak również coraz częściej o możliwie niewielkich rozmiarach i minimalnym poborze energii w celu stosowania ich w urządzeniach przenośnych. Zwiększenie pojemności dysków uzyskuje się poprzez wzrost powierzchniowej gęstości zapisu danych (aktualny rekord to 138 Gb/in<sup>2</sup>). Wymaga to ograniczenia drgań systemu wrzecionowego przenoszonych na talerze, co można osiągnąć przez stosowanie ceramicznych łożysk tocznych [5] lub łożyskowania hydrodynamicznego. Natomiast w obrębie aktuatora głowic stosuje się układ podwójnego aktuatora głowic (dodatkowy przegub na styku E-bloku i układu zawieszenia głowic o napędzie piezoceramicznym). Tendencje rozwojowe obserwowane w konstrukcjach dysków twardych wymagają tworzenia modeli obliczeniowych dających możliwość analizy zjawisk towarzyszących pracy dysku twardego.

### 2. MODEL GEOMETRYCZNY SYSTEMU WRZECIONOWEGO HDD

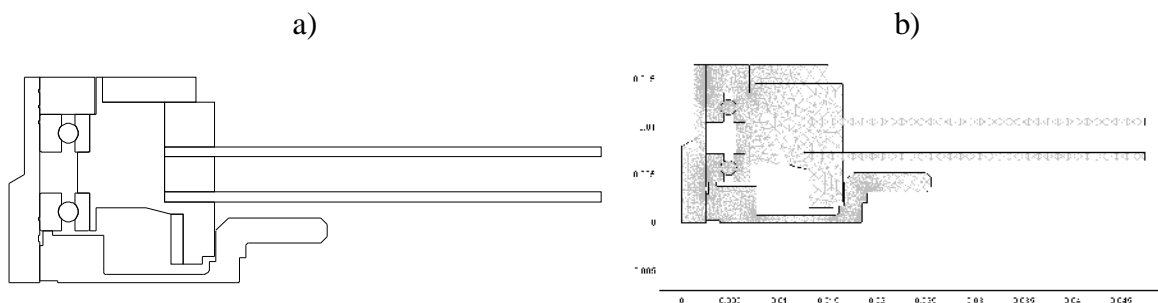
Model geometryczny systemu wrzecionowego dysku twardego zbudowano na podstawie przykładowego dysku Samsung SV0644A. Podstawowe parametry urządzenia to: pojemność - 6,4 GB, prędkość obrotowa - 5400 obr./min, 2 talerze przechowujące informacje. Pełna specyfikacja dysku znajduje się na stronie producenta [1].

Rysunek 1a) przedstawia trójwymiarową budowę systemu wrzecionowego z wykrojem ćwiartki obwodu, natomiast rys. 1b) przedstawia przekrój przez system wrzecionowy HDD z podstawowymi wymiarami.



Rys. 1. a) Budowa układu wrzecionowego dysku twardego,  
b) przekrój płaski układu wrzecionowego z podstawowymi wymiarami.

Stworzenie modelu płaskiego pozwoliło na zaimplementowanie go w środowisku do obliczeń polowych FEMLAB v3.1. Rysunek 2a) przedstawia półprzekrój, który po zaimportowaniu w programie polowym posłużył do budowy modelu dyskretnego przedstawionego na rys. 2b). Ograniczono się do modelu płaskiego, osiowoosymetrycznego zamiast modelu 3D ze względu na ograniczenia obliczeniowe środowiska FEMLAB.

