

Herbert Bernstein

Elektronica-zakboek

Alle belangrijke elektronicaformules
onder handbereik

$$\begin{aligned} \frac{I \cdot N}{l} &= \frac{\Phi}{l} & H &= \frac{\Phi}{l} & \frac{1}{[L]} &= \frac{1}{\text{H}z} & f &= \frac{1}{T} \\ I &= \oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0 & F_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} & I &= \sum I_n & \eta &= \frac{P}{P_{\text{ges}}} = \frac{R_a \cdot I^2}{(R_i + R_a) \cdot I^2} = \frac{R_a}{R_i \cdot 1 + \frac{R_a}{R_i}} = \frac{\frac{R_a}{R_i}}{1 + \frac{R_a}{R_i}} \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} & [\omega] &= \frac{2\pi}{s} = \frac{1}{s} & T &= \frac{1}{f} & [T] &= \frac{1}{\text{Hz}} = s \\ [R] &= \frac{V}{A} = \Omega & Z_p &= \frac{N_1}{N_2} \cdot Z_1 & R &= \frac{U}{I} & \omega_o &\equiv \sqrt{\frac{C_A + C_C}{L_B C_A C_C}} \\ Z_p &= \frac{N_1}{N_2} \cdot Z_1 & R &= \frac{U}{I} & \omega_o &= 1 / \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} \\ p &= S \cdot \cos \varphi & \frac{dw(t)}{dq(t)} &= v(t) & p(t) &= \frac{dw(t)}{dt} = \frac{dw(t)}{dq(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt} = v(t) \cdot i(t) \end{aligned}$$

Elektronica-zakboek
alle belangrijke elektronicaformules onder handbereik

Elektronica-zakboek

**alle belangrijke elektronicaformules
onder handbereik**

Herbert Bernstein

**Elektor International Media BV
postbus 11
6114 ZG Susteren
www.elektor.nl**

Elektronica-zakboek – alle belangrijke elektronicaformules onder handbereik
1^e druk: mei 2014

© 2014 Elektor International Media BV
website: www.elektor.nl

ISBN: 978-90-5381-281-5
NUR 950

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Alle rechten voorbehouden.

Ondanks alle aan de samenstelling van dit boek bestede zorg kunnen noch de auteur, noch de redactie, noch de uitgever aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele schade die zou kunnen voortvloeien uit enige fout die in deze uitgave zou kunnen voorkomen.

Voor zover het maken van reprografische verveelvoudiging uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16h Auteurswet 1912 dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl).

Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot de Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-pro.nl).

No part of this book may be reproduced, stored in a database or retrieval system, or published in any form or any way, electronically, mechanically, by print, photoprint, microfilm or any other means without prior permission from the Publisher.
All rights reserved.

Vertaling en bewerking: E.A.J. Bogers
Omslagontwerp: J. Opreij, Elektor International Media B.V.
Grafische vormgeving & produktie: Technisch Vertaalbureau Bogers, Völklingen (DE)
Druk: Wilco, Amersfoort

119013-1/NL

Inhoud

1	Gelijkstroomkringen	17
1.1	Wet van Ohm	17
1.1.1	Weerstand en geleiding (conductantie)	17
1.1.2	Stroomdichtheid	17
1.1.3	Elektrische lading (hoeveelheid elektriciteit)	18
1.1.4	Weerstand van draad	18
1.1.5	Weerstand en temperatuur	19
1.1.6	Spanningsval over leidingen	19
1.1.7	Serieschakeling van weerstanden	20
1.1.8	Parallelschakeling van weerstanden	20
1.1.9	Serieschakeling van weerstanden met verschillende temperatuurcoëfficiënten	21
1.1.10	Parallelschakeling van weerstanden met verschillende temperatuurcoëfficiënten	22
1.2	Spanningsdelers	22
1.2.1	Onbelaste spanningsdeler	22
1.2.2	Belaste spanningsdeler	22
1.2.3	Voltmeter met vergroot meetbereik	23
1.2.4	Ampèremeter met vergroot meetbereik	23
1.2.5	Brugschakeling (brug van Wheatstone)	24
1.2.6	Brugschakeling met sleepcontact	24
1.2.7	Knooppuntenwet (eerste wet van Kirchhoff)	25
1.2.8	Maaswet (tweede wet van Kirchhoff)	25
1.2.9	Driehoek-stertransformatie	26
1.2.10	Ster-driehoektransformatie	26
1.2.11	Belaste spanningsbron	26
1.2.12	Serieschakeling van spanningsbronnen (elementen)	27
1.2.13	Parallelschakeling van spanningsbronnen (elementen)	28
1.2.14	Equivalente spanningsbron	28
1.2.15	Equivalente stroombron	29
1.2.16	Wet van Faraday	30
1.3	Wetmatigheden in eenvoudige stroomkringen	31
1.3.1	Elektrisch vermogen	31
1.3.2	Elektrische arbeid	31
1.3.3	Rendement	32
1.3.4	Warmteontwikkeling	32
1.3.5	Vermogensmeting met een teller	33
1.3.6	Het elektrisch veld	33
1.3.7	Lading van een condensator	33
1.3.8	Energie in een geladen condensator	34

1.3.9	Diëlektrische verplaatsing of doorschuiving	34
1.3.10	Plaatcondensator	34
1.3.11	Cilindrische condensator	35
1.3.12	Kogelcondensator	35
1.3.13	Coaxiale kabel	36
1.3.14	Geleider boven massavlak	36
1.3.15	Parallelschakeling van condensatoren	36
1.3.16	Serieschakeling van condensatoren	37
1.3.17	Capaciteitsverandering van condensatoren bij verwarming	38
1.4	Magnetische velden	38
1.4.1	Magnetomotorische kracht	38
1.4.2	Magnetische veldsterkte	39
1.4.3	Magnetische inductie (fluxdichtheid) en magnetische flux	39
1.4.4	Magnetische weerstand en magnetische geleiding	40
1.4.5	Magnetische kring met luchtspleet (zonder strooiveld)	40
1.4.6	Kracht in het magnetische veld	41
1.4.7	Kracht op stroomvoerende geleiders in een magnetisch veld	41
1.4.8	Kracht tussen evenwijdige stroomvoerende geleiders	41
1.4.9	Inductie	42
1.4.10	Inductie bij beweging	42
1.4.11	Zelfinductie	42
1.4.12	Zelfinductie van spoelen	43
1.4.13	Energie in een stroomvoerende spoel	43
1.4.14	Serieschakeling van spoelen (zelfinducties)	43
1.4.15	Parallelschakeling van spoelen (zelfinducties)	44
1.4.16	Zelfinductie (coaxiale kabel)	45
1.4.17	Zelfinductie (geleider boven massavlak)	45
1.4.18	Zelfinductie (tweeaderige kabel)	46
1.5	Spoelen	46
1.5.1	Eenlaags cilinderspoel (solenoid)	46
1.5.2	Meerlaags cilinderspoel (solenoid)	46
1.5.3	Toroïde (zonder kern)	47
1.5.4	Tijdconstante van een spoel	47
1.5.5	Tijdconstante van een condensator	48
2	Wisselstroomkringen	49
2.1	Formules en karakteristieke grootheden	49
2.1.1	Frequentie, periodeduur en toerental	49
2.1.2	Momentane, top-, top-top- en effectieve waarde	49
2.1.3	Golfengte	50
2.1.4	Schijnbaar, effectief en wattloos vermogen	50
2.1.5	Capacitieve schijnweerstand (reactantie)	51

2.1.6	Serieschakeling van effectieve weerstand en capacatieve schijnweerstand	51
2.1.7	Parallelschakeling van effectieve weerstand en capacatieve schijnweerstand	52
2.1.8	Inductieve schijnweerstand (inductantie)	53
2.1.9	Serieschakeling van effectieve weerstand en inductieve schijnweerstand	53
2.1.10	Parallelschakeling van effectieve weerstand en inductieve schijnweerstand	54
2.1.11	Verliesfactor (condensator)	54
2.1.12	Verliesfactor (spoel)	55
2.1.13	Serieschakeing van effectieve weerstand, capacatieve en inductieve schijnweerstand	55
2.1.14	Parallelschakeling van effectieve weerstand, capacatieve en inductieve schijnweerstand	56
2.1.15	Seriekring	57
2.1.16	Parallelkring	58
2.1.17	Parallelkring met serie-verliesweerstand	59
2.2	Demping, versterking, niveau	59
2.2.1	Dempingsfactoren	59
2.2.2	Overdrachtsfactoren	60
2.2.3	Dempingsfactoren in bel	60
2.2.4	Dempingsfactoren in decibel	60
2.2.5	Overdrachtsfactoren in decibel	61
2.2.6	Dempingsfactor in neper	61
2.2.7	Relatief niveau	61
2.2.8	Absoluut niveau in decibel	61
2.2.9	Effectieve demping	62
2.2.10	Reflectiedemping	62
2.2.11	Overspraakdemping	62
2.2.12	Totale demping van een transmissieweg	63
2.2.13	Variabele resonantiefrequentie met draaicondensator	63
2.2.14	Variabele resonantiefrequentie met draaicondensator en parallelcondensator	64
2.2.15	Variabele resonantiefrequentie met draaicondensator en seriecondensator	64
2.3	RC-, RL en LC-kringen	64
2.3.1	RC-laagdoorlaatfilter	64
2.3.2	RC-hoogdoorlaatfilter	65
2.3.3	RL-laagdoorlaatfilter	65
2.3.4	RL-hoogdoorlaatfilter	65
2.3.5	LC-laagdoorlaatfilter (T- en π -netwerk)	66
2.3.6	LC-hoogdoorlaatfilter (T- en π -netwerk)	67
2.4	Transformatoren	68
2.4.1	Transformatorverliezen	69
2.4.2	Kortsluitvastheid van een transformator	69

2.5	Blokgolven	70
2.5.1	Effectieve waarde van een blokgolf	70
2.5.2	Differentiator	71
2.5.3	Integrator	71
2.5.4	RC-banddoorlaatfilter (brug van Wien)	71
2.5.5	Fasedraaier of fasebrug	72
2.5.6	LC-kring	72
2.5.7	LC-kring (T- en π -netwerk)	72
2.5.8	LC-vertragsingslijn	73
2.5.9	Laagdoorlaat-duo-netwerk	73
2.5.10	LC-banddoorlaatfilter	74
2.5.11	LC-bandsperfilter	75
2.5.12	CL-kring	75
2.5.13	Hoogdoorlaat-duo-netwerk	76
2.5.14	Fourier-reeksen	77
2.5.15	Golfweerstand	79
2.6	Karakteristieke grootheden van leidingen	80
2.6.1	Golfweerstand, dempingsfactor, voortplantingssnelheid (kabel)	80
2.6.2	Golfweerstand (hoogfrequent-leiding of -kabel)	81
2.6.3	Reflectiecoëfficiënt	81
2.6.4	Reflectiedemping	81
2.6.5	Golfweerstand in de praktijk	82
2.6.6	Vervormingsfactor	83
2.6.7	Vervorming in decibel	83
2.6.8	Skin-effect	84
2.6.9	Inductieve verhitting	84
2.6.10	Ruis	85
2.7	Akoestiek	85
2.7.1	Golflengte van geluidsgolven	85
2.7.2	Geluidssnelheid in vaste stoffen	86
2.7.3	Geluidssnelheid in vloeistoffen	86
2.7.4	Geluidssnelheid in gassen	86
2.7.5	Geluidssnelheid in lucht	86
2.7.6	Geluidsdruk	87
2.7.7	Akoestische impedantie	87
2.7.8	Geluidsvermogen, geluidsintensiteit	88
2.7.9	Geluidsdrukniveau	88
2.7.10	Luidheidsniveau	88
2.7.11	Luidspreker-scheidingsfilter (6 dB per octaaf)	88
2.7.12	Luidspreker-scheidingsfilter (12 dB per octaaf)	89
2.7.13	Gevoeligheid van luidsprekers	89
2.7.14	Reikwijdte van een luidspreker	90

