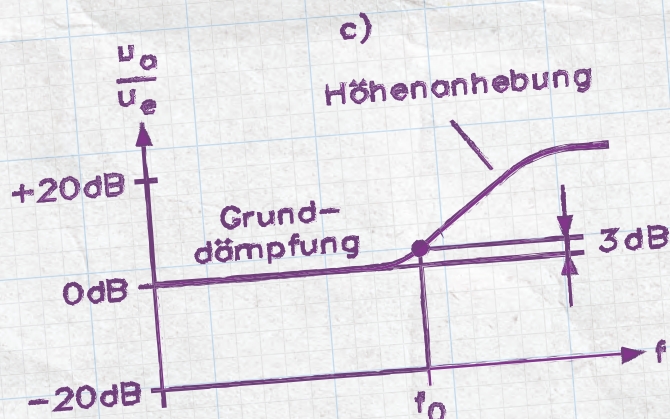
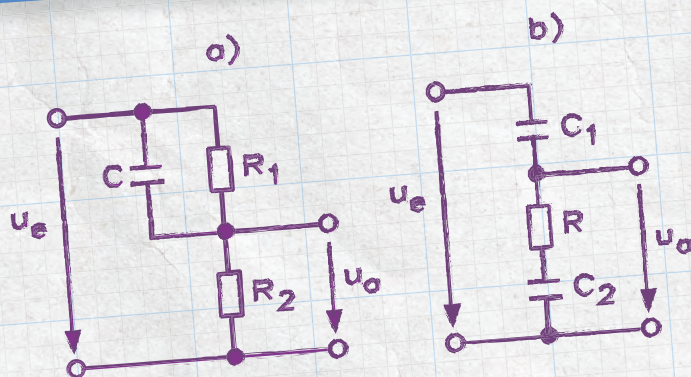
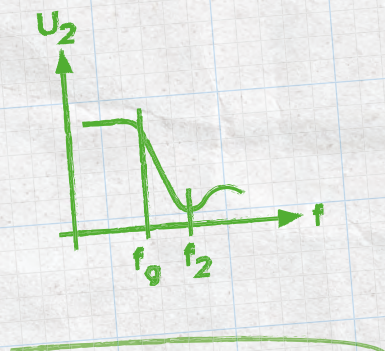
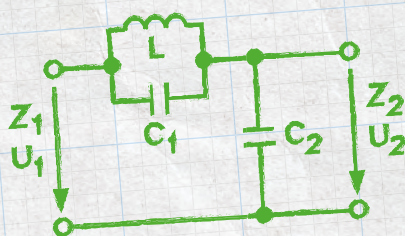


Aktive und passive Filter

Grundlagen und Simulation mit Multisim



Tiefpass-Doppelglied:



Herbert Bernstein

Aktive und passive Filter

Grundlagen und Simulationen mit Multisim



Herbert Bernstein

© 2024: Elektor Verlag GmbH, Aachen

1. Auflage 2024

ISBN 978-3-89576-620-6 (Print)

978-3-89576-621-3 (E-book)