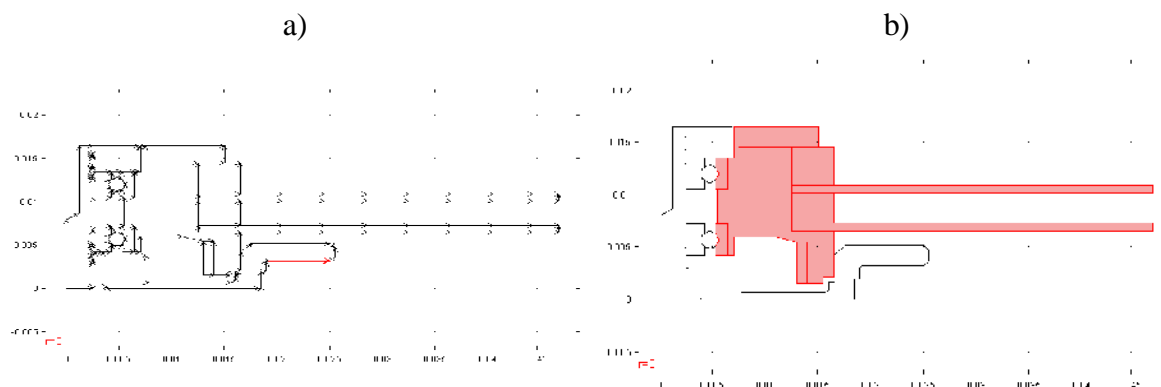


Rys. 2. a) Półprzekrój systemu wrzecionowego (model CAD),  
b) osiowoosymetryczny model dyskretny systemu wrzecionowego.

Budowa modelu 2D osiowoosymetrycznego, oprócz zdecydowanego uproszczenia go i skrócenia czasu obliczeń, wnosi ze sobą pewną komplikację – nie wszystkie elementy obiektu są osiowoosymetryczne. Pociągnęło to za sobą konieczność dostosowania parametrów materiałowych łożyska powstałego w modelu (przy takim zamodelowaniu obiektu zamiast elementów tocznych w postaci kulek - łożysko posiada torus) do łożyska istniejącego w dysku. Efekt końcowy (w postaci odpowiednich parametrów materiałowych przypisanych następnie do elementów modelu płaskiego) osiągnięto przez zamodelowanie trójwymiarowego łożyska, wyznaczenie jego sztywności osiowej i promieniowej, porównanie wyników z obliczeniami analitycznymi (otrzymano zbliżone wyniki). Następnie dokonano serii symulacji dla samego łożyska zamodelowanego w module osiowoosymetrycznym FEMLABa przy zmiennych parametrach materiałowych torusa by otrzymać, adekwatne do wcześniejszych, wartości sztywności łożyska. Pozostałym elementom modelu przypisano parametry materiałowe z wbudowanej bazy materiałów programu do obliczeń polowych.

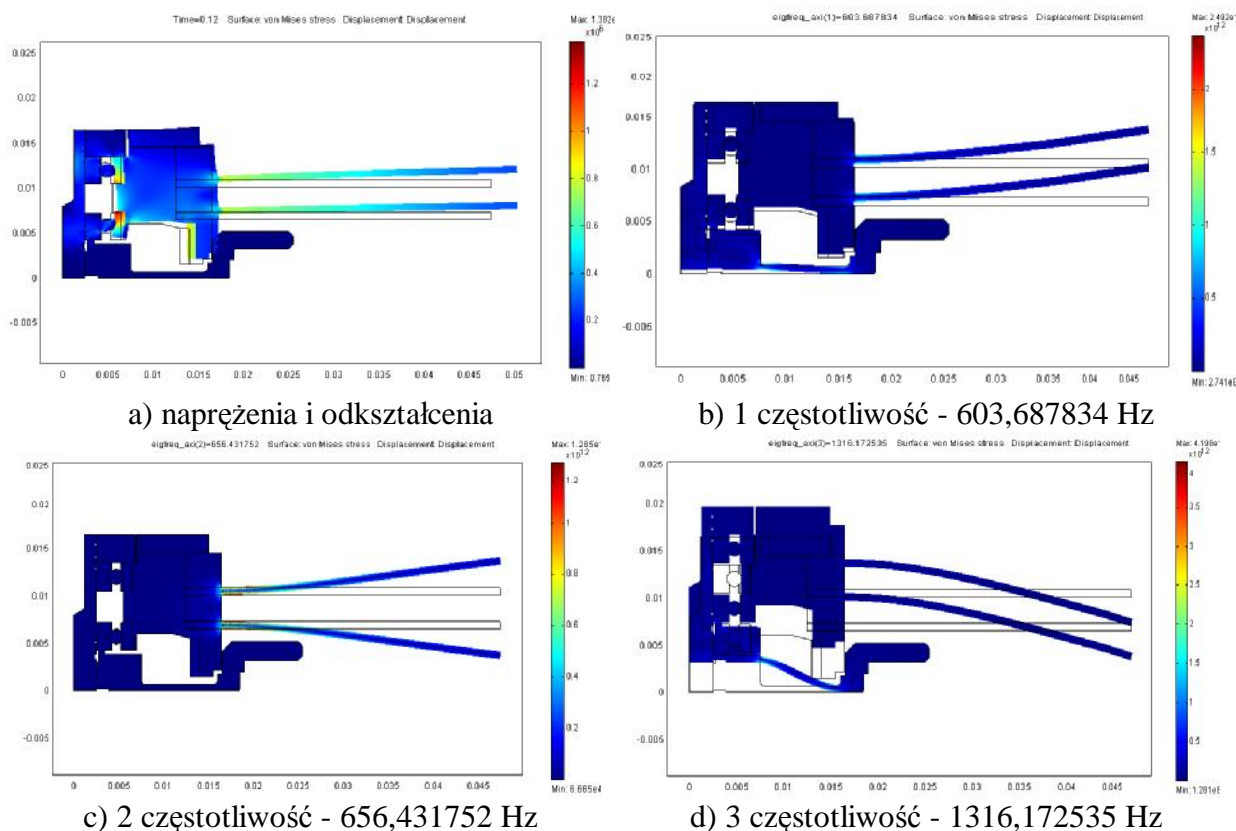
## 3. OBLICZENIA POLOWE DLA SYSTEMU WRZECIONOWEGO HDD