3	Dioden	91
3.1	Basisberekeningen	91
3.1.1	Dissipatie in een diode	91
3.1.2	Toelaatbare dissipatie in een diode	91
3.1.3	Statische diodeweerstand (gelijkstroomweerstand)	91
3.1.4	Dynamische diodeweerstand (wisselstroomweerstand)	92
3.1.5	Temperatuurgedrag van dioden	92
3.2	Berekening van diodeschakelingen	93
3.2.1	Spanningsbegrenzing	93
3.2.2	Diode als schakelaar	93
3.3	Gelijkrichtschakelingen	94
3.3.1	Eenfasige enkelzijdige gelijkrichter	94
3.3.2	Tweefasige enkelzijdige gelijkrichter	94
3.3.3	Eenfasige dubbelzijdige gelijkrichter (bruggelijkrichter)	95
3.3.4	Driefasige enkelzijdige gelijkrichter	95
3.3.5	Driefasige dubbelzijdige gelijkrichter (bruggelijkrichter)	96
3.3.6	Rekenkudig gemiddelde (gelijkstroom, ohmse belasting)	96
3.3.7	Stroombelastbaarheid	96
3.3.8	Sperspanning	97
3.4	Afvlakking	98
3.4.1	Eenfasige enkelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator	98
3.4.2	Tweefasige enkelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator	98
3.4.3	Eenfasige dubbelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator	99
3.4.4	RC-afvlakking	99
3.4.5	LC-afvlakking	100
3.4.6	Spanningsverdubbeling (Delon-schakeling)	100
3.4.7	Spanningsverdubbeling (Villard-schakeling)	100
3.4.8	Spanningsvermenigvuldiging (Villard-schakeling)	101
3.5	Spanningsstabilisatie met een zenerdiode	101
3.5.1	Onbelaste stabilisatieschakeling	101
3.5.2	Belaste stabilisatieschakeling	101
3.5.3	Differentiaalweerstand van een zenerdiode	102
3.5.4	Afvlakfactor	102
3.5.5	Stabilisatiefactor	102
3.6	Capaciteitsdiode	103
3.7	Tunneldiode	104

4	Bipolaire transistoren	105
4.1	Karakteristieken en parameters	105
4.1.1	Spanning, stroom, versterking	105
4.1.2	Vierpool-parameters	107
4.1.3	Bedrade vierpool (gemeenschappelijke-emitterschakeling)	108
4.1.4	y-parameters van de gemeenschappelijke-emitterschakeling	110
4.1.5	h- en y-parameters	110
4.1.6	Disspatie (verliesvermogen)	113
4.1.7	Instelling van het werkpunt	113
4.1.8	Belastingslijn voor gelijk- en wisselstroom	115
4.2	Kleinsignaalversterking	115
4.2.1	Gemeenschappelijke-emitterschakeling	115
4.2.2	Gemeenschappelijke-basisschakeling	116
4.2.3	Gemeenschappelijke-collectorschakeling	117
4.2.4	Stroomtegenkoppeling	117
4.2.5	Spanningstegenkoppeling	118
4.2.6	Koppelcondensatoren	118
4.3	De transistor als schakelaar	119
4.3.1	Astabiele multivibrator	120
4.3.2	Monostabiele multivibrator	121
4.3.3	Bistabiele multivibrator (flipflop)	121
4.3.4	Schmitt-trigger (drempelwaardeschakelaar)	121
4.4	Sinusgeneratoren (oscillatoren)	122
4.4.1	RC-hoogdoorlaat-fasedraaier	122
4.4.2	RC-laagdoorlaat-fasedraaier	122
4.4.3	RC-Wienbrug-oscillator	122
4.4.4	LC-oscillator (Meißner-oscillator)	123
4.4.5	LC-oscillator (Hartley-oscillator)	123
4.4.6	LC-oscillator (tegenfase-Hartley-oscillator)	124
4.4.7	LC-oscillator (Colpitts-oscillator I)	124
4.4.8	LC-oscillator (Colpitts-oscillator II)	124
4.4.9	LC-oscillator (ECO-oscillator)	125
4.4.10	Kristaloscillator voor lage frequenties	125
4.4.11	Kristaloscillator voor hoge frequenties	126
4.4.12	Kristaloscillator voor zeer hoge frequenties	126
4.5	Terugkoppeling	126
4.5.1	Inductieve koppeling bij kleinsignaalversterkers	126
4.5.2	Capacitieve koppeling bij kleinsignaalversterkers	127
4.5.3	Darlingtonschakeling	128
4.5.4	Gemeenschappelijke-emitterschakeling met stroomtegenkoppeling	128
4.5.5	Gemeenschappelijke-emitterschakeling met spanningstegenkoppeling	129

4.5.6	Bootstrapschakeling	129
4.5.7	Tweetraps bootstrapschakeling	130
4.6	Vermogensversterkers	130
4.6.1	Klasse-A versterker (emitterschakeling)	130
4.6.2	Klasse-B versterker (balansschakeling)	131
4.6.3	Klasse-AB versterker (symmetrische voedingsspanning)	131
4.6.4	Klasse-AB versterker (enkelzijdige voedingsspanning)	132
4.6.5	Cascodeschakeling	132
4.7	Spannings- en stroombronnen	133
4.7.1	Constante-spanningsbron	133
4.7.2	Constante-stroombron	133
4.7.3	Verschilversterker	133
4.7.4	Warmteweerstand	134
4.7.5	Uni-junctie-transistor	134
4.7.6	Uni-junctie-transistor als zaagtandgenerator	135
5	FET's en MOSFET's	137
5.1	Veldeffect-transistoren (FET's)	137
5.1.1	Gemeenschappelijke-sourceschakeling	137
5.1.2	Gemeenschappelijke-drainschakeling	138
5.1.3	Gemeenschappelijke-gateschakeling	139
5.1.4	Constante-stroombron	139
5.1.5	Blokgolfgenerator	139
5.1.6	Monostabiele multivibrator	140
5.1.7	Wisselspanningsversterker	140
5.2	MOSFET's	141
5.2.1	Gemeenschappelijke-sourceschakeling	141
5.2.2	Gemeenschappelijke-drainschakeling	142
5.2.3	Gemeenschappelijke-gateschakeling	142
6	Speciale componenten	143
6.1	Thermistoren	143
6.1.1	NTC-weerstanden	143
6.1.2	Meet- en compensatie-thermistors	144
6.1.3	PTC-weerstanden	144
6.2	Magnetisch gevoelige componenten	144
6.2.1	Hall-generator	144
6.2.2	Magnetisch gevoelige weerstanden	145
6.2.3	Spanningsafhankelijke weerstand (VDR)	145
6.2.4	Peltier-element	146
6.3	Opto-elektronische componenten	146
6.3.1	Golflengte van licht	146
6.3.2	Lichtgevoelige weerstand (LDR)	147
6.3.3	Fotodiode	148

6.3.4	Fototransistor	148
6.3.5	Foto-voltaïsche cel	148
6.3.6	Vacuüm-fotocel	149
6.3.7	Gasgevulde fotocel	149
6.3.8	Fotomultiplicatorbuis	150
6.3.9	Licht: grootheden en eenheden	151
6.3.10	LED (lichtgevende diode)	151
6.3.11	Optocoupler	152
7	Operationele versterkers	153
7.1	Basisschakelingen	153
7.1.1	Inverterende versterker	153
7.1.2	Niet-inverterende versterker	153
7.1.3	Impedantietransformator	153
7.1.4	Verschilversterker	154
7.1.5	Optelschakeling (sommeerversterker)	154
7.1.6	Aftrekschakeling	154
7.1.7	Integrator	155
7.1.8	Differentiator	155
7.1.9	Instrumentatieversterker	155
7.2	Comparator en Schmitt-trigger	156
7.2.1	Inverterende nuldoorgangsdetector	156
7.2.2	Niet-inverterende nuldoorgangsdetector	156
7.2.3	Analoge comparator met hysteresis	156
7.2.4	Inverterende Schmitt-trigger	157
7.2.5	Niet-inverterende Schmitt-trigger	157
7.2.6	Continu regelbare versterking	158
7.2.7	Gyrator	158
7.2.8	Negatieve impedantie (kortsluitstabil)	158
7.2.9	Negatieve impedantie (openstabil)	158
7.3	Opamp-omzetters	159
7.3.1	Inverterende stroom-spanningomzetter	159
7.3.2	Inverterende stroomversterker	159
7.3.3	Wisselspanningsversterker met driftcompensatie	159
7.3.4	Bootstrap-wisselspanningsversterker	160
7.3.5	Constance-spanningsbron	160
7.3.6	Constance-stroombron	161
7.3.7	Lineaire enkelzijdige gelijkrichter	162
7.3.8	Dubbelzijdige precisie-gelijkrichter	162
7.3.9	Logaritmische versterker met diode	163
7.3.10	Logaritmische versterker met transistor	163
7.4	Opamp-generatoren	164
7.4.1	Blokgolfgenerator	164
7.4.2	Driehoek/blokgolfgenerator (functiegenerator)	164
7.4.3	Zaagtandgenerator	164
7.4.4	Sinusgenerator met Wien-Robinson-brug	165

7.4.5	Sinusgenerator met laagdoorlaat-fasedraaier	165
7.4.6	Sinusgenerator met hoogdoorlaat-fasedraaier	165
7.5	Actieve laag- en hoogdoorlaatfilters	166
7.5.1	Actief 1 ^e -orde laagdoorlaatfilter	166
7.5.2	Actief 1 ^e -orde hoogdoorlaatfilter	166
7.5.3	Actief 2 ^e -orde laagdoorlaatfilter	167
7.5.4	Filtercoëfficiënten voor een geoptimaliseerde frequentiekaracteristiek	168
7.5.5	Actief 3 ^e -orde laagdoorlaatfilter	168
7.5.6	Actief 4 ^e -orde laagdoorlaatfilter	169
7.5.7	Omrekenen van laagdoorlaat- naar hoogdoorlaatfilter	170
7.5.8	Selectief 2 ^e -orde banddoorlaatfilter	171
7.5.9	Selectief 2 ^e -orde bandsperfilter	171
7.5.10	All-pass-filter	171
7.6	Regeltechniek	172
7.6.1	Regelkring	172
7.6.2	Regelsystemen	173
7.6.3	Proportionele regelaar (P-regelaar)	175
7.6.4	Integrerende regelaar (I-regelaar)	175
7.6.5	Differentiërende regelaar (D-regelaar)	176
7.6.6	Proportionele differentiërende regelaar (PD-regelaar)	176
7.6.7	Proportionele integrerende regelaar (PI-regelaar)	177
7.6.8	Proportionele integrerende differentiërende regelaar (PID-regelaar)	177
7.6.9	Tweepuntsregelaar	178
7.6.10	Driepuntsregelaar	178
8	Vermogenselektronica	179
8.1	Vierlagendiode	179
8.1.1	Zaagtandgenerator met vierlagendiode	179
8.1.2	Zaagtandgeneratoren met UJT en FET	179
8.2	Thyristor en triac	180
8.2.1	Fase-aansnijding met thyristor	180
8.2.2	Fase-aansnijding met triac	180
8.2.3	Thyristor plus diac	181
8.2.4	Thyristor plus complementaire transistoren	181
8.2.5	Thyristor plus gelijkstroomontsteking	181
8.2.6	Thyristor plus wisselstroomontsteking	182
8.2.7	Rate-effect	182
8.2.8	Ontsteken en doven met gelijkstroom	183
8.2.9	Thyristor met snubber-netwerk	183
8.2.10	Periodesturing (burst)	184

9	Meettechniek	185
9.1	Nauwkeurigheid van meetinstrumenten	185
9.1.1	Uitbreiding van het meetbereik (spanning)	186
9.1.2	Uitbreiding van het meetbereik (stroom)	187
9.1.3	Karakteristieken van golfvormen	187
9.2	Spanning- en stroommeting met meetomzetters	189
9.3	Vermogensmeting:	
	schijnbaar en effectief vermogen	189
9.3.1	Stroomfoutmethode: $R_{iU} \gg R$	189
9.3.2	Spanningsfoutmethode: $R_{iI} \ll R$	190
9.3.3	Vermogensmeting: blind vermogen	190
9.3.4	Weerstandsmeting	190
9.3.5	Weerstandsmeter met uitlezing in ohm	191
9.3.6	Brugschakeling met sleepcontact	191
9.3.7	Metten aan spanningsdelers	192
9.4	Capaciteitsmeting	192
9.4.1	Meting van wisselspanning en -stroom	192
9.4.2	Spanningsvergelijking	193
9.4.3	Brugschakeling (signaalminimum)	193
9.4.4	Resonantiemethode	193
9.5	Meting van zelfinducties	194
9.5.1	Meting van wisselspanning en -stroom	194
9.5.2	Brugschakeling (signaalminimum)	194
9.5.3	Resonantiemethode	194
9.6	Meting van het elektrische vermogen	195
9.7	Meetbruggen voor wisselspanning	197
9.7.1	Brug van Wheatstone	197
9.7.2	Brug van Thomson	197
9.7.3	Eenvoudige capaciteitsmeetbrug	198
9.7.4	Capaciteitsmeetbrug van Schering	198
9.7.5	Zelfinductiemeetbrug van Maxwell	198
9.7.6	Zelfinductiemeetbrug van Maxwell-Wien	199
9.7.7	Zelfinductiemeetbrug van Maxwell-Wien (frequentie-onafhankelijk)	199
9.7.8	Meting van de vervormingsfactor (eenpoort-techniek)	199
9.8	Metten met de oscilloscoop	200
9.8.1	Spanningsmeting	200
9.8.2	Vergelijking van frequenties met de oscilloscoop	201
9.8.3	Faseverschilmeting met de oscilloscoop	201
9.8.4	Faseverschilmeting met de oscilloscoop (Lissajous)	202
9.8.5	Meting van de bandbreedte	202
9.8.6	Meting van versterkingsfactoren	203
9.8.7	Meting van de ingangsweerstand	203
9.8.8	Meting van de uitgangsweerstand	204
9.8.9	Meting van de intermodulatiegraad	204
9.8.10	Meting van de lineariteitsfout	204

