

Schwingungsdämpfung mit beschalteten Piezowandlern und Anwendung zur Unterdrückung von Bremsenquietschen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Marcus Neubauer
geboren am 23. August 1977 in Hannover

2008

Inhaltsverzeichnis

Formelverzeichnis	VIII
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
1 Einleitung	1
1.1 Stand des Wissens	3
1.1.1 Bauformen und Modellierung von Piezowandlern	3
1.1.2 Beschaltete Piezoelemente	12
1.1.2.1 Resonanznetzwerke	13
1.1.2.2 <i>Switching</i> -Netzwerke	18
1.2 Aufgabenstellung	29
2 Wegerregter Piezowandler mit externer Beschaltung	33
2.1 Modellbildung des Piezowandlers und Versuchsaufbau	33
2.2 Beschaltung durch Resonanznetzwerke	36
2.2.1 <i>LR</i> -Netzwerk	40
2.2.2 <i>LRC</i> -Netzwerk	43
2.2.3 Interpretation der Ergebnisse	47
2.3 Beschaltung durch <i>Switching</i> -Netzwerke	48
2.3.1 <i>State switching</i> - und <i>SSDS</i> -Netzwerke	48
2.3.2 <i>SSDI</i> - und <i>SSDV</i> -Netzwerke	52
2.3.3 Normierung der Netzwerkparameter und Schaltzeitpunkte	53
2.3.4 Stationärer Zustand	56
2.3.5 Näherungslösung	63
2.3.6 Vergleich mit Näherungslösungen aus der Literatur	67
2.3.7 Vergleich von <i>SSDI</i> - und <i>SSDV</i> -Netzwerken	68
2.3.8 Einfluss des Spannungsabfalls beim Schalten	70
2.3.9 Dissipierte Energie	73
2.3.10 Hysteresekurven	78
2.3.11 Transientes Schwingverhalten	81
2.3.12 Messungen mit <i>switching</i> -Netzwerken	85
2.3.13 Interpretation der Ergebnisse	90
2.4 Beschreibung als frequenzabhängige, komplexe Steifigkeit	94

2.4.1	<i>LR</i> - und <i>LRC</i> -Beschaltungen	94
2.4.2	<i>Switching</i> -Netzwerke	97
2.4.2.1	Anregung höherer Frequenzen	97
2.4.2.2	Harmonische Balance	101
2.4.3	Interpretation der Ergebnisse	104
3	Dämpfung mechanischer Systeme durch beschaltete Piezowandler	105
3.1	Fremderregter Einmassenschwinger	105
3.1.1	Dämpfungsbestimmung durch komplexe Eigenwertanalyse	107
3.1.1.1	<i>LR</i> -Netzwerk	107
3.1.1.2	<i>LRC</i> -Netzwerk	109
3.1.2	Minimierung der Amplituden bei harmonischer Erregung	110
3.1.3	Interpretation der Ergebnisse	115
3.2	Biegebalken mit beschalteten Piezoelementen	116
3.2.1	Modellannahmen	117
3.2.2	Bewegungsgleichungen des Systems	117
3.2.3	Optimale Platzierung der Piezoelemente	119
3.2.4	Beschaltung mit Resonanznetzwerken	122
3.2.4.1	<i>LR</i> -Netzwerke	124
3.2.4.2	<i>LRC</i> -Netzwerke	125
3.2.5	Beschaltung mit SSDI- und SSDV-Netzwerken	128
3.2.6	Positions- und Geschwindigkeitsrückführung	130
3.2.6.1	Geschwindigkeitsrückführung	130
3.2.6.2	Positionsrückführung	135
3.2.7	Interpretation der Ergebnisse	137
3.3	Energy harvesting	138
3.3.1	Stationäre Amplituden und gewandelte Energie	139
3.3.2	Interpretation der Ergebnisse	142
4	Unterdrückung von Bremsenquietschen	144
4.1	Stand der Wissenschaft	144
4.2	Aufgabenstellung	148
4.3	Bremsenmodifikation	149
4.4	Modellierung	150
4.4.1	Kontaktbeschreibung	152
4.4.2	Scheibendicke und Wahl der Randbedingungen	155
4.5	Stabilitätsuntersuchungen	158
4.5.1	Geschwindigkeits- und Positionsrückführung	160
4.5.2	Beschaltung mit <i>LR</i> - und <i>LRC</i> -Netzwerken	163
4.5.3	<i>Switching</i> -Netzwerke	170
4.6	Interpretation der Ergebnisse	171
5	Zusammenfassung	173

Anhang	179
A Freie Balkenschwingungen	179
B Stabilitätsanalyse und Dämpfungsbestimmung	181
C Elektrische Netzwerke und Versuchsstände	183
C.1 Negative-Kapazitäts-Netzwerk	183
C.2 <i>Switching</i> -Netzwerke	184
C.2.1 Netzwerk zur Bestimmung des Einflusses der Schaltzeitpunkte . . .	184
C.2.2 Adaptive <i>switching</i> -Schaltung	184
C.3 Biegebalken	185
Literaturverzeichnis	187