Zamodelowany system wrzecionowy poddano analizie częstotliwości drgań własnych oraz analizie odkształceń i naprężeń od działającej siły odśrodkowej. Na rys. 3a) przedstawiono sposób podparcia układu (odebrano możliwość ruchu w kierunku promieniowym i w kierunku osiowym), na rys. 3b) zaznaczonym elementom nadano prędkość obrotową  $\omega = 180 \cdot \pi$  rad./s (5400 obr./min).



Rys. 3. a) Podparcie układu, b) wirujące elementy modelu [4].

Rys. 4a) przedstawia odkształcenia i naprężenia od siły odśrodkowej. Maksymalne naprężenia wynoszą 1,382 MPa, maksymalne przemieszczenie promieniowe wynoszą 0,196  $\mu\text{m}$ , a przemieszczenia osiowe 0,106  $\mu\text{m}$ . Rysunki 4b), 4c), 4d) obrazują trzy podstawowe postacie osiowosymetrycznych drgań własnych systemu wrzecionowego. Odpowiadające im częstotliwości drgań własnych podano pod rysunkami.



Rys. 4. Wyniki symulacji przeprowadzonych dla układu wrzecionowego HDD [4].

## 4. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA WRZECIONOWEGO

Obwodowy model matematyczny 3-fazowego silnika wrzecionowego SM w naturalnym układzie współrzędnych dany jest równaniami napięciowymi dla obwodu stojana, równaniem momentu elektromagnetycznego silnika oraz równaniem ruchu [2].

Równania napięciowe dla obwodu stojana w postaci ogólnej:

$$[u^{abc}] = [R^{abc}] \cdot [i^{abc}] + \frac{d}{dt} [\Psi^{abc}] \quad (1)$$

gdzie:  $[u^{abc}]$  - wektor napięć zasilających silnik wrzecionowy,  $[i^{abc}]$  - wektor prądów fazowych silnika wrzecionowego,  $[R^{abc}]$  - diagonalna macierz rezystancji fazowych silnika wrzecionowego,  $[\Psi^{abc}]$  - wektor strumieni skojarzonych z uzwojeniami fazowymi stojana.

Równania napięciowe dla obwodu stojana w postaci kanonicznej:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_a &= \frac{1}{L_a} (u_a - R_a i_a - p_b \Omega_m \Psi_f \cos(p_b J_m)) \\ \frac{d}{dt} i_b &= \frac{1}{L_b} \left( u_b - R_b i_b - p_b \Omega_m \Psi_f \cos\left(p_b J_m - \frac{2}{3} p\right) \right) \\ \frac{d}{dt} i_c &= \frac{1}{L_c} \left( u_c - R_c i_c - p_b \Omega_m \Psi_f \cos\left(p_b J_m + \frac{2}{3} p\right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $i$ ,  $L$ ,  $u$ ,  $R$  - odpowiednio: prąd, indukcyjność, napięcie zasilające, rezystancja danej fazy,  $p_b$  - liczba par biegunów silnika wrzecionowego,  $\Omega_m$  - mechaniczna prędkość kątowna wirnika,  $\Psi_f$  - wektor strumienia wzbudzenia  $J_m$  - mechaniczny kąt obrotu wirnika.