Korrektur: Markus Freund

- Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

Umschlaggestaltung: Elektor, Aachen

Satz und Aufmachung: Gulnara Insanbayeva, Saarbrücken

Druck: Ipskamp Printing, Niederlande

Inhalt

Vorwort	9
1 • Einführung in die aktive und passive Filtertechnik	11
1.1 • Klassifizierung von Filtern	12
1.1.1 • Filterklassen	12
1.1.2 • Analoge Filterschaltungen	14
1.1.3 • Passive Filterschaltungen	16
1.1.4 • Aktive Filterschaltungen	18
1.1.5 • Kontinuierliche IC-Filter	19
1.2 • Analoge Abtastfilter	20
1.2.1 • Aufbau eines analogen Abtastfilters	20
1.2.2 • Geschaltete IC-Filter	22
1.3 • Digitale Filterschaltungen	27
1.3.1 • Aufbau eines digitalen Abtastsystems	28
1.3.2 • Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von Signalen	30
1.3.3 • Digitaler Signalprozessor	33
1.3.4 • Subsysteme für DSP-Bausteine	36
1.3.5 • DSP-Software	38
1.3.6 • Fließkomma- oder Festkommaverarbeitung	39
1.4 • Mechanische Filter	44
1.4.1 • Filter nach dem Piezoeffekt	44
1.4.2 • Quarz- und Keramikfilter	45
2 • Frequenzabhängige und komplexe Widerstände	47
2.1 • Realisierung von passiven Filterschaltungen	49
2.1.1 • Widerstand im Wechselstromkreis	49
2.1.2 • Kondensator im Wechselstromkreis	51
2.1.3 • Spule im Wechselstromkreis	53
2.1.4 • Reihenschaltung von Widerstand und Kondensator	58
2.1.5 • Reihenschaltung von Widerstand und Spule	61
2.1.6 • Parallelschaltung von Widerstand und Kondensator	63
2.1.7 • Parallelschaltung von Widerstand und Spule	66
2.2 • Schwingkreise	68
2.2.1 • Reihenschaltung von Widerstand, Kondensator und Spule	69
2.2.2 • Parallelschaltung von Widerstand, Kondensator und Spule	72
2.3 • Komplexe Darstellung des Wechselstroms	75
2.4 • Ortskurven	78
2.4.1 • Ortskurven mit Widerstand, Kondensator und Spule	79
2.5 • Smith-Diagramm	81
2.5.1 • Funktionen des Smith-Kreisdiagramms	82
2.5.2 • Maßstab und Normierung im Smith-Kreisdiagramm	85
2.5.3 • Verhalten von Bauelementen in der Wechselstromtechnik	87
2.5.4 • Grafische Methode für die Umwandlung von Parallel- in Reihenwiderstände und umgekehrt	88

2.5.5 • Graphische Transformation von komplexen Reihenwiderständen in äquivalente Parallelwiderstände und umgekehrt	92
2.5.6 • Graphische Darstellung einer Parallelschaltung mit veränderlichem Blindwiderstand bei variabler Frequenz	95
2.5.7 • Graphische Darstellung der Parallelschaltung mit veränderlichem Wirkwiderstand bei konstanter Frequenz.	97
2.5.8 • Graphische Darstellung der Reihenschaltung mit einem veränderbaren Blindwiderstand durch die Frequenz.	98
2.5.9 • Graphische Darstellung der Serienschaltung eines Blindwiderstands mit veränderbarem Wirkwiderstand bei konstanter Frequenz.	98
2.5.10 • Reflexionsfaktorebene	99
2.5.11 • Ablesen der Faktoren im Smith-Diagramm	101
3 • Passive Filterschaltungen.	105
3.1 • RC-Tiefpass.	105
3.1.1 • Bode-Plotter.	105
3.1.2 Berechnungen und Simulation eines RC-Tiefpasses	109
3.1.3 LR-Tiefpass.	111
3.1.4 CR-Hochpass	112
3.1.5 RL-Hochpass	113
3.1.6 LC-Glied	115
3.1.7 CL-Glied	116
3.1.8 T- und n-Tiefpass	118
3.1.9 T- und n-Hochpass	119
3.2 • Impedanzanpassung	121
3.2.1 • Reihenwiderstand	121
3.3 • Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten von passiven Frequenzfiltern	132
3.3.1 • Tiefpass-Doppelglied.	133
3.3.2 • Hochpass-Doppelglied	134
3.3.3 • LC-Bandpass	136
3.3.4 • LC-Bandsperre.	138
3.3.5 • RC-Bandpass (Wienbrücke).	140
3.3.6 • Doppel-T-Filter.	142
3.4 • Passive Filter für Klangbeeinflussung.	145
3.5 • Möglichkeiten der Klangeinstellung mit RC-Filtern.	150
3.5.1 • Höhenanhebung und -absenkung.	150
3.5.2 • Tiefenanhebung und -absenkung.	152
3.5.3 • Einstellmöglichkeiten für Tiefen und Höhen.	153
3.6 • Spannungsteiler mit Blindwiderständen	156
3.7 • Kriterien für Filter	159
3.8 • Vierpole und Filter	161
3.8.2 • Komplexe Spannungs- und Stromteiler.	163
3.8.3 • Passiver Tief- und Hochpass der höheren Ordnung	166
3.8.4 • RC-Filter nach Gauß	168
3.8.5 • T- und π -Filter	169
3.8.6 • Filter nach Gauß, Bessel, Butterworth, Cauer und Tschebyscheff	171
3.8.7 • Amplitudengang von Filtern.	173