10	Digitale techniek	207
10.1	Betekenis van binaire signaalwaarden	207
10.1.1	Talstelsels	207
10.1.2	Decimaal talstelsel	207
10.1.3	Duaal / binair talstelsel	208
10.1.4	Octaal talstelsel	208
10.1.5	Hexadecimaal talstelsel	208
10.1.6	Omrekening decimaal → duaal / binair	208
10.1.7	Omrekening decimaal → octaal	208
10.1.8	Omrekening decimaal → hexadecimaal	209
10.1.9	Omrekening binair → octaal	209
10.1.10	Omrekening binair → hexadecimaal	209
10.2	Bits en bytes	209
10.2.1	Integer (binair getal met teken)	210
10.2.2	Ordinaal (tekenloos binair getal)	211
10.2.3	Drijvende-komma-getallen (floating point)	211
10.3	Logische basisfuncties	212
10.3.1	Identiteit	212
10.3.2	Negatie, (NIET, NOT)	212
10.3.3	Conjunctie (EN, AND)	212
10.3.4	Disjunctie (OF, OR)	213
10.4	Afgeleide schakelfuncties	213
10.4.1	NAND (NIET-EN, NOT-AND)	213
10.4.2	NOR (NIET-OF, NOT-OR)	213
10.4.3	Equivalentie (exclusief-NOF, EXNOR)	214
10.4.4	Antivalentie (exclusief-OF, EXOR)	214
10.4.5	Implicatie	214
10.4.6	Inhibitie	215
10.4.7	Basisregels van de schakelalgebra	215
10.4.8	Minimaliseren met Karnaugh-diagrammen	216
10.5	Flipflops (bistabiele multivibratoren)	218
10.5.1	Niveaugestuurde RS-flipflop	218
10.5.2	Flankgestuurde JK-flipflop	218
10.5.3	Niveaugestuurde D-flipflop	218
10.5.4	Flankgestuurde JK-master-slave-flipflop	219
10.5.5	Flankgestuurde T-flipflop	219
16.6	Belastbaarheid van TTL-componenten	219
10.7	Digitale schakelaars	220
10.7.1	Aan/uit-schakelaar (normally open – in rust open)	220
10.7.2	Aan/uit-schakelaar (normally closed – in rust gesloten)	220
10.7.3	Wisselschakelaar (omschakelaar)	221
10.8	Monostabiele multivibratoren	221
10.8.1	TTL-monoflop met NAND-poorten	221
10.8.2	TTL-monoflop met NOR-poorten	221
10.8.3	TTL-monoflop met NOR- en NOT-poorten	221
10.8.4	TTL-monoflop met NAND- en NOT-poorten	222
10.8.5	TTL-monoflop met terugkoppeling	222

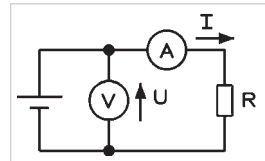
10.9	Astabilee multivibratoren	222
10.9.1	Blokgolfgenerator met NAND-poorten	222
10.9.2	Blokgolfgenerator met NOR-poorten	223
10.9.3	Teruggekoppelde blokgolfgenerator	223
10.9.4	Teruggekoppelde blokgolfgenerator met kristal	223
10.9.5	Blokgolfgenerator met TTL-Schmitt-trigger	224
10.10	Asynchrone frequentiedelers/tellers	224
10.10.1	Frequentiedeler/teller 1:2	224
10.10.2	Frequentiedeler/teller 1:4	225
10.10.3	Frequentiedeler/teller 1:8	225
10.10.4	Frequentiedeler/teller 1:16	225
10.10.5	Frequentiedeler/teller 1:3	226
10.10.6	Frequentiedeler/teller 1:5	226
10.10.7	Frequentiedeler/teller 1:6	227
10.10.8	Frequentiedeler/teller 1:7	227
10.10.9	Frequentiedeler/teller 1:10	227
10.10.10	2-bit omlaagteller	228
10.10.11	2-bit omhoog-/omlaagteller	228
10.10.12	4-bit omlaagteller	228
10.11	Synchrone omhoogtellers	228
10.11.1	Synchrone 4-bit teller met paralleloverdracht	228
10.11.2	Synchrone BCD-teller met paralleloverdracht	229
10.12	Schuifregisters	229
10.12.1	Serieel in, parallel uit	229
10.12.2	Parallel in, parallel uit	230
10.12.3	Parallel in, serieel uit	230
10.12.4	Serieel in, serieel uit	230
10.13	7-segment decoder/driver	231
10.14	Schakelingen met het timer-IC 555	231
10.14.1	Blokgolfgenerator met de 555	231
10.14.2	Monoflop met de 555	232
10.14.3	Schmitt-trigger met de 555	233
10.14.4	Symmetrische blokgolf met de 555	233
10.14.5	Blokgolfgenerator met instelbare duty cycle	233
10.15	Digitaal rekenen	234
10.15.1	Halve opteller	234
10.15.2	Volle opteller	234
10.15.3	Opteller voor binaire code	235
10.15.4	Halve aftrekker	235
10.15.5	Volle aftrekker	235
10.15.6	Aftrekken door middel van 2^n-1 -complement	236
10.15.7	Aftrekken door middel van 2^n -complement	236
10.15.8	Vermenigvuldiger	237
10.15.9	Vermenigvuldigingsalgoritme	237
10.15.10	Delingsalgoritme	238
	Index	241

1 Gelijkstroomkringen

1.1 Wet van Ohm

$$I = \frac{U}{R}$$

I stroom in A (ampère)
 U spanning in V (volt)
 R weerstand in Ω (ohm)



Figuur 1.1

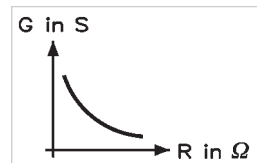
Voorbeeld: $U = 2,3 \text{ V}$; $R = 1 \text{ k}\Omega$; $I = ?$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{2,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 2,3 \text{ mA}$$

1.1.1 Weerstand en geleiding (conductantie)

$$R = \frac{1}{G}$$

R weerstand in Ω
 G geleiding in S (siemens) of mho*



Figuur 1.2

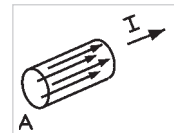
Voorbeeld: $R = 100 \Omega$; $G = ?$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{100 \Omega} = 10 \text{ mS}$$

1.1.2 Stroomdichtheid

$$J = \frac{I}{A}$$

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$



Figuur 1.3

* In het Amerikaanse taalgebied.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot J}} = 1,13 \cdot \sqrt{A}$$

J	stroombichtheid in A/mm ²
I	stroom in A
A	draaddoorsnede in mm ²
d	draaddiameter in mm

Voorbeeld: $I = 10 \text{ A}$; $A = 1,5 \text{ mm}^2$; $J = ?$

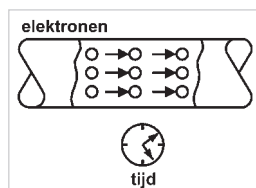
$$J = \frac{10 \text{ A}}{1,5 \text{ mm}^2} = 6,66 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

1.1.3 Elektrische lading (hoeveelheid elektriciteit)

$$Q = I \cdot t$$

$$1 \text{ C} = 1 \text{ As} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$$

Q	lading in C (coulomb)
I	stroom in A
t	tijd in s



Figuur 1.4

Voorbeeld: $I = 1 \text{ A}$; $t = 60 \text{ s}$; $Q = ?$

$$Q = I \cdot t = 1 \text{ A} \cdot 60 \text{ s} = 60 \text{ As}$$

1.1.4 Weerstand van draad

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\gamma \cdot A}$$

$$\rho = \frac{1}{\gamma}$$

R	weerstand in Ω
l	draadlengte in m
ρ	soortelijke elektrische weerstand in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
γ	soortelijke elektrische geleiding in $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$
A	draaddoorsnede in mm ²
α	temperatuurcoëfficiënt in 1/K

Materiaal	Soortelijke weerstand ρ	Soortelijke geleiding γ	Temperatuurcoëfficiënt α
zilver	0,0164	61	0,0038
koper	0,01724	58	0,00393
aluminium	0,0278	36	0,00403
ijzer	0,13	7,7	0,0065
constantaan	0,5	2	$\pm 0,00001$

Voorbeeld: koperdraad met $A = 1 \text{ mm}^2$; $l = 50 \text{ m}$; $R = ?$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0,01724 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 50 \text{ m}}{1 \text{ mm}^2} = 0,862 \Omega$$

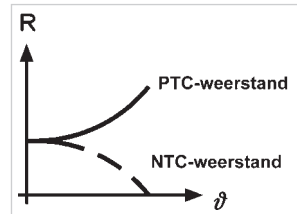
1.1.5 Weerstand en temperatuur

$$\Delta R = \alpha \cdot R_k \cdot \Delta \vartheta$$

$$R_w = R_k + \Delta R = R_k \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$$

$$\Delta \vartheta = \frac{R_w - R_k}{R_k \cdot \alpha}$$

- ΔR weerstandsverandering in Ω
 R_k 'koude' weerstand bij 20°C in Ω
 R_w 'warme' weerstand in Ω
 α temperatuurcoëfficiënt in $1/\text{K}$
 $\Delta \vartheta$ temperatuurverandering
 NTC negatieve temperatuurcoëfficiënt
 PTC positieve temperatuurcoëfficiënt



Figuur 1.5

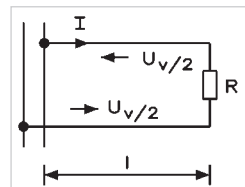
Voorbeeld: $R_k = 100 \Omega$; $\Delta \vartheta = 50 \text{ K}$; $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$; $R_w = ?$

$$R_w = 100 \Omega \cdot \left(1 + 0,004 \frac{1}{\text{K}} \cdot 50 \text{ K} \right) = 120 \Omega$$

1.1.6 Spanningsval over leidingen

$$U_v = R_{ld} \cdot I$$

$$U_v = \frac{2 \cdot l \cdot I}{\gamma \cdot A}; \quad u_v = \frac{U_v \cdot 100}{U}$$



Figuur 1.6

U_v	spanningsval in V
R_{ld}	leidingsweerstand in Ω
I	stroom in A
l	enkelvoudige lengte van de leiding
γ	soortelijke geleiding in $m/\Omega \cdot mm^2$
A	doorsnede van de leiding in mm^2
u_v	spanningsval in %
U	nominale spanning in V

Voorbeeld: $R_{ld} = 1,5 \Omega$; $I = 6 A$; $U_v = ?$

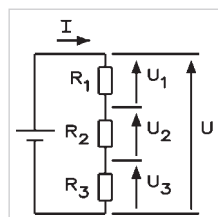
$$U_v = R_{ld} \cdot I = 1,5 \Omega \cdot 6 A = 9 V$$

1.1.7 Serieschakeling van weerstanden

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots; \quad R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

I	stroom door de serieschakeling in A
U_1, U_2, U_3	deelspanningen in V
R_1, R_2, R_3	afzonderlijke weerstanden in Ω



Figuur 1.7

Voorbeeld: $U_1 = 10 V$; $U_2 = 20 V$; $U_3 = 30 V$;
 $R_1 = 20 \Omega$; $R_2 = 40 \Omega$; $R_3 = 60 \Omega$; $U = ?$; $R = ?$

$$U = 10 V + 20 V + 30 V = 60 V; \quad R = 20 \Omega + 40 \Omega + 60 \Omega = 120 \Omega$$