Moment elektromagnetyczny  $T_e$  wyznaczony z bilansu mocy silnika:

$$T_e = \frac{1}{\Omega_m} \cdot \frac{d}{dt} [\Psi^{abc}]^T \cdot [i^{abc}] \quad (3)$$

Postać końcowa wyrażenia na moment elektromagnetyczny:

$$T_e = p_b \left( i_a \Psi_f \cos(p_b J_m) + i_b \Psi_f \cos\left(p_b J_m - \frac{2}{3} p\right) + i_c \Psi_f \cos\left(p_b J_m + \frac{2}{3} p\right) \right) \quad (5)$$

Równania ruchu dla systemu mechanicznego:

$$\frac{d}{dt} \Omega_m = \frac{1}{J_w} (T_e - T_L); \quad \frac{d}{dt} J_m = \Omega_m \quad (6)$$

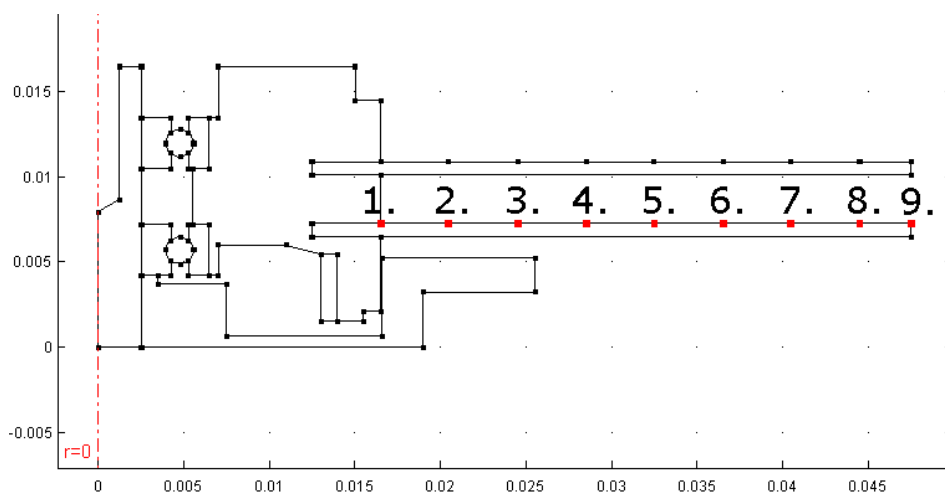
gdzie:  $J_w$  - zastępczy moment bezwładności układu wrzeciona,  $T_L$  - moment obciążenia.

## 5. ZINTEGROWANY MODEL OBWODOWO-POLOWY

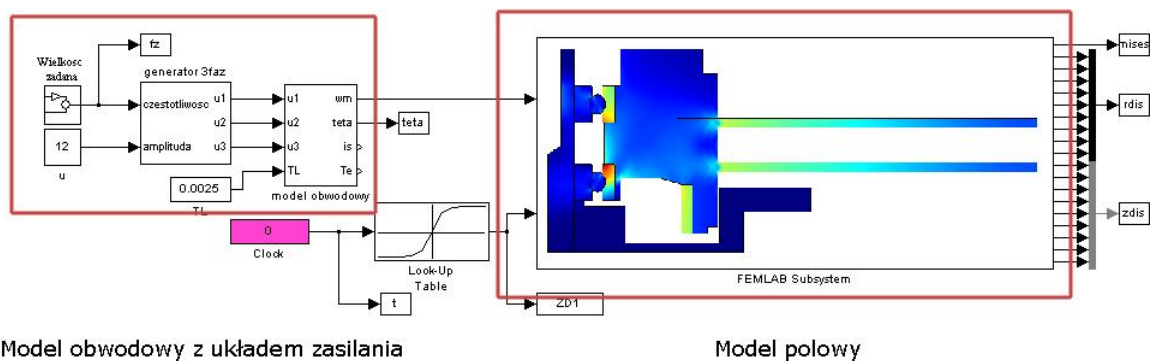
Połączenie modelu obwodowego z polowym zrealizowane zostało za pomocą sprzężenia od modelu obwodowego przez prędkość obrotową zadawaną wirującym elementom modelu polowego.