3.8.8 • Bandpass- und Bandsperrfilter	174
3.8.9 • Induktive und kapazitive Kopplung	176
4 • Arbeitsweise und Hauptphasen eines Simulators	179
4.1 • Arbeiten mit dem Simulator	179
4.1.1 • Arbeitspunktanalyse	180
4.1.2 • AC-Sweep	182
4.1.3 • Zeitverhalten und Transientenanalyse	185
4.1.4 • DC-Sweep	188
4.1.5 • AC-Analyse für Einzelfrequenzen	190
4.1.6 • Parameter-Sweep	197
4.1.7 • Monte-Carlo-Analyse	199
4.1.8 • Fourier-Analyse	202
4.1.9 • Temperatur-Sweep	205
4.1.10 • Worst Case	206
4.1.11 • Rauschzahl	210
4.2 • Konvergenzprobleme und Analysefehler	216
4.3 • Simulation und Analyse	221
4.3.1 • Analysemethoden mittels Oszilloskop	221
4.3.2 • Analysefenster	224
5 • Lautsprecher und Frequenzfilter	227
5.1 • Dynamischer Tieftonlautsprecher	229
5.1.1 • Übertragungskurve des dynamischen Lautsprechers	231
5.1.2 • Lautsprecherchassis und Boxen	233
5.1.3 • Tieftonlautsprecher	235
5.1.4 • Mittel- und Hochtonlautsprecher	236
5.1.5 • Koaxiallautsprecher	239
5.2 • Elektrisches und mechanisches Verhalten von Lautsprechern	240
5.2.1 • Frequenzgang	241
5.2.2 • Lautsprecherimpedanz	245
5.2.3 • Lautsprecherbox	248
5.2.4 • Akustischer Kurzschluss	249
5.2.5 • Geschlossene Lautsprecherboxen (Kompaktboxen)	252
5.2.6 • Bassreflexbox oder Phasenumkehrbox	253
5.3 • Frequenzfilter	255
5.3.1 • Frequenzweiche 1.Ordnung mit 6 dB/Oktave	256
5.3.2 • Frequenzweiche 2.Ordnung mit 12 dB/Oktave	257
5.3.3 • Frequenzweiche 2.Ordnung für Mitteltonlautsprecher	258
5.3.4 • Frequenzweiche 3.Ordnung mit einem Spannungsfall/Oktave von 18 dB	259
5.3.5 • Frequenzweiche 4.Ordnung mit einem Spannungsfall/Oktave von 24 dB	260
6 • Aktive Filterschaltungen	263
6.1 • Grundsaltungen von aktiven Filtern	263
6.1.1 • Integrierer und Tiefpass	264
6.1.2 • Differenzierer und Hochpass	267
6.1.3 • Aktiver Tiefpass	269

