

Modellbasierte Fehlererkennung an einem elastischen Rotor mit Hilfe aktiver Lagerung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Bernd W. Hasch

aus Worms am Rhein

| | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Rainer Nordmann |
| Mitberichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka |
| Tag der Einreichung: | 04.05.2010 |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 23.06.2010 |

Darmstadt 2010

D17

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Symbole und Abkürzungen | ix |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Fehler in Flugtriebwerken | 2 |
| 1.2. Rotoren mit aktivem Lager | 4 |
| 1.3. Ziele und Aufbau der Arbeit | 5 |
| 2. Grundlagen zur Fehlererkennung | 7 |
| 2.1. Begriffe der modellbasierten Fehlererkennung | 7 |
| 2.2. Fehlererkennung in Flugtriebwerken | 11 |
| 2.3. Fehlererkennung an Rotoren | 14 |
| 2.4. Zusammenfassung | 16 |
| 3. Beschreibung der Versuchsumgebung | 19 |
| 3.1. Prüfstand | 19 |
| 3.1.1. Piezoelektrische Aktoren | 20 |
| 3.1.2. Sensoren | 21 |
| 3.2. Signalverarbeitung | 22 |
| 3.2.1. Prüfstandsgeräte | 23 |
| 3.2.2. Prüfstandsprogramme | 23 |
| 3.3. Referenzzustand des Prüfstands | 26 |
| 3.3.1. Einfluss von Schlag | 26 |
| 3.3.2. Auswuchtstrategie | 27 |
| 3.4. Einbringen von Fehlern am Prüfstand | 29 |
| 3.4.1. Aktor- und Sensorfehler | 29 |
| 3.4.2. Einbringen von Unwucht | 30 |
| 3.5. Zusammenfassung | 34 |
| 4. Modellierung der Strecke | 35 |
| 4.1. Modellierung aus Teilsystemen | 36 |
| 4.1.1. Mechanische Strecke | 36 |
| 4.1.2. Verknüpfung des Modells mit der Aktorik | 40 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.1.3. | Regler zur Schwingungsminderung | 43 |
| 4.2. | Experimentelle Identifikation von Prüfstandsmodellen | 45 |
| 4.2.1. | Nichtparametrische Modelle | 46 |
| 4.2.2. | Parametrische Modelle | 48 |
| 4.3. | Vergleich der Modelle | 49 |
| 4.4. | Zusammenfassung | 54 |
| 5. | Modellbasierte Fehlererkennung am aktiv gelagerten Rotor | 57 |
| 5.1. | Untersuchung von Aktor- und Sensorfehlern | 57 |
| 5.1.1. | Paritätsgleichungen | 58 |
| 5.1.2. | Einzelner Beobachter zur Fehlererkennung | 65 |
| 5.1.3. | Bank von Beobachtern | 68 |
| 5.1.4. | Kalmanfilter | 69 |
| 5.1.5. | Beobachter mit unbekanntem Eingängen | 73 |
| 5.1.6. | Adaptive Schwelle | 79 |
| 5.2. | Sensorminimale beobachterbasierte Erkennung von Unwucht | 81 |
| 5.3. | Unwuchtschätzung mit FxLMS-Algorithmus | 83 |
| 5.3.1. | Hintergrund zur Methode | 84 |
| 5.3.2. | Modellanpassung | 88 |
| 5.3.3. | Testen der Methode an einem vereinfachten Aufbau | 89 |
| 5.3.4. | Notwendige Vorbedingungen zum Einsatz bei drehendem Rotor | 91 |
| 5.4. | Zusammenfassung | 92 |
| 6. | Ergebnisse | 95 |
| 6.1. | Untersuchung von Aktor- und Sensorfehlern | 95 |
| 6.1.1. | Paritätsgleichungen | 96 |
| 6.1.2. | Einzelner Beobachter zur Fehlererkennung | 104 |
| 6.1.3. | Bank von Beobachtern | 107 |
| 6.1.4. | Kalmanfilter | 110 |
| 6.1.5. | Beobachter mit unbekanntem Eingängen | 115 |
| 6.1.6. | Zusammenfassende Bemerkungen | 119 |
| 6.2. | Sensorminimale beobachterbasierte Erkennung von Unwucht | 119 |
| 6.2.1. | Beobachter aus dem FE-Modell | 120 |
| 6.2.2. | Beobachter aus dem experimentell identifizierten Modell | 123 |
| 6.2.3. | Zusammenfassende Bemerkungen | 124 |
| 6.3. | Unwuchtschätzung mit FxLMS-Algorithmus | 126 |
| 6.3.1. | Versuche am vereinfachten Aufbau | 126 |



| | |
|---|------------|
| 6.3.2. Versuche am drehenden Rotor | 129 |
| 6.3.3. Zusammenfassende Bemerkungen | 135 |
| 6.4. Zusammenfassung | 136 |
| 7. Zusammenfassung | 137 |
| Literaturverzeichnis | 141 |
| A. Ergänzungen zur Modellierung | 153 |