Na potrzeby Simulinka dokonano niewielkiego uproszczenia modelu polowego. Usunięto z niego aluminiową nakładkę na górne łożysko blokującą mgłą olejową oraz uproszczono nieco konstrukcję podstawy silnika. Model eksportowany do Simulinka przedstawia rys. 5a) (można go porównać z rysunkami 2 i 3). W zaznaczonych punktach rejestrowano przemieszczenia promieniowe i osiowe oraz dodatkowo w punkcie 1 realizowano rejestrację naprężeń.

a)



b)

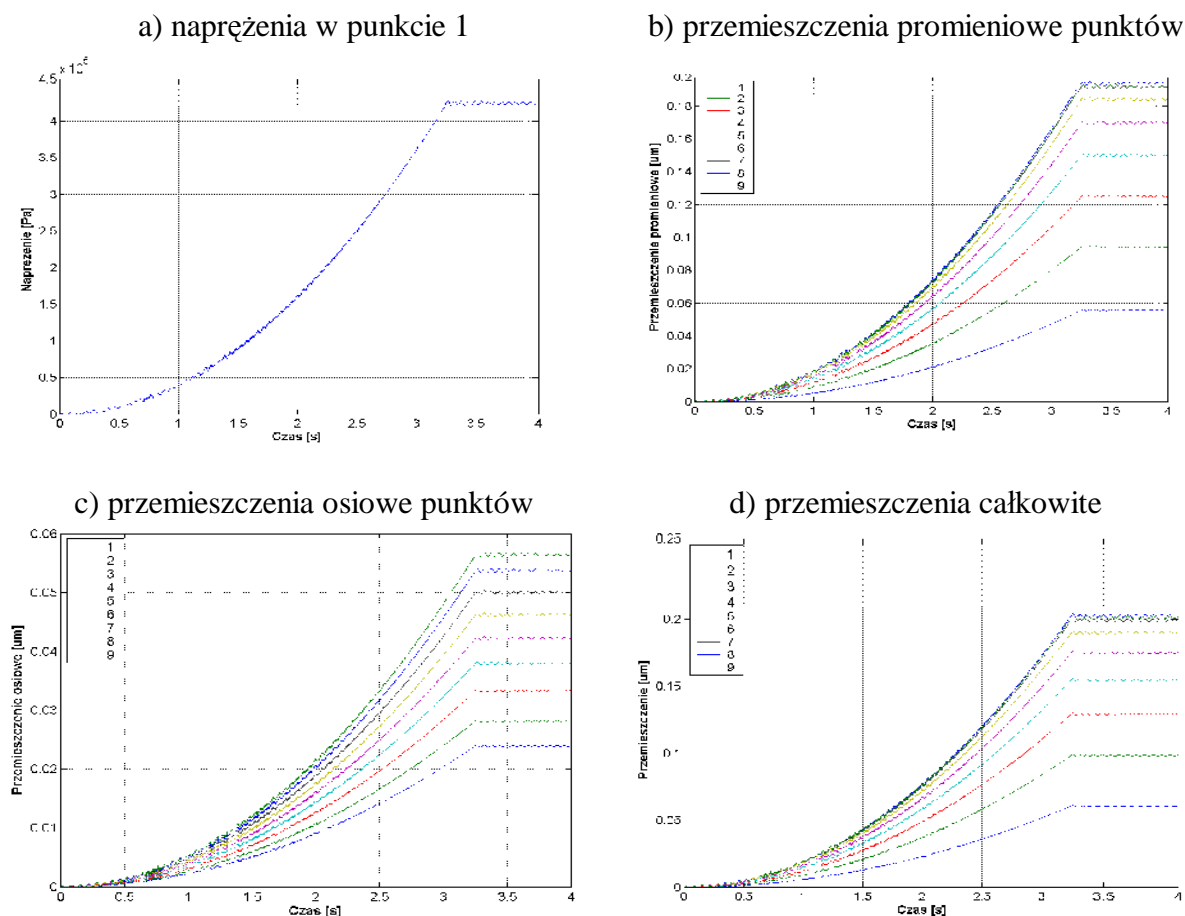


Rys. 5. a) Uproszczony model dla Simulinka, b) połączony model obwodowo-polowy [4].