6.1.4 • Aktiver Hochpass	270
6.1.5 • Aktiver Bandpass	271
6.1.6 • Aktive Bandsperre	272
6.2 • Aktive RC-Tiefpassfilter	273
6.3 • Aktive Tiefpass- und Hochpassfilter höherer Ordnung	285
6.3.1 • Aktives Tiefpassfilter 2. Ordnung	285
6.3.2 • Aktives Tief- und Hochpassfilter 2. Ordnung durch Mitkopplung	285
6.3.3 • Berechnungsbeispiele für aktive Tiefpassfilter	287
6.3.4 • Umwandlung eines aktiven Tiefpassfilters in ein aktives Hochpassfilter	289
6.3.5 • Tiefpass 3. Ordnung	291
6.3.6 • Hochpass 3. Ordnung	293
6.3.7 • Tiefpass 4. Ordnung	294
6.3.8 • Übertragungsfunktionen eines Filters	295
6.4 • Aktive Bandpass- und Bandsperrfilter	302
6.4.1 • Bandpässe und Bandsperren 1. Ordnung	304
6.4.2 • Selektives Filter zweiter Ordnung	305
6.4.3 • Aktive Bandsperre mit T-Filter	306
6.4.4 • Bandfilter mit Wienbrücke	307
6.4.5 • Kombierter Hoch-, Tief- und Bandpass	312
6.4.6 • Allpassfilter	313
7 • Zeitkontinuierliche IC-Filter	315
7.1 • Filtergenauigkeit und Filterentwurf	315
7.1.1 • Vergleich zwischen geschalteten und kontinuierlichen Filtern	316
7.1.2 • Ein-Verstärker-Filter nach „Sallen-Key“	319
7.1.3 • Multiverstärker-Filter nach „Tow-Thomas“	320
7.1.4 • Realisierung eines Tow-Universalfilters	323
7.1.5 • Programmierung eines Filters	324
7.2 • Digital einstellbare IC-Filter	326
7.2.1 • Universalfilter-Baustein UAF42	328
7.2.2 • Filterbetriebsarten	329
7.2.3 • Multiplizierender D/A-Wandler	331
7.3 • Universalfilter (State Variable Filter)	334
7.3.1 • Filterstruktur	335
7.3.2 • Übertragungsfunktion eines Universalfilters	336
7.3.3 • Praktische Ausführung eines Universalfilters	338
7.3.4 • Arbeiten mit „FILTER42“	340
7.4 • Aktive IC-Filter	342
7.4.1 • Interner Filteraufbau	342
7.4.2 • Berechnung eines Filterbeispiels	345
7.4.3 • Realisierung eines Bandsperrfilters	348
7.5 • Entstehung und Vermeidung von Alias-Signalen	349
7.5.1 • Nyquist-Frequenz	350
7.5.2 • Shannonsches Abtasttheorem	351
7.5.3 • Aliasing bei A/D-Wandlern	353
7.5.4 • Eigenschaften eines Anti-Aliasing-Tiefpassfilters	355

8 • Geschaltete IC-Filter	359
8.1 • Grundlagen der „Switched Capacitor Filter“	359
8.1.1 • SC-Filter 1. Ordnung	360
8.1.2 • SC-Integrator	361
8.1.3 • Schalter-Kondensator-Konfigurationen	363
8.1.4 • Analogschalter	364
8.1.5 • SC-Tiefpassfilter 2. Ordnung	366
8.2 • Geschaltete Kapazitätsfilter mit Mikroprozessorschnittstelle	366
8.2.1 • Filtereigenschaften	367
8.2.2 • Filterentwurf	368
8.2.3 • Programme zum Filterentwurf	372
8.2.4 • Innenschaltung des MAX260/1/2	373
8.2.5 • Schnittstelle zum Mikroprozessor	377
8.2.6 • Betriebsarten des Filters	378
8.2.7 • Beschreibung der Filterfunktionen	381
8.2.8 • Praktischer Filterentwurf	384
8.2.9 • Kaskadierung von Filtern	384
8.2.10 • Ausgangsamplitude und Amplitudenbegrenzung	386
8.2.11 • Grenzfrequenz und Güte bei niedrigen Abtastraten	388
8.2.12 • Entwurfsbeispiele	389
8.3 • Anschlussprogrammierbare geschaltete Kapazitätsfilter	394
8.3.1 • Innenschaltung	395
8.3.2 • Filterentwurf mittels Software	396
8.3.3 • Programmierung des Filters	397
8.3.4 • Betriebsarten der Filterfunktionen	398
8.3.5 • Bandpassfilter mit mehrfacher Rückkopplung	400
8.3.6 • Kaskadierung von Filtern	402
8.3.7 • Anschluss eines geschalteten Kapazitätsfilters	403
8.3.8 • Geschalteter Tschebyscheff-Bandpass 4.Ordnung	405
8.3.9 • Bandpass 4. Ordnung ohne Rückkopplung	407
8.4 • IC-Tiefpassfilter 5. Ordnung	409
8.4.1 • Funktionsweise und Innenschaltung des MAX280/LTC1062	409
8.4.2 • Interne und externe Taktsteuerung	410
8.4.3 • Anwendungshinweise	412
8.4.4 • Kaskadierung von Filterbausteinen	414
Literatur	415
Index	417