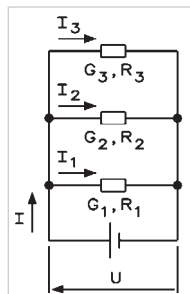
1.1.8 Parallelschakeling van weerstanden

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

I	totale stroom in A
I_1, I_2, I_3	deelstromen in A
G	totale conductantie in S of mho
G_1, G_2, G_3	deelconductanties in S of mho



Figuur 1.8

R totale weerstand in Ω
 R_1, R_2, R_3 afzonderlijke weerstanden in Ω

Bij parallelschakeling van twee weerstanden geldt:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_1 = \frac{R_2 \cdot R}{R_2 - R}$$

Bij parallelschakeling van n gelijke weerstanden geldt:

$$R = \frac{R_n}{n}$$

n aantal parallelgeschakelde (gelijke) weerstanden

Voorbeeld: $U = 10 \text{ V}$; $R_1 = 10 \Omega$; $R_2 = 20 \Omega$; $R = ?$; $G = ?$; $I = ?$

$$R = \frac{10 \Omega \cdot 20 \Omega}{10 \Omega + 20 \Omega} = 6,67 \Omega$$

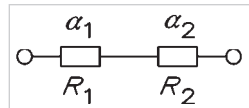
$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{6,67 \Omega} = 0,15 \text{ S}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10 \text{ V}}{6,67 \Omega} = 1,5 \text{ A}$$

1.1.9 Serieschakeling van weerstanden met verschillende temperatuurcoëfficiënten

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \cdot R_1 + \alpha_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

α totale temperatuurcoëfficiënt in $1/\text{K}$
 α_1, α_2 temperatuurcoëfficiënten in $1/\text{K}$
 R_1, R_2 afzonderlijke weerstanden in Ω



Figuur 1.9

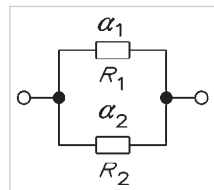
Voorbeeld: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $\alpha_1 = 0,004 \text{ K}^{-1}$;
 $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$; $\alpha_2 = 0,02 \text{ K}^{-1}$; $\alpha = ?$

$$\alpha = \frac{0,004 \text{ K}^{-1} \cdot 1 \text{ k}\Omega + 0,02 \text{ K}^{-1} \cdot 2 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 0,0147 \text{ K}^{-1}$$

1.1.10 Parallelschakeling van weerstanden met verschillende temperatuurcoëfficiënten

$$\alpha = R \cdot \frac{\alpha_1 \cdot R_2 + \alpha_2 \cdot R_1}{R_1 \cdot R_2}$$

α totale temperatuurcoëfficiënt in K^{-1}
 R totale weerstand in Ω
 α_1, α_2 temperatuurcoëfficiënten in K^{-1}
 R_1, R_2 afzonderlijke weerstanden in Ω



Figuur 1.10

Voorbeeld: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $\alpha_1 = 0,004 \text{ K}^{-1}$;
 $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$; $\alpha_2 = 0,02 \text{ K}^{-1}$; $\alpha = ?$

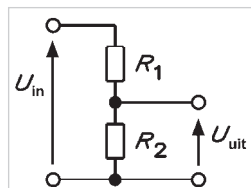
$$\alpha = 0,666 \text{ k}\Omega \cdot \frac{0,004 \text{ K}^{-1} \cdot 2 \text{ k}\Omega + 0,02 \text{ K}^{-1} \cdot 1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ k}\Omega} = 0,0093 \text{ K}^{-1}$$

1.2 Spanningsdelers

1.2.1 Onbelaste spanningsdeler

$$U_{\text{uit}} = U_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = R_2 \cdot \left(\frac{U_{\text{in}}}{U_{\text{uit}}} - 1 \right)$$



Figuur 1.11

U_{in} ingangsspanning in V
 U_{uit} uitgangsspanning in V
 R_1, R_2 afzonderlijke weerstanden in Ω

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 10 \text{ V}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$; $U_{\text{uit}} = ?$

$$U_{\text{uit}} = 10 \text{ V} \cdot \frac{2 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 6,67 \text{ V}$$

1.2.2 Belaste spanningsdeler

$$U_{\text{uit}} = U_{\text{in}} \cdot \frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L}$$

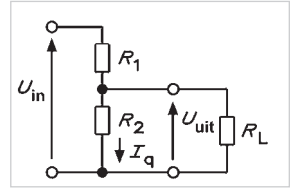
$$R_2 \parallel R_L = \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}$$

R_L belastingweerstand in Ω

Voorbeeld: $U_{in} = 10 \text{ V}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$;
 $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$; $R_L = 10 \text{ k}\Omega$; $U_{uit} = ?$

$$R_2 \parallel R_L = \frac{2 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} = 1,67 \text{ k}\Omega$$

$$U_{uit} = 10 \text{ V} \cdot \frac{1,67 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 1,67 \text{ k}\Omega} = 6,24 \text{ V}$$



Figuur 1.12

1.2.3 Voltmeter met vergroot meetbereik

$$R_V = \frac{U - U_M}{I_M}$$

$$R_V = (n - 1) \cdot R_M$$

$$n = \frac{U}{U_M}$$

R_V voorschakelweerstand

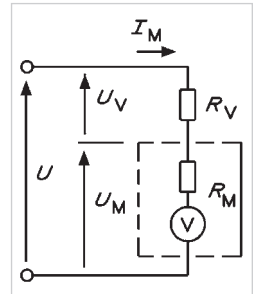
U te meten spanning

U_M nominaal meetbereik

I_M stroom door het instrument bij volle uitslag

R_M weerstand van het meetinstrument

n vermenigvuldigingsfactor



Figuur 1.13

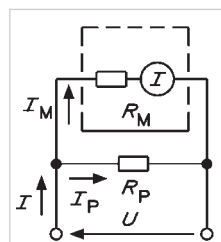
Voorbeeld: $U_M = 3 \text{ V}$; $R_M = 3 \text{ k}\Omega$; $U = 30 \text{ V}$; $R_V = ?$

$$n = \frac{30 \text{ V}}{3 \text{ V}} = 10 \rightarrow R_V = (10 - 1) \cdot 3 \text{ k}\Omega = 27 \text{ k}\Omega$$

1.2.4 Ampèremeter met vergroot meetbereik

$$R_P = \frac{U}{I - I_M}; \quad R_P = \frac{R_M}{(n - 1)} = \frac{R_M \cdot I_M}{I - I_M}; \quad n = \frac{I}{I_M}$$

R_P	parallel- of shuntweerstand
U	spanning over het meetinstrument
I	te meten stroom
I_M	stroom door het instrument bij volle uitslag
R_M	weerstand van het meetinstrument
n	vermenigvuldigingsfactor



Figuur 1.14

Voorbeeld: $I_M = 0,3 \text{ A}$; $R_M = 6 \text{ } \Omega$; $I = 3 \text{ A}$; $R_P = ?$

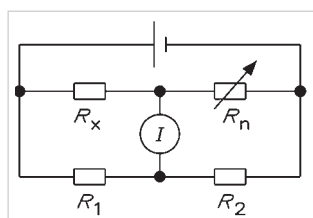
$$n = \frac{3 \text{ A}}{0,3 \text{ A}} = 10 \rightarrow R_P = \frac{6 \text{ } \Omega}{(10 - 1)} = 0,67 \text{ } \Omega$$

1.2.5 Brugschakeling (brug van Wheatstone)

Bij evenwicht ($I = 0$) geldt:

$$\frac{R_x}{R_n} = \frac{R_1}{R_2} \rightarrow R_x = \frac{R_n \cdot R_1}{R_2}$$

R_x onbekende weerstand
 R_n vergelijkweerstand
 R_1, R_2 brugweerstand



Figuur 1.15

Voorbeeld: $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_n = 500 \text{ } \Omega$; $R_x = ?$

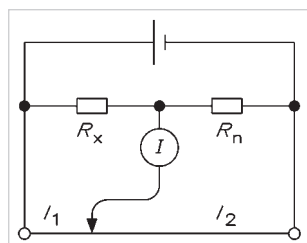
$$R_x = \frac{500 \text{ } \Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 500 \text{ } \Omega$$

1.2.6 Brugschakeling met sleepcontact

Bij evenwicht ($I = 0$) geldt:

$$\frac{R_x}{R_n} = \frac{l_1}{l_2} \rightarrow R_x = \frac{R_n \cdot l_1}{l_2}$$

R_x onbekende weerstand
 R_n vergelijkweerstand
 l_1, l_2 deellengtes weerstandsdraad



Figuur 1.16

Voorbeeld: $R_n = 1 \text{ k}\Omega$;
 $l_1 = 20 \text{ cm}$; $l_2 = 30 \text{ cm}$; $R_x = ?$

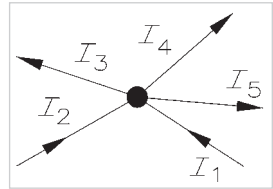
$$R_x = \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 20 \text{ cm}}{30 \text{ cm}} = 666 \text{ } \Omega$$

1.2.7 Knooppuntenwet (eerste wet van Kirchhoff)

In een knooppunt geldt:

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{uit}}$$

In woorden: de som van de stromen *in* het knooppunt is gelijk aan de som van de stromen *uit* het knooppunt.



Figuur 1.17

Voorbeeld: $I_1 = 3 \text{ A}$; $I_2 = 1 \text{ A}$; $I_3 = 0,5 \text{ A}$; $I_4 = 1,5 \text{ A}$; $I_5 = ?$

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{uit}}$$

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

$$I_5 = I_1 + I_2 - I_3 - I_4$$

$$= 3 \text{ A} + 1 \text{ A} - 0,5 \text{ A} - 1,5 \text{ A}$$

$$= 2 \text{ A}$$

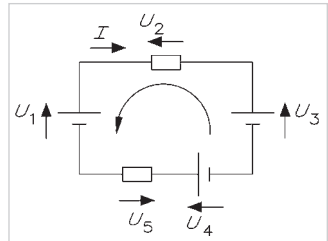
1.2.8 Maaswet (tweede wet van Kirchhoff)

Voor elke gesloten stroomkring geldt:

$$\sum U = 0$$

In woorden: in elke gesloten stroomkring (maas) is de som van alle spanningen gelijk aan nul.

Spanningen waarvan de richting met de gekozen doorlooprichting overeenkomt, worden als positief beschouwd, de andere als negatief.



Figuur 1.18

Voorbeeld: $U_1 = 3 \text{ V}$; $U_2 = 1 \text{ V}$; $U_3 = 2 \text{ V}$; $U_4 = 2 \text{ V}$; $U_5 = ?$

$$\sum U = 0$$

$$-U_1 + U_2 + U_3 - U_4 + U_5 = 0$$

$$U_5 = U_1 - U_2 - U_3 + U_4$$

$$= 3 \text{ V} - 1 \text{ V} - 2 \text{ V} + 2 \text{ V}$$

$$= 2 \text{ V}$$

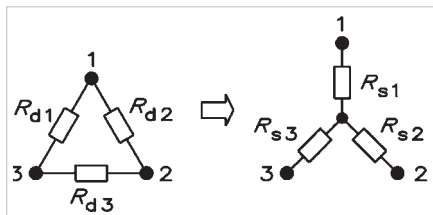
1.2.9 Driehoek-stertransformatie

$$R_{s1} = \frac{R_{d1} \cdot R_{d2}}{R_{d1} + R_{d2} + R_{d3}}$$

$$R_{s2} = \frac{R_{d2} \cdot R_{d3}}{R_{d1} + R_{d2} + R_{d3}}$$

$$R_{s3} = \frac{R_{d1} \cdot R_{d3}}{R_{d1} + R_{d2} + R_{d3}}$$

R_{d1}, R_{d2}, R_{d3} weerstandswaarden van de driehoekschakeling
 R_{s1}, R_{s2}, R_{s3} weerstandswaarden van de equivalente stersschakeling



Figuur 1.19

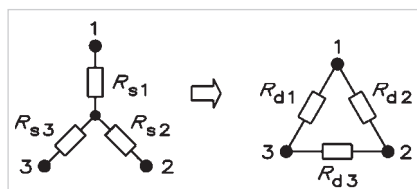
1.2.10 Ster-driehoektransformatie

$$R_{d1} = \frac{R_{s1} \cdot R_{s3}}{R_{s2}} + R_{s1} + R_{s3}$$

$$R_{d2} = \frac{R_{s1} \cdot R_{s2}}{R_{s3}} + R_{s1} + R_{s2}$$

$$R_{d3} = \frac{R_{s2} \cdot R_{s3}}{R_{s1}} + R_{s2} + R_{s3}$$

R_{s1}, R_{s2}, R_{s3} weerstandswaarden van de stersschakeling
 R_{d1}, R_{d2}, R_{d3} weerstandswaarden van de equivalente driehoekschakeling

