

Spis treści

Streszczenie	7
Summary	8
Wykaz oznaczeń i skrótów	9
1. Wprowadzenie	13
2. Teza oraz cele pracy	15
3. Przegląd literatury	18
3.1. Tłumienie wewnętrzne	18
3.2. Zarys metod i rozwiązań stosowanych w aktywnej redukcji drgań układów wirnikowych	20
3.3. Materiały piezoelektryczne jako elementy wykonawcze w układach aktywnej redukcji drgań układów wirnikowych	21
4. Analityczny model wirnika Jeffcotta z elementami piezoelektrycznymi	25
4.1. Podstawowe równania ruchu w stacjonarnym oraz obrotowym układzie odniesienia	25
4.2. Tłumienie w dynamice układów wirnikowych i jego wpływ na stabilność	29
4.2.1. Tłumienie zewnętrzne, tłumienie wewnętrzne	29
4.2.2. Tłumienie a drgania samowzbudne	30
4.2.3. Tłumienie w równaniach ruchu w modelu Jeffcotta	30
4.3. Analiza z wykorzystaniem zapisu zespolonego	32
4.3.1. Równania ruchu w zapisie zespolonym w stacjonarnym i obrotowym układzie odniesienia	32
4.3.2. Analiza stabilności – drgania własne tłumione	33
4.3.3. Wpływ tłumienia na stabilność układu	36

4.4. Modelowanie piezoelektrycznych czujników i elementów wykonawczych	38
4.4.1. Element piezoelektryczny jako czujnik	40
4.4.2. Element piezoelektryczny jako aktuator	42
4.5. Badania symulacyjne układu sterowania wpływającego na tłumienie	45
4.5.1. Algorytm sterowania	45
4.5.2. Układ regulacji wpływający na tłumienie	46
4.5.3. Analiza stabilności aktywnego wirnika	47
4.6. Wpływ aktywnego sterowania tłumieniem na drgania wymuszone wirnika	50
4.6.1. Odpowiedź aktywnego wirnika na niewyważenie	50
4.6.2. Odpowiedź aktywnego wirnika na siłę ciężkości	51
5. Modelowanie i analiza dynamiki wirnika z elementami piezoelektrycznymi z wykorzystaniem MES	53
5.1. Możliwości i ograniczenia programu Ansys w zakresie modelowania dynamiki układów wirnikowych	53
5.1.1. Warunki typowych analiz układów wirnikowych w Ansysie	54
5.1.2. Modelowanie tłumienia w układach wirnikowych w Ansysie	54
5.1.3. Modelowanie efektu piezoelektrycznego	55
5.2. Podejście kombinowane do analiz MES wirnika o aktywnej strukturze ...	56
5.2.1. Przygotowanie macierzy w Ansysie i odtworzenie modelu w Matlabie	57
5.2.2. Modelowanie tłumienia	60
5.2.3. Modelowanie elementów piezoelektrycznych jako czujników oraz elementów wykonawczych	64
5.2.4. Modelowanie wymuszeń	65
5.3. Weryfikacja metody kombinowanej – przykład numeryczny	65
5.3.1. Geometria i własności materiałowe	66
5.3.2. Wpływ sprzężenia żyroskopowego	66
5.3.3. Oddziaływanie piezoelektryczne	67
5.3.4. Tłumienie Rayleigha i tłumienie modalne	70
5.3.5. Graniczna prędkość utraty stabilności	73
6. Badania symulacyjne algorytmów sterowania wpływających na tłumienie wewnętrzne	75
6.1. Algorytm sprzężenia prędkościowego DVF	75
6.2. Algorytm dodatniego sprzężenia od położenia PPF	82
6.3. Algorytm sprzężenia od położenia z kompensacją fazy PCPF	85

6.4. Przemieszczenie jako sygnał sprzężenia zwrotnego	88
6.5. Podsumowanie	92
7. Badania eksperymentalne	93
7.1. Opis stanowiska do badania układów o aktywnej strukturze wirnika	93
7.1.1. Wał wirnika z elementami piezoelektrycznymi oraz dyskiem	94
7.1.2. Podpory i uchwyty	96
7.1.3. Schemat stanowiska laboratoryjnego	97
7.1.4. Wykorzystanie czujników laserowych jako sygnału sprzężenia w układzie sterowania	99
7.2. Omówienie najważniejszych metod analizy danych pomiarowych	100
7.2.1. Widmo dwustronne (ang. <i>Full FFT</i>)	100
7.2.2. Pomiar szybkości zaniku drgań	102
7.3. Wpływ aktywnego sterowania na efektywne tłumienie wewnętrzne w strukturze	104
7.3.1. Aktywna modyfikacja tłumienia przy braku wirowania	106
7.3.2. Aktywna modyfikacja tłumienia wewnętrznego w trakcie ruchu obrotowego	107
7.4. Porównanie wyników eksperymentalnych i symulacyjnych	112
7.4.1. Wpływ podatności podpór na układ sterowania w modelu MES ...	113
7.4.2. Porównanie aktywnego wpływu na tłumienie przy braku wirowania	115
7.4.3. Porównanie aktywnego wpływu na tłumienie przy prędkości obrotowej 28 obr/s	116
7.4.4. Ocena badanych modeli symulacyjnych i dyskusja	117
8. Podsumowanie i kierunki dalszych badań	119
Załączniki	123
Załącznik A: Wybrane pojęcia z zakresu dynamiki układów wirnikowych	123
A.1. Wirnik i układ wirnikowy	123
A.2. Prędkość krytyczna	124
A.3. Prędkość graniczna utraty stabilności	124
A.4. Precesja współbieżna i przeciwbieżna	124
A.5. Tłumienie wewnętrzne i zewnętrzne	125
Załącznik B: Eksportowanie macierzy MES w programie Ansys	126
Załącznik C: Analizy uzupełniające	128
C.1. Wał o przekroju kwadratowym	128
C.2. Wpływ uchwytów tokarskich na dynamikę układu	129

Załącznik D: Szczegóły techniczne stanowiska laboratoryjnego	132
D.1. Pierścienie ślizgowe	132
D.2. Serwonapęd	133
D.3. Czujniki laserowe	135
D.4. Wzmacniacze wysokich napięć	136
D.5. Wzmacniacze ładunku	137
D.6. Separacja galwaniczna	138
D.7. Kontroler pomiarowo-sterujący	139
Załącznik E: Opis kodu programu kontrolera	141
E.1. Zadania układu FPGA	141
E.2. Zadania kontrolera czasu rzeczywistego	143
Bibliografia	145