Rys. 5b) ilustruje połączony model obwodowo-polowy. Dodatkowy blok „Look-Up Table” (blok znajduje się pomiędzy modelami) realizuje zadawanie przemieszczeń osiowych trzpienia systemu wrzecionowego wyznaczonych podczas pomiarów na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rys.7.

## 6. WYNIKI SYMULACJI DLA MODELU POŁĄCZONEGO

Rys. 6 przedstawia wybrane wyniki symulacji dla modelu przedstawionego w rozdziale 5.

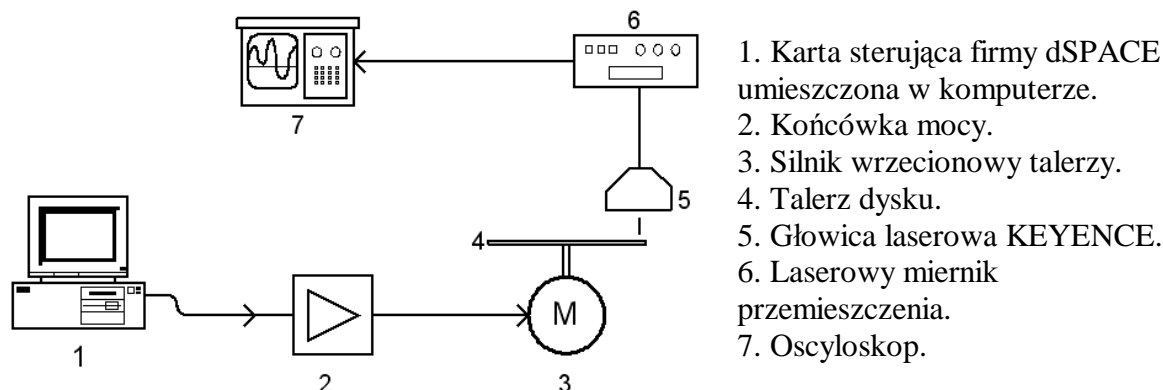


Rys. 6. Wyniki symulacji modelu połączonego [4].

Można zaobserwować wzajemne podobieństwo w kształcie wykreślonych charakterystyk. Wyraźnie rysuje się przedział, w którym dokonuje się rozruch silnika wrzecionowego (narastanie wartości na prezentowanych na rys. 6 przebiegach) i faza ustalonej pracy (ustabilizowanie się owych wartości na pewnym poziomie). Charakterystyki obrazujące przemieszczenia promieniowe i osiowe punktów talerza mają bardzo zbliżony kształt, różnią się jednak wartościami przemieszczeń. Przemieszczenia osiowe są w przybliżeniu  $\frac{1}{4}$  wielkości przemieszczeń promieniowych (efekt rozszerzania się talerzy na skutek działania siły odśrodkowej dominuje nad efektem unoszenia talerzy).