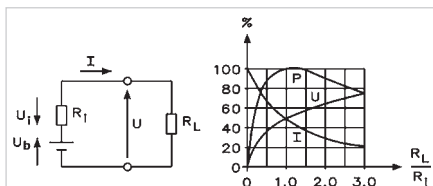


Figuur 1.20

1.2.11 Belaste spanningsbron

$$U = U_b - I \cdot R_i$$

$$I = \frac{U_b}{R_i + R_L}; \quad I_k = \frac{U_b}{R_i}$$



Figuur 1.21

$$R_i = \frac{U_b}{I_k} = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|$$

U	klemspanning
U_b	bronspanning, onbelaste spanning
I	stroom
I_k	kortsluitstroom
ΔI	stroomverandering
ΔU	spanningsverandering
R_L	belastingsweerstand
R_i	inwendige weerstand
$P_{\max}$	maximaal vermogen

In het speciale geval $R_i = R_L$ geldt:

$$P_{\max} = \frac{U_b^2}{4 \cdot R_i}; \quad U = \frac{U_b}{2}; \quad I = \frac{U_b}{2 \cdot R_L}$$

spanningsaanpassing:	$R_L > R_i$
vermogenaanpassing:	$R_L = R_i$
stroomaanpassing:	$R_L < R_i$

Voorbeeld: $U_b = 1,5 \text{ V}$; $R_i = 0,5 \Omega$; $R_L = 1,5 \Omega$; $I = ?$; $I_k = ?$; $P_{\max} = ?$

$$I = \frac{1,5 \text{ V}}{0,5 \Omega + 1,5 \Omega} = 0,75 \text{ A}$$

$$I_k = \frac{1,5 \text{ V}}{0,5 \Omega} = 3 \text{ A}$$

$$P_{\max} = \frac{(1,5 \text{ V})^2}{4 \cdot 0,5 \Omega} = 1,125 \text{ W}$$

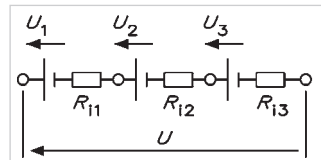
1.2.12 Serieschakeling van spanningsbronnen (elementen)

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

$$R_i = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + \dots$$

$$I = \frac{U}{R_i + R_L}$$

U	totale spanning
U_1, U_2, U_3	afzonderlijke spanningen



Figuur 1.22

R_i totale inwendige weerstand
 R_{i1}, R_{i2}, R_{i3} afzonderlijke inwendige weerstanden

Voorbeeld: $U_1 = 1,5 \text{ V}$; $U_2 = 1,8 \text{ V}$; $R_{i1} = 1 \Omega$; $R_{i2} = 1,5 \Omega$;
 $R_L = 10 \Omega$ (niet getekend); $R_i = ?$; $I = ?$

$$U = 1,5 \text{ V} + 1,8 \text{ V} = 3,3 \text{ V}; \quad R_i = 1 \Omega + 1,5 \Omega = 2,5 \Omega$$

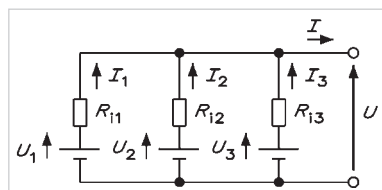
$$I = \frac{3,3 \text{ V}}{2,5 \Omega + 10 \Omega} = 0,26 \text{ A}$$

1.2.13 Parallelschakeling van spanningsbronnen (elementen)

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R_{i3}} + \dots$$

$$I = \frac{U}{R_{i1}} + \frac{U}{R_{i2}} + \frac{U}{R_{i3}} + \dots$$



Figuur 1.23

Bij verschillende bronspanningen gaan vereffeningsstromen lopen.

Voorbeeld: $U_1 = U_2 = 1,5 \text{ V}$; $R_{i1} = 1 \Omega$; $R_{i2} = 1,5 \Omega$;
 $R_L = 0,6 \Omega$ (niet getekend); $R_i = ?$; $I = ?$

$$R_i = \frac{1 \Omega \cdot 1,5 \Omega}{1 \Omega + 1,5 \Omega} = 0,6 \Omega; \quad R_L = R_i \rightarrow U = 0,75 \text{ V}$$

$$I = \frac{0,75 \text{ V}}{1 \Omega} + \frac{0,75 \text{ V}}{1,5 \Omega} = 1,25 \text{ A}$$

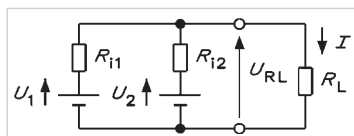
1.2.14 Equivalente spanningsbron

$$U_1 - I_0 \cdot R_{i1} = U_2 - I_0 \cdot R_{i2}$$

$$U_1 - U_2 = I_0 \cdot (R_{i1} + R_{i2})$$

$$I_0 = \frac{U_1 - U_2}{R_{i1} + R_{i2}}$$

$$U' = U_2 + I_0 \cdot R_{i2}; \quad R'_i = \frac{R_{i1} \cdot R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}}; \quad I' = \frac{U_1}{R_{i1}} + \frac{U_2}{R_{i2}}$$



Figuur 1.24

U'	totale onbelaste spanning
U_1, U_2	afzonderlijke onbelaste spanningen
I_0	totale vereffeningsstroom
R_{i1}, R_{i2}	afzonderlijke inwendige weerstanden

Voorbeeld: $U_1 = 12 \text{ V}$; $U_2 = 6 \text{ V}$; $R_{i1} = 1 \Omega$; $R_{i2} = 2 \Omega$; $R_L = 10 \Omega$; $U_{RL} = ?$

$$I_0 = \frac{12 \text{ V} - 6 \text{ V}}{1 \Omega + 2 \Omega} = 2 \text{ A};$$

$$U' = 6 \text{ V} + 2 \text{ A} \cdot 2 \Omega = 10 \text{ V}$$

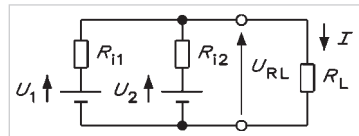
$$R'_i = \frac{1 \Omega \cdot 2 \Omega}{1 \Omega + 2 \Omega} = 0,67 \Omega; \quad I = \frac{10 \text{ V}}{0,67 \Omega + 10 \Omega} = 0,94 \text{ A}$$

$$U_{RL} = 0,94 \text{ A} \cdot 10 \Omega = 9,4 \text{ V}$$

1.2.15 Equivalente stroombron

$$I' = \frac{U_1}{R_{i1}} + \frac{U_2}{R_{i2}}$$

$$R'_i = \frac{R_{i1} \cdot R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}}$$



Figuur 1.25

$$R_{eq} = \frac{R'_i \cdot R_L}{R'_i + R_L}; \quad U_{RL} = I' \cdot R_{eq}; \quad I = \frac{U_{RL}}{R_L}$$

Voorbeeld: $U_1 = 12 \text{ V}$; $U_2 = 6 \text{ V}$; $R_{i1} = 1 \Omega$; $R_{i2} = 2 \Omega$; $R_L = 10 \Omega$; $I = ?$

$$I' = \frac{12 \text{ V}}{1 \Omega} + \frac{6 \text{ V}}{2 \Omega} = 15 \text{ A}$$

$$R'_i = \frac{1 \Omega \cdot 2 \Omega}{1 \Omega + 2 \Omega} = 0,67 \Omega$$

$$R_{eq} = \frac{0,67 \Omega \cdot 10 \Omega}{0,67 \Omega + 10 \Omega} = 0,63 \Omega$$

$$U_{RL} = 15 \text{ A} \cdot 0,63 \Omega = 9,4 \text{ V}$$

$$I = \frac{9,4 \text{ V}}{10 \Omega} = 0,94 \text{ A}$$

1.2.16 Wet van Faraday

$$m = I \cdot t \cdot c$$

$$Q = I_O \cdot t_O$$

m massa afgescheiden stof
in mg resp. g (gram)

I stroom

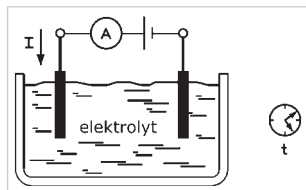
t tijd

c elektrochemisch equivalent in mg/(A·s) of g/(A·h)

Q ontladcapaciteit

I_O ontladstroom

t_O ontladduur



Figuur 1.26

Voorbeeld: $t = 2 \text{ h}$; $I = 30 \text{ A}$; $c = 4,02 \text{ g/Ah}$; $m = ?$

$$m = 30 \text{ A} \cdot 2 \text{ h} \cdot 4,02 \frac{\text{g}}{\text{Ah}} = 241 \text{ g}$$

	Loodaccu	Nikkel-ijzer-accu
nominale celspanning	2,0 V	1,2 V
toegepast zuur	H_2SO_4	KCl
zuurdichtheid	1,18...1,28 g/cm ³	1,2 g/cm ³
laadspanning	2,1...2,75 V	1,35...1,8 V
ontlaadspanning	1,83 V	1,0 V
η_{Ah}	83...90%	72%
η_{Wh}	70...75%	55%

$$\eta_{\text{Ah}} = \frac{I_O \cdot t_O}{I_L \cdot t_L}; \quad \eta_{\text{Wh}} = \frac{U_O \cdot I_O \cdot t_O}{U_L \cdot I_L \cdot t_L}$$

I_O ontladstroom

η_{Ah} ampère-uur-rendement

η_{Wh} wattuur-rendement

I_L laadstroom

t_L laadduur

U_O ontladspanning

U_L laadspanning

Voorbeeld: $I_O = 5 \text{ A}$; $t_O = 12 \text{ h}$; $U_O = 2 \text{ V}$; $I_L = 8 \text{ A}$; $t_L = 9 \text{ h}$; $U_L = 2,5 \text{ V}$;
 $Q = ?$; $\eta_{\text{Ah}} = ?$; $\eta_{\text{Wh}} = ?$

$$Q = 5 \text{ A} \cdot 12 \text{ h} = 60 \text{ Ah}$$

$$\eta_{Ah} = \frac{5 \text{ A} \cdot 12 \text{ h}}{8 \text{ A} \cdot 9 \text{ h}} = 0,83; \quad \eta_{Wh} = \frac{2 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} \cdot 12 \text{ h}}{2,5 \text{ V} \cdot 8 \text{ A} \cdot 9 \text{ h}} = 0,67$$

1.3 Wetmatigheden in eenvoudige stroomkringen

1.3.1 Elektrisch vermogen

$$P = U \cdot I; \quad P = I^2 \cdot R$$

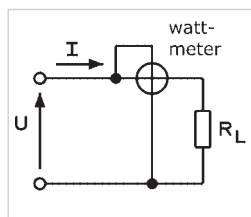
$$P = \frac{U^2}{R}$$

P vermogen in W (watt)

U spanning in V

I stroom in A

R_L belastingsweerstand



Figuur 1.27

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

Voorbeeld: $U = 12 \text{ V}$; $I = 5 \text{ A}$; $P = ?$

$$P = 12 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 60 \text{ W}$$

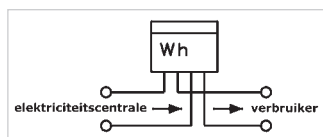
1.3.2 Elektrische arbeid

$$W = P \cdot t$$

W elektrische arbeid in Ws of Wh

P vermogen in W

t tijd in s, min of h



Figuur 1.28

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$3600 \text{ Ws} = 1 \text{ Wh}$$

$$1000 \text{ Wh} = 1 \text{ kWh}$$

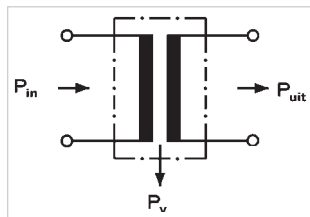
Voorbeeld: $P = 60 \text{ W}$; $t = 3 \text{ h}$; $W = ?$

$$W = 60 \text{ W} \cdot 3 \text{ h} = 180 \text{ Wh}$$

1.3.3 Rendement

$$\eta = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{uit}}}; \quad P_v = P_{\text{in}} - P_{\text{uit}}$$

