

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

MSc. Phys. Michael Ertl,
Großgründlach

Nr. 367

**Numerische Analyse
schnellwirkender
elektromagnetischer
Ventilaktoren mit
der Finite-Elemente-
Methode**

VDI Verlag

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	VIII
Kurzfassung	XII
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Schnellwirkende elektromagnetische Aktoren	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Stand der Technik	4
1.3.1 Nachbildung der Aktordynamik	4
1.3.2 Nachbildung des Impaktproblems und des Prellverhaltens	7
1.4 Neuentwicklungen im Rahmen dieser Arbeit	8
1.4.1 Numerische Analysewerkzeuge	8
1.4.2 Anwendung des neuen Berechnungsverfahrens	8
2 Beschreibung der beteiligten physikalischen Systeme	10
2.1 Die Mechanik fester Körper	10
2.2 Das elektromagnetische Feld	11
2.3 Feldkopplungen beim elektromagnetischen Aktor	12
2.3.1 Die Kopplung magnetisches Feld - elektrisches Netzwerk	13
2.3.2 Die magneto-mechanische Kopplung	13
2.3.3 Thermische Kopplung	14
3 Theorie der nichtlinearen Kontaktmechanik	15
3.1 Kontaktmechanik metallischer Oberflächen	16
3.2 Dynamische Kontakt- und Impaktprobleme	16
3.2.1 Die Kontinuumsformulierung	17
3.2.2 Die bestimmenden Gleichungen und Ungleichungen	19
3.2.3 Erhaltungssätze	20
3.2.4 Einbringung der Kontakt-Randbedingungen	21

4	Finite-Elemente-Formulierung	25
4.1	Finite-Elemente-Implementierung der Kontaktinteraktion	26
4.1.1	Ortsdiskretisierung der Kontaktoberfläche	27
4.1.2	Kontaktdetektion	29
4.1.3	Bestimmung der Kontaktkräfte	30
4.1.4	Zeitdiskretisierung	32
4.2	Numerische Zeitintegration	33
4.2.1	Die <i>Newmark</i> -Methode	35
4.2.2	Die <i>Hilber-Hughes-Taylor-α</i> Methode	36
4.2.3	Energie- und Impulsstabilität im diskretisierten System	37
4.2.4	Erzwingung der Geschwindigkeitsrandbedingung	42
4.2.5	Iterative Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems	44
4.3	Bestimmung der Tangentialsteifigkeitsmatrix	47
4.3.1	Variation und Linearisierung der Spaltfunktion g_n	47
4.3.2	Berechnung des Inkrements der Variation der Spaltfunktion	48
4.3.3	Bestimmung der Steifigkeitsmatrix im Zweidimensionalen	50
4.4	Kopplung magnetisches Feld - mechanisches Feld	53
4.5	Konvergenzoptimierung	55
4.5.1	Linienuche	56
4.5.2	Zeitschrittadaption	56
4.5.3	<i>Pseudo-augmentation</i>	56
5	Verifizierung des Berechnungsverfahrens	59
5.1	Stabeinschlag auf eine feste Wand	59
5.2	Zusammenstoß zweier identischer Balken	64
6	Schnellwirkende elektromagnetische Schaltventile	66
6.1	Elektromagnetische Direkteinspritzventile	67
6.1.1	Aufbau und Funktionsprinzip	67
6.1.2	Ansteuerung des Elektromagneten	70
6.2	Finite-Elemente-Modellierung	71
6.2.1	Vernetzungsstrategie	71
6.2.2	Diskretisierung des Arbeitsspaltbereichs	73
6.2.3	Einfluß der Vernetzungsdichte auf die Genauigkeit	75
6.3	Analyse der Aktorcharakteristik	76
6.3.1	Magnetisierungskurven	76
6.3.2	Statisches Verhalten	77
6.3.3	Energiebetrachtungen	78
6.3.4	Schaltcharakteristik	81
6.3.5	Magnetfelddiffusion	84
6.3.6	Wirbelstrominduktion	87
6.3.7	Hystereseverhalten	91
6.3.8	<i>Skin</i> -Effekt	93

6.3.9	Temperaturabhängigkeit	95
7	Analyse und Optimierung der Aktordynamik	98
7.1	Analyse der Aktordynamik	99
7.1.1	Die elektrische Vormagnetisierung	101
7.1.2	Der Ventilanzug	101
7.1.3	Die Injektionszeit	103
7.1.4	Der Ventilabfall	104
7.1.5	Gesamtverhalten	105
7.2	Optimierung der Aktordynamik	107
7.2.1	Passive Kennlinienbeeinflussung	109
7.2.2	Aktive Kennlinienbeeinflussung	112
8	Zusammenfassung und Ausblick	122
8.1	Modellierung der geometrischen Nichtlinearität: Kontaktalgorithmus	123
8.2	Nutzen des Verfahrens	123
8.3	Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	127