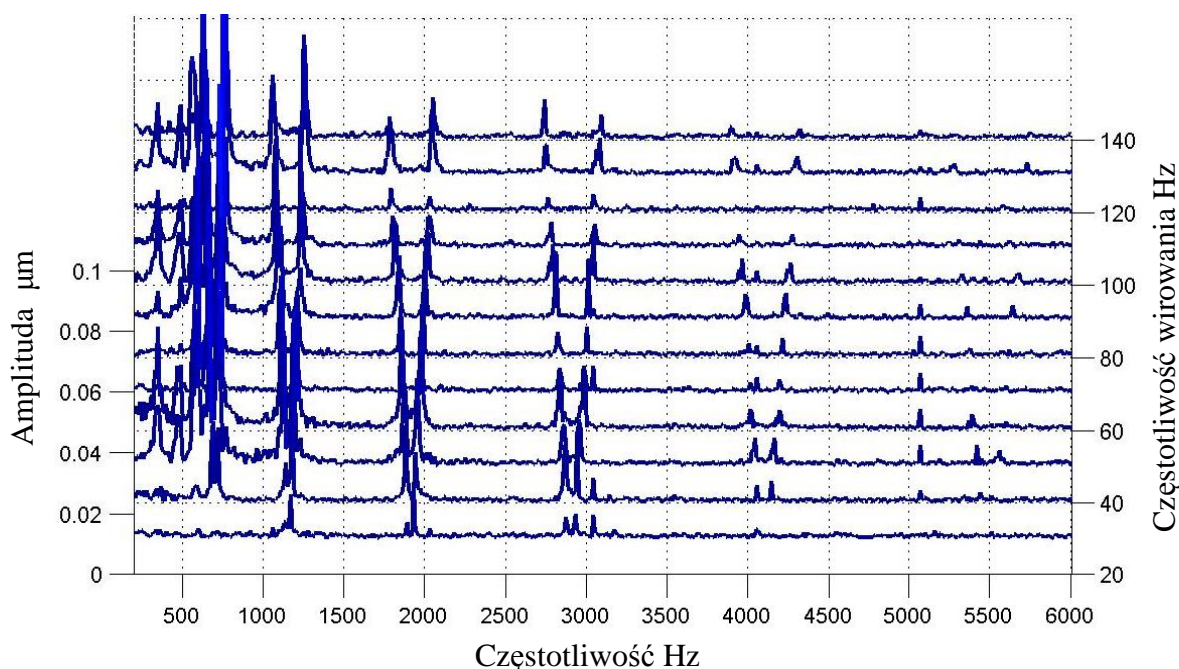
## 7. WYNIKI POMIARÓW

Dla weryfikacji wyników symulacji komputerowej przeprowadzono pomiary na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rysunek 7. Pomiarów dokonano za pomocą głowicy laserowej LK-G152 firmy KEYENCE.



Rys. 7. Schemat stanowiska badawczego.[3]

Na rysunku 8 przedstawiono otrzymane wyniki pomiarów, tzn. widma amplitudowo-częstotliwościowego drgań talerza w funkcji częstotliwości wirowania wirnika wraz z talerzami.



Rys. 8. Wyniki badań pomiarowych przeprowadzonych na stanowisku badawczym [3].

Na prezentowanym wykresie można zauważyć, że pierwsze częstotliwości rezonansowe znajdują się w okolicy 600 Hz i 1300 Hz, co odpowiada wynikom uzyskanym po przeprowadzonych badaniach symulacyjnych.

## 8. PODSUMOWANIE

Użyte oprogramowanie oraz jego możliwości obliczeniowe uniemożliwiają przeprowadzenie pełnej analizy obiektu tak złożonego, jakim jest system wrzecionowy dysku twardego. Badania pomiarowe i uzyskane tą drogą wyniki dają możliwość zweryfikowania procesu modelowania badanego systemu. Być może kolejne wersje użytego oprogramowania, bądź inne oprogramowanie, pozwolą na poszerzenie obszaru badań i uwzględnienie większej liczby parametrów wpływających na pracę dysków twardego (np. temperatura). W obszarze dalszych prac planowane jest pełne wykonanie modelu polowego 3D zarówno silnika

wrzecionowego jak i układu mechanicznego systemu wrzecionowego, pozwalające na analizę drgań osiowych talerzy – wywołanych sposobem namagnesowania magnesów trwałych wirnika silnika wrzecionowego.

#### LITERATURA

1. [www.samsung.com](http://www.samsung.com).
2. „Modelowanie i symulacja silnika wrzecionowego SM” Materiały drukowane do laboratorium z Mechatroniki, Zakład Mechatroniki, Pol. Śl., Gliwice.
3. M. Zdzieblik: Końcówka mocy do sterowania silników wrzecionowych, Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2005.
4. W. Zyzik: Zintegrowany model obwodowo-polowy układu wirujących talerzy dysku twardego w środowisku Simulink/Femlab. Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2005.
5. Aoki M., Nakajima H. and Takamizawa T. Rolling Bearings for Hard Disk Spindle Motor, Motion & Control No. 5 - 1998 NSK

### **INVESTIGATION ON KINEMATICS AND DYNAMICS OF HARD DISK DRIVE HEADS ACTUATORS WITH HELP OF DENAVIT-HARTENBERG NOTATION**

Summary. In the article the field-circuit model of rotating disk sets of hard disk drive – so-called spindle system is shown. The rolling bearings, rotor and stator as well rotating disks were implemented with help of finite elements method used in MATLAB-FEMLAB® programs. The mathematical circuit model of spindle motor was also implemented in MATLAB-SIMULINK programs.