η rendement
 P_{uit} afgegeven (uitgaand) vermogen
 P_{in} toegevoerd (ingaaand) vermogen
 P_v verliesvermogen



Figuur 1.29

Voorbeeld: $P_{\text{uit}} = 60 \text{ W}$; $P_{\text{in}} = 80 \text{ W}$; $\eta = ?$

$$\eta = \frac{60 \text{ W}}{80 \text{ W}} = 0,75$$

1.3.4 Warmteontwikkeling

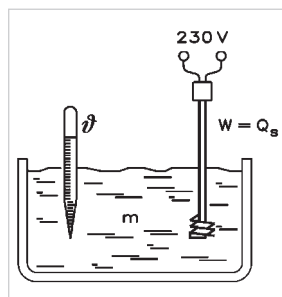
$$W = Q_S; \quad W = \frac{Q}{\eta_w}$$

$$W = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\vartheta}{\eta_w}$$

$$P = \frac{Q}{\eta_w \cdot t}$$

$$Q_N = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta; \quad Q_S = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\vartheta}{\eta_w}$$

W elektrische arbeid in Js, Wh of kWh
 Q benodigde hoeveelheid warmte
 Q_S door de stroom ontwikkelde warmte in J (joule)
 Q_N nuttige warmte in J
 m hoeveelheid materiaal in kg
 c soortelijke warmtecapaciteit in kJ/(kg·K)
 $\Delta\vartheta$ temperatuuroename
 η_w warmterendement



Figuur 1.30

Voorbeeld: $m = 1 \text{ kg}$; $c = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\Delta\vartheta = 80 \text{ K}$; $\eta_w = 0,8$; $Q_S = ?$

$$Q_S = \frac{1 \text{ kg} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 80 \text{ K}}{0,8} = 419 \text{ kJ}$$

1.3.5 Vermogensmeting met een teller

$$P = \frac{n}{C_T \cdot t_h} = \frac{n \cdot 60}{C_T \cdot t_{\min}} = \frac{n \cdot 3600}{C_T \cdot t_s}$$

P	vermogen in kW
n	aantal omwentelingen per minuut
C_T	tellerconstante in omwentelingen/kWh
$t_h, t_{\min}, t_s$	meetperiode in h, min, s

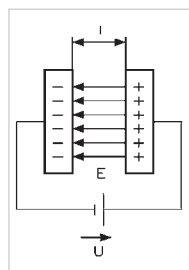
Voorbeeld: $n = 10$ omw.; $t_s = 45$ s; $C_T = 150$ omw./kWh; $P = ?$

$$P = \frac{10 \text{ omw} \cdot 3600}{150 \text{ omw/kWh} \cdot 45 \text{ s}} = 5,33 \text{ kWh}$$

1.3.6 Het elektrisch veld

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{U}{l}$$

E	elektrische veldsterkte in V/m
U	aangelegde spanning in V
l	afstand tussen de platen in m
F	kracht op een geladen lichaam in N (newton)
Q	lading van het lichaam in As



Figuur 1.31

Voorbeeld: $U = 1$ kV; $l = 10$ mm; $E = ?$

$$E = \frac{1 \text{ kV}}{0,01 \text{ m}} = 100 \text{ kV/m}$$

1.3.7 Lading van een condensator

$$Q = I \cdot t; \quad Q = C \cdot U$$

Q	lading in As
C	capaciteit in F (farad = As/V)

Voorbeeld: $U = 1$ kV; $C = 1 \mu\text{F}$; $Q = ?$

$$Q = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot 1 \text{ kV} = 1 \text{ mAs}$$

1.3.8 Energie in een geladen condensator

$$W_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

W_{el} opgeslagen elektrische energie in Js

Voorbeeld: $U = 1 \text{ kV}$; $C = 1 \mu\text{F}$; $W_{\text{el}} = ?$

$$W_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot (1 \text{ kV})^2 = 0,5 \text{ Js}$$

1.3.9 Diëlektrische verplaatsing of doorschuiving

$$D = \frac{Q}{A} = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E$$

D elektrische fluxdichtheid in As/m^2

Q lading van het lichaam in As

E elektrische veldsterkte in V/m

A oppervlakte in m^2

ε permittiviteit in As/Vm of F/m

ε_0 permittiviteit van het vacuüm; $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ F}/\text{m}$

ε_r relatieve permittiviteit (diëlektrische constante)

Voorbeeld: $\varepsilon_r = 8$; $E = 100 \text{ kV}/\text{m}$; $D = ?$

$$D = 8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 8 \cdot 100 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{m}^2}$$

1.3.10 Plaatcondensator

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{s}$$

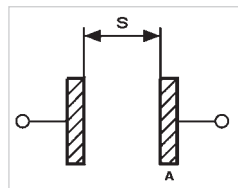
C capaciteit in F resp. As/V

ε_0 permittiviteit van het vacuüm in F/m

ε_r relatieve permittiviteit

s afstand tussen de platen in m

A oppervlakte van een plaat in m^2



Figuur 1.32

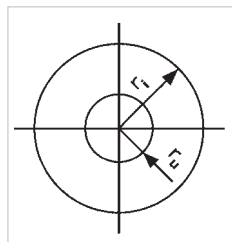
Voorbeeld: $\varepsilon_r = 8$; $A = 10 \text{ cm}^2$; $s = 1 \text{ mm}$; $C = ?$

$$C = 8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 8 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{1 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 70,8 \text{ pF}$$

1.3.11 Cilindrische condensator

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{l}{\ln(r_i/r_u)}$$

l lengte van de cilinder in m
 r_i inwendige straal van de buitenste cilinder in mm
 r_u uitwendige straal van de binnenste cilinder in mm
 $\ln$ natuurlijke logaritme
 ε_0 permittiviteit van het vacuüm
 ε_r relatieve permittiviteit



Figuur 1.33

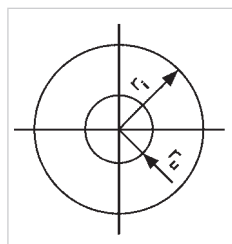
Voorbeeld: $\varepsilon_r = 8$; $l = 1 \text{ m}$; $r_i = 10 \text{ mm}$; $r_u = 1 \text{ mm}$; $C = ?$

$$C = 8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 8 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1 \text{ m}}{\ln(0,01 \text{ m}/0,001 \text{ m})} = 193 \text{ pF}$$

1.3.12 Kogelcondensator

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{r_i \cdot r_u}{r_i - r_u}$$

r_i inwendige straal van de buitenste kogel (bol) in mm
 r_u uitwendige straal van de binnenste kogel (bol) in mm



Figuur 1.34

Voorbeeld: $\varepsilon_r = 8$; $r_i = 10 \text{ mm}$; $r_u = 1 \text{ mm}$; $C = ?$

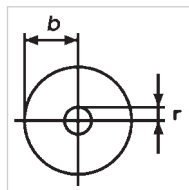
$$C = 8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 8 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,01 \text{ m} \cdot 0,001 \text{ m}}{0,01 \text{ m} - 0,001 \text{ m}} = 1 \text{ pF}$$

1.3.13 Coaxiale kabel

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot \frac{l}{\ln \frac{b-r}{r}}$$

(geldt voor $b > r$)

- l lengte van de cilinder in m
 b straal van de coaxkabel in m
 r straal van de cilinder (ader) in m
 ε_0 permittiviteit van het vacuüm
 ε_r relatieve permittiviteit



Figuur 1.35

Voorbeeld: $\varepsilon_r = 8$; $l = 1$ m; $b = 10$ mm; $r = 0,5$ mm; $C = ?$

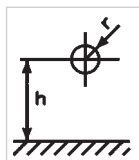
$$C = 8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 8 \cdot 3,14 \cdot \frac{1 \text{ m}}{\ln \frac{0,01 \text{ m} - 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}} = 75,5 \text{ pF}$$

1.3.14 Geleider boven massavlak

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{l}{\ln(2 \cdot h/r)}$$

(geldt voor $h > r$)

- h afstand tussen geleider en massavlak in m
 r straal van de geleider in m
 l lengte van de geleider in m
 ε_0 permittiviteit van het vacuüm in F/m
 ε_r relatieve permittiviteit



Figuur 1.36

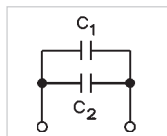
Voorbeeld: $\varepsilon_r = 8$; $l = 1$ m; $h = 5$ mm; $r = 0,5$ mm; $C = ?$

$$C = 8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 8 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1 \text{ m}}{\ln \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}} = 148 \text{ pF}$$

1.3.15 Parallelschakeling van condensatoren

$$C = C_1 + C_2 + \dots; \quad Q = Q_1 + Q_2 + \dots$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \dots$$



Figuur 1.37

Q	totale lading in As
Q_1, Q_2	afzonderlijke ladingen in As
C	totale capaciteit in F
C_1, C_2	afzonderlijke capaciteiten in F
U	spanning over de parallelschakeling

Voorbeeld: $C_1 = 2 \mu\text{F}$; $C_2 = 4 \mu\text{F}$; $C = ?$

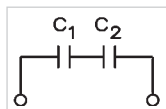
$$C = 2 \mu\text{F} + 4 \mu\text{F} = 6 \mu\text{F}$$

1.3.16 Serieschakeling van condensatoren

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots$$

$$Q = C \cdot U = C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_2 = \dots$$



Figuur 1.38

U	totale spanning over de serieschakeling in V
U_1, U_2	afzonderlijke spanningen over de condensatoren in V
C	totale capaciteit in F
C_1, C_2	afzonderlijke capaciteiten in F
Q	totale lading in As

Bij serieschakeling van twee condensatoren geldt:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Voorbeeld: $C_1 = 2 \mu\text{F}$; $C_2 = 4 \mu\text{F}$; $C = ?$

$$C = \frac{2 \mu\text{F} \cdot 4 \mu\text{F}}{2 \mu\text{F} + 4 \mu\text{F}} = 1,33 \mu\text{F}$$

Draaicondensator (variabele condensator):

$$C = (n-1) \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{s}$$

A	oppervlak in m^2
s	afstand tussen de platen in m
n	aantal platen

1.3.17 Capaciteitsverandering van condensatoren bij verwarming

$$\Delta C = \alpha \cdot C_k \cdot \Delta \vartheta; \quad C_w = C_k \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$$

ΔC	capaciteitsverandering in F
α	temperatuurcoëfficiënt in 1/K
C_k	capaciteit in 'koude' toestand in F
C_w	capaciteit in 'warme' toestand in F
$\Delta \vartheta$	temperatuurverandering in K
α_1, α_2	afzonderlijke temperatuurcoëfficiënten in 1/K
C_1, C_2	afzonderlijke capaciteiten bij parallel- of serieschakeling

Voorbeeld: $C_k = 1 \mu\text{F}$; $\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\Delta \vartheta = 50 \text{ K}$; $C_w = ?$

$$C_w = 1 \mu\text{F} \cdot (1 + 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot 50 \text{ K}) = 1,15 \mu\text{F}$$

Bij parallelschakeling geldt:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \cdot C_1 + \alpha_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Bij serieschakeling geldt:

$$\alpha = \frac{\alpha_2 \cdot C_1 + \alpha_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

1.4 Magnetische velden

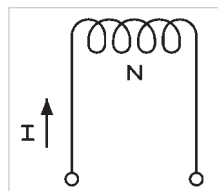
1.4.1 Magnetomotorische kracht

$$\Theta = N \cdot I$$

Θ	magnetomotorische kracht* in A
N	aantal windingen
I	stroom in A

Voorbeeld: $I = 200 \text{ mA}$; $N = 1000$; $\Theta = ?$

$$\Theta = 1000 \cdot 0,2 \text{ A} = 200 \text{ A}$$



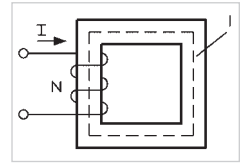
Figuur 1.39

* Ook wel *magnetomotantie* of *magnetische (bron)spanning*.

1.4.2 Magnetische veldsterkte

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

H magnetische veldsterkte in A/m
 l gemiddelde lengte van de veldlijnen in m



Figuur 1.40

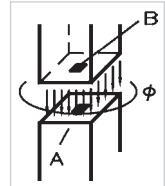
Voorbeeld: $I = 2 \text{ A}$; $N = 500$; $l = 80 \text{ mm}$; $H = ?$

$$H = \frac{500 \cdot 2 \text{ A}}{0,08 \text{ m}} = 12.500 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

1.4.3 Magnetische inductie (fluxdichtheid) en magnetische flux

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

B magnetische inductie in T of Vs/m²
 Φ magnetische flux in Wb of Vs
 A oppervlak in m²



Figuur 1.41

$$1 \text{ T (tesla)} = 1 \text{ Vs/m}^2$$

$$1 \text{ Wb (weber)} = 1 \text{ Vs}$$

Voorbeeld: $\Phi = 0,001 \text{ Vs}$; $A = 100 \text{ cm}^2$; $B = ?$

$$B = \frac{0,001 \text{ Vs}}{100 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 0,1 \text{ T}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r; \quad B = \mu \cdot H; \quad B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H; \quad \mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

μ permeabiliteit in Vs/Am
 μ_0 permeabiliteit van het vacuüm
 μ_r relatieve permeabiliteit
 H magnetische veldsterkte in A/m

Voorbeeld: $H = 0,1 \text{ A/m}$; $\mu_r = 2000$; $B = ?$

$$B = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 2000 \cdot 0,1 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 251 \mu\text{T}$$

Materiaal	μ_r	Opmerkingen
lucht	1	in lucht: $B = \mu \cdot H$ μ_0 is constant; $\mu_r = 1$
Fe	6000	in ijzer: $B = \mu \cdot H$ μ is niet constant
Fe – Co	6000	
Fe – Si	20000	
Fe – Ni	30000	

1.4.4 Magnetische weerstand en magnetische geleiding

$$R_m = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{l}{\mu \cdot A}; \quad \Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu \cdot A}{l}$$

$$\Phi = \Theta \cdot \Lambda$$

R_m magnetische weerstand (reluctantie)
in A/Wb

Θ magnetomotorische kracht in A

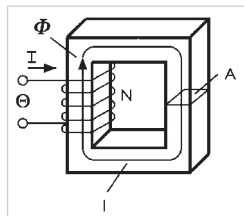
Φ magnetische flux in Wb of Vs

l gemiddelde lengte van de veldlijnen in m

μ permeabiliteit in Vs/Am

A oppervlak in m²

Λ magnetische geleiding (permeantie) in Wb/A



Figuur 1.42

1.4.5 Magnetische kring met luchtspleet (zonder strooiveld)

$$R_m = R_{m(Fe)} + R_{m(lucht)}$$

$$V_{tot} = V_{Fe} + V_{lucht}$$

$$\Theta = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_{lucht} \cdot l_{lucht}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$$

R_m

$R_{m(Fe)}, R_{m(lucht)}$

V_{tot}

V_{Fe}, V_{lucht}

Θ

H_{Fe}, H_{lucht}

l_{lucht}, l_{Fe}

totale magnetische weerstand in A/Wb

afzonderlijke magnetische weerstanden in A/Wb

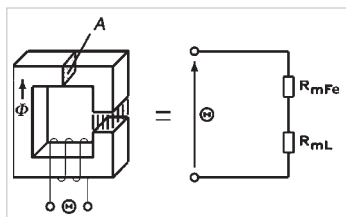
totale magnetische bronspanning in A

magnetische deelspanningen in A

magnetomotorische kracht in A

magnetische veldsterktes in H

gemiddelde lengte van de veldlijnen in m

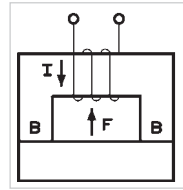


Figuur 1.43

1.4.6 Kracht in het magnetische veld

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2 \cdot \mu_0}$$

F kracht in N
 B magnetische inductie in T
 A oppervlak in m²



Figuur 1.44

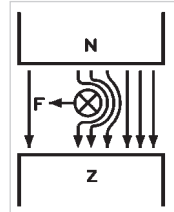
Voorbeeld: $B = 1,5 \text{ T}$; $A = 100 \text{ cm}^2$; $F = ?$

$$F = \frac{(1,5 \text{ T})^2 \cdot 100 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{2 \cdot 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}} = 8952,7 \text{ N}$$

1.4.7 Kracht op stroomvoerende geleiders in een magnetisch veld

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot n$$

F kracht in N
 B magnetische inductie in T
 l effectieve lengte in m
 n aantal geleiders



Figuur 1.45

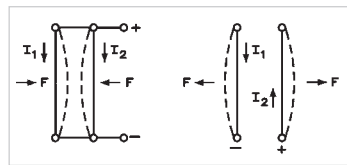
Voorbeeld: $B = 1,5 \text{ T}$; $I = 1 \text{ A}$; $l = 10 \text{ cm}$; $n = 40$; $F = ?$

$$F = 1,5 \text{ T} \cdot 1 \text{ A} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 40 = 6 \text{ N}$$

1.4.8 Kracht tussen evenwijdige stroomvoerende geleiders

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{l}{b} \cdot I_1 \cdot I_2$$

F kracht in N
 μ_0 permeabiliteit van het vacuüm
 l lengte van de geleiders in m
 b afstand tussen de geleiders in m
 I_1, I_2 stroom door de geleiders in A



Figuur 1.46

Voorbeeld: $l = 50 \text{ m}$; $b = 1 \text{ m}$; $I_1 = I_2 = 1000 \text{ A}$; $F = ?$

$$F = \frac{1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{50 \text{ m}}{1 \text{ m}} \cdot 1000 \text{ A} \cdot 1000 \text{ A} = 10 \text{ N}$$

1.4.9 Inductie

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

U_{ind} geïnduceerde spanning in V
 N aantal windingen
 $\Delta\Phi/\Delta t$ verandering van de magnetische flux in de tijd in Wb/s

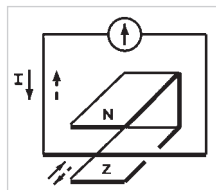
Voorbeeld: $N = 1000$; $U_{\text{ind}} = 100 \text{ V}$; $\Delta\Phi/\Delta t = ?$

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{U_{\text{ind}}}{N} = \frac{100 \text{ V}}{1000} = 0,1 \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

1.4.10 Inductie bij beweging

$$|U_{\text{ind}}| = B \cdot l \cdot v \cdot n \quad \text{als} \quad v \perp B$$

$\perp$ loodrecht op
 $|U_{\text{ind}}|$ geïnduceerde spanning in V
 l effectieve lengte van de geleider in m
 v snelheid in m/s
 n aantal geleiders
 B magnetische inductie in T



Figuur 1.47

Voorbeeld: $B = 1,5 \text{ T}$; $l = 1 \text{ m}$; $v = 1 \text{ m/s}$; $n = 100$; $|U_{\text{ind}}| = ?$

$$|U_{\text{ind}}| = B \cdot l \cdot v \cdot n = 1,5 \text{ T} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 100 = 150 \text{ V}$$

1.4.11 Zelfinductie

$$U_0 = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

U_0 zelfinductiespanning in V
 L zelfinductie in H (henry)
 $\Delta I/\Delta t$ verandering van de stroom in de tijd in A/s

Voorbeeld: $L = 100 \text{ mH}$; $\Delta I = 10 \text{ A}$; $\Delta t = 10 \text{ ms}$; $U_0 = ?$

$$U_0 = -0,1 \text{ H} \cdot \frac{10 \text{ A}}{0,01 \text{ s}} = -100 \text{ V}$$

1.4.12 Zelfinductie van spoelen

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l}; \quad L = N^2 \cdot \Lambda$$

L	zelfinductie in H (1 H = 1 Wb/A)
N	aantal windingen
l	lengte in m
A	oppervlak in m ²
Λ	magnetische geleiding (permeantie)

Voorbeeld: $N = 100$; $\mu_r = 5000$; $A = 10 \text{ cm}^2$; $l = 5 \text{ cm}$; $L = ?$

$$L = 100^2 \cdot \frac{1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 5000 \cdot 0,001 \text{ m}^2}{0,05 \text{ m}} = 1,256 \text{ H}$$

1.4.13 Energie in een stroomvoerende spoel

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

W_{mag}	in het magnetisch veld opgeslagen energie in Js
L	zelfinductie in H
I	stroom in A

Voorbeeld: $L = 10 \text{ H}$; $I = 5 \text{ A}$; $W_{\text{mag}} = ?$

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot 10 \text{ H} \cdot (5 \text{ A})^2 = 125 \text{ Js}$$

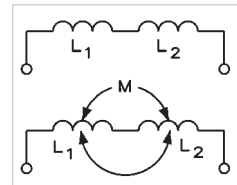
1.4.14 Serieschakeling van spoelen (zelfinducties)

$$L = L_1 + L_2 + \dots$$

(zonder wederzijdse inductie of koppeling)

$$L = L_1 + L_2 + M$$

(koppeling bij gelijke wikkelrichting van de spoelen)



Figuur 1.48

$$L = L_1 + L_2 - M$$

(koppeling bij tegengestelde wikkelrichting van de spoelen)

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

L totale zelfinductie in H

L_1, L_2 afzonderlijke zelfinducties in H

M wederzijdse inductie (koppeling) in H

k koppelfactor ($0 \leq k \leq 1$)

$k = 0$: geen koppeling; $k = 1$: ideale ('vaste') koppeling

Voorbeeld: $L_1 = 400 \text{ mH}$; $L_2 = 700 \text{ mH}$; $k = 0,8$; $L = ?$

$$M = 0,8 \cdot \sqrt{0,4 \text{ H} \cdot 0,7 \text{ H}} = 0,42 \text{ H}$$

$$L = 0,4 \text{ H} + 0,7 \text{ H} + 0,42 \text{ H} = 1,52 \text{ H}$$

(koppeling met gelijke wikkelrichting van de spoelen)

$$L = 0,4 \text{ H} + 0,7 \text{ H} - 0,42 \text{ H} = 0,68 \text{ H}$$

(koppeling met tegengestelde wikkelrichting van de spoelen)

1.4.15 Parallelschakeling van spoelen (zelfinducties)

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$$

(zonder wederzijdse inductie of koppeling)

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2 \cdot M}$$

(koppeling bij gelijke wikkelrichting van de spoelen)

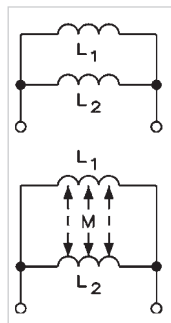
$$L = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2 \cdot M}$$

(koppeling bij tegengestelde wikkelrichting van de spoelen)

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

L totale zelfinductie in H

L_1, L_2 afzonderlijke zelfinducties in H



Figuur 1.49

M wederzijdse inductie (koppeling) in H
 k koppelfactor ($0 \leq k \leq 1$)
 $k = 0$: geen koppeling; $k = 1$: ideale ('vaste') koppeling

Voorbeeld: $L_1 = 400 \text{ mH}$; $L_2 = 700 \text{ mH}$; $k = 0,8$; $L = ?$

$$M = 0,8 \cdot \sqrt{0,4 \text{ H} \cdot 0,7 \text{ H}} = 0,42 \text{ H}$$

$$L = \frac{0,4 \text{ H} \cdot 0,7 \text{ H} - (0,42 \text{ H})^2}{0,4 \text{ H} + 0,7 \text{ H} - 2 \cdot 0,42 \text{ H}} = 0,4 \text{ H}$$

(koppeling met gelijke wikkelrichting van de spoelen)

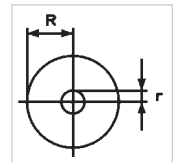
$$L = \frac{0,4 \text{ H} \cdot 0,7 \text{ H} - (0,42 \text{ H})^2}{0,4 \text{ H} + 0,7 \text{ H} + 2 \cdot 0,42 \text{ H}} = 0,05 \text{ H}$$

(koppeling met tegengestelde wikkelrichting van de spoelen)

1.4.16 Zelfinductie (coaxiale kabel)

$$L = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

L zelfinductie in H
 l lengte van de kabel in m



Figuur 1.50

Voorbeeld: $l = 50 \text{ m}$; $R = 4 \text{ mm}$; $r = 0,2 \text{ mm}$; $L = ?$

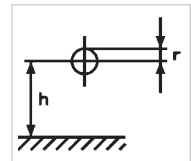
$$L = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \text{ m} \cdot \ln\left(\frac{4 \text{ mm}}{0,2 \text{ mm}}\right) = 30 \mu\text{H}$$

1.4.17 Zelfinductie (geleider boven massavlak)

$$L = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right)$$

Voorbeeld: $l = 50 \text{ m}$; $h = 4 \text{ mm}$; $r = 0,2 \text{ mm}$; $L = ?$

$$L = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \text{ m} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 4 \text{ mm}}{0,2 \text{ mm}}\right) = 36,9 \mu\text{H}$$



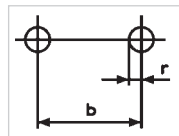
Figuur 1.51

1.4.18 Zelfinductie (tweeaderige kabel)

$$L = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{b}{r}\right)$$

Voorbeeld: $l = 50 \text{ m}$; $b = 4 \text{ mm}$; $r = 0,2 \text{ mm}$; $L = ?$

$$L = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \text{ m} \cdot \ln\left(\frac{4 \text{ mm}}{0,2 \text{ mm}}\right) = 59,9 \mu\text{H}$$



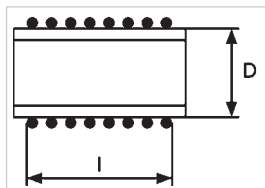
Figuur 1.52

1.5 Spoelen

1.5.1 Eenlaags cilinderspoel (solenoid)

$$L = 10^{-6} \cdot N^2 \cdot \frac{D^2}{l}$$

L zelfinductie in H
 N aantal windingen
 D diameter van de wikkeling in m
 l lengte van de spoel in m



Figuur 1.53

Voorbeeld: $l = 10 \text{ mm}$; $N = 20$; $D = 2 \text{ mm}$; $L = ?$

$$L = 10^{-6} \cdot 20^2 \cdot \frac{(2 \text{ mm})^2}{10 \text{ mm}} = 80 \mu\text{H}$$

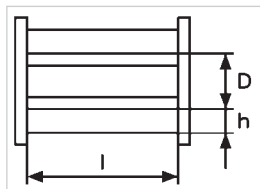
1.5.2 Meerlaags cilinderspoel (solenoid)

$$L \approx 10^{-6} \cdot N^2 \cdot D \cdot \left(\frac{D}{2 \cdot (l + h)}\right)^n$$

$$n = 0,75 \text{ voor } 0 < \frac{D}{2 \cdot (l + h)} < 1$$

$$n = 0,5 \text{ voor } 1 \leq \frac{D}{2 \cdot (l + h)} < 3$$

L zelfinductie in H
 N aantal windingen



Figuur 1.54

h hoogte (dikte) van de windingen in m
 D diameter van de wikkeling in m
 l lengte van de spoel in m

Voorbeeld: $l = 20 \text{ mm}$; $D = 2 \text{ mm}$; $h = 3 \text{ mm}$; $L = ?$

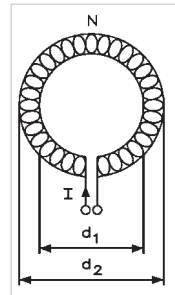
$$\frac{D}{2 \cdot (l + h)} = \frac{2 \text{ mm}}{2 \cdot (20 \text{ mm} + 3 \text{ mm})} = 0,043 \rightarrow n = 0,75$$

$$L = 10^{-6} \cdot 20^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \left(\frac{2 \text{ mm}}{2 \cdot (20 \text{ mm} + 3 \text{ mm})} \right)^{0,75} = 76,2 \text{ nH}$$

1.5.3 ____ Toroïde (zonder kern)

$$H = \frac{\Theta}{l} = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{I \cdot N}{\pi \cdot \frac{d_1 + d_2}{2}}$$

H magnetische veldsterkte in A/m
 Θ magnetomotorische kracht in A
 I elektrische stroom in A
 l gemiddelde lengte van de veldlijnen in m
 d_1 binnendiameter van de spoel in m
 d_2 buitendiameter van de spoel in m



Figuur 1.55

1.5.4 ____ Tijdconstante van een spoel

$$\tau = \frac{L}{R}; \quad I_{\infty} = \frac{U}{R}$$

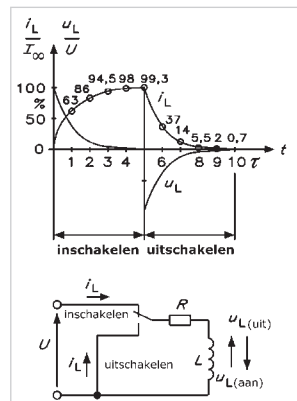
inschakelen: $i_L = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$

$$u_L = U \cdot e^{-t/\tau}$$

uitschakelen: $i_L = \frac{U}{R} \cdot e^{-t/\tau}$

$$u_L = -U \cdot e^{-t/\tau}$$

τ tijdconstante in s
 i_L momentane stroom door de spoel
 t tijd na in- resp. uitschakelen



Figuur 1.56

Voorbeeld: $R = 100 \, \Omega$; $L = 1 \, \text{H}$; $U = 10 \, \text{V}$; $t = 25 \, \text{ms}$; $i_L = ?$

$$\tau = \frac{1 \, \text{H}}{100 \, \Omega} = 10 \, \text{ms}$$

$$i_L = \frac{10 \, \text{V}}{100 \, \Omega} \cdot (1 - e^{-25 \, \text{ms}/10 \, \text{ms}}) = 92 \, \text{mA}$$

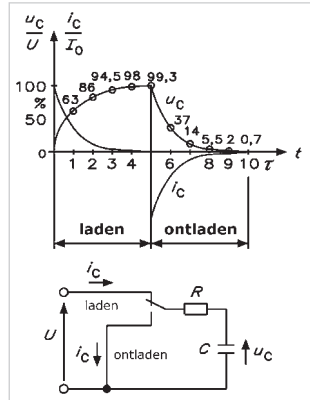
1.5.5 Tijdconstante van een condensator

$$\tau = R \cdot C \quad I_0 = \frac{U}{R}$$

laden: $u_C = U \cdot (1 - e^{-t/\tau})$

ontladen: $i_C = -\frac{U}{R} \cdot e^{-t/\tau}$

τ tijdconstante in s
 u_C momentane spanning over de condensator
 i_C momentane stroom door de condensator



Figuur 1.57

Voorbeeld: $R = 1 \, \text{k}\Omega$; $C = 1 \, \mu\text{F}$; $U = 10 \, \text{V}$;
 $t = 2,5 \, \text{ms}$; $u_C = ?$

$$\tau = 1 \, \text{k}\Omega \cdot 1 \, \mu\text{F} = 1 \, \text{ms}$$

$$u_C = 10 \, \text{V} \cdot (1 - e^{-2,5 \, \text{ms}/1 \, \text{ms}}) = 9,18 \, \text{V}$$

2 Wisselstroomkringen

2.1 Formules en karakteristieke grootheden

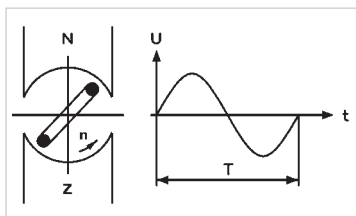
2.1.1 Frequentie, periodeduur en toerental

$$f = p \cdot n; \quad f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{1 \text{ s}} = 1 \text{ s}^{-1}$$

f	frequentie in Hz
p	aantal poolparen
n	toerental van de geleidende lus in het magnetische veld in omwentelingen/s
T	periodeduur in s
ω	cirkelfrequentie in radialen/s



Figuur 2.1

Voorbeeld: $n = 50 \text{ s}^{-1}$; $p = 2$; $f = ?$; $T = ?$; $\omega = ?$

$$f = 2 \cdot 50 \text{ s}^{-1} = 100 \text{ Hz}; \quad T = \frac{1}{100 \text{ Hz}} = 10 \text{ ms}$$

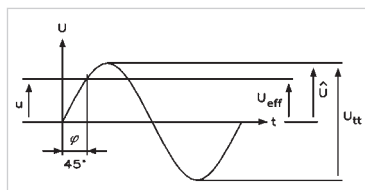
$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} = 628 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

2.1.2 Momentane, top-, top-top- en effectieve waarde

momentane waarde: $u = \hat{u} \cdot \sin \varphi$
 $i = \hat{i} \cdot \sin \varphi$

top-top-waarde: $u_{\text{tt}} = 2 \cdot \hat{u}$
 $i_{\text{tt}} = 2 \cdot \hat{i}$

effectieve waarde: $U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}; \quad I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$



Figuur 2.2

u, i	momentane waarden
$\hat{u}, \hat{i}$	topwaarden
u_{tt}, i_{tt}	top-top-waarden
U, I	effectieve waarden

Voorbeeld: $\hat{u} = 1 \text{ V}$; $\varphi = 30^\circ$; $u = ?$; $u_{tt} = ?$; $U = ?$

$$u = 1 \text{ V} \cdot \sin(30^\circ) = 0,5 \text{ V}; \quad u_{tt} = 2 \cdot 1 \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$U = \frac{1 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 0,707 \text{ V}$$

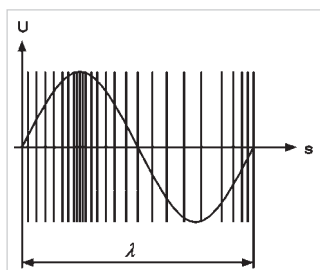
2.1.3 Golflengte

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ	golflengte in m
c	lichtsnelheid (300000 km/s)
f	frequentie in Hz

Voorbeeld: $f = 1 \text{ MHz}$; $\lambda = ?$

$$\lambda = \frac{300000 \text{ km/s}}{1 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 0,3 \text{ km} = 300 \text{ m}$$



Figuur 2.3

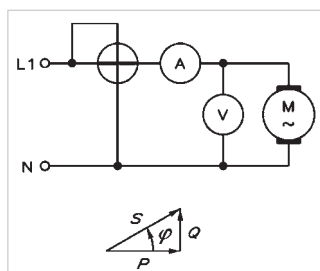
2.1.4 Schijnbaar, effectief en wattloos vermogen

$$S = U \cdot I; \quad P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S}; \quad \tan \varphi = \frac{Q}{P}$$



Figuur 2.4

S	schijnbaar vermogen in VA
P	effectief vermogen in W
Q	wattloos of blind vermogen in VAR
$\cos \varphi$	arbeidsfactor
$\sin \varphi$	reactieffactor

Voorbeeld: $U = 230 \text{ V}$; $I = 5 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0,8$; $S = ?$; $P = ?$; $Q = ?$

$$S = 230 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 1,15 \text{ kVA}; \quad P = 1,15 \text{ kVA} \cdot 0,8 = 920 \text{ W}$$

$$\cos \varphi = 0,8 \rightarrow \sin \varphi = 0,6; \quad Q = 1,15 \text{ kVA} \cdot 0,6 = 690 \text{ VAR}$$

2.1.5 Capacitieve schijnweerstand (reactantie)

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}; \quad X_C = \frac{U_C}{I_C}$$

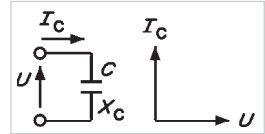
X_C capacitieve schijnweerstand (capacitantie) in Ω

ω cirkelfrequentie in rad/s

C capaciteit in F

U_C spanning over de condensator in V

I_C stroom door de condensator in A



Figuur 2.5

Voorbeeld: $f = 10 \text{ kHz}$; $C = 100 \text{ nF}$; $X_C = ?$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot 100 \cdot 10^{-9} \text{ As/V}} = 159 \Omega$$

2.1.6 Serieschakeling van effectieve weerstand en capacitieve schijnweerstand

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$I = \frac{U}{Z}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U}$$

U spanning

U_R effectieve (actieve) spanning

U_C capacitieve blindspanning

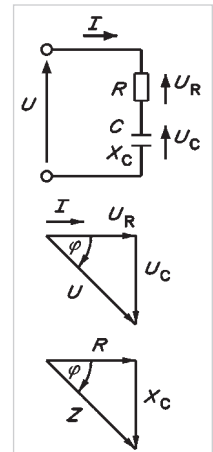
Z schijnweerstand (reactantie)

R effectieve weerstand

X_C capacitieve schijnweerstand (capacitantie)

I stroom

φ fasehoek (faseverschuiving)



Figuur 2.6

Voorbeeld: $R = 80 \, \Omega$; $X_C = 120 \, \Omega$; $Z = ?$; $\varphi = ?$

$$Z = \sqrt{(80 \, \Omega)^2 + (120 \, \Omega)^2} = 144 \, \Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{80 \, \Omega}{144 \, \Omega} = 0,56 \rightarrow \varphi = 56^\circ$$

2.1.7 Parallelschakeling van effectieve weerstand en capacatieve schijnweerstand

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

$$Z = \frac{U}{I}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$$

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}}$$

$$Z = \frac{R \cdot X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{G}{Y} = \frac{Z}{R} = \frac{I_R}{I}$$

I totale stroom

I_R effectieve (actieve) stroom

I_C capacatieve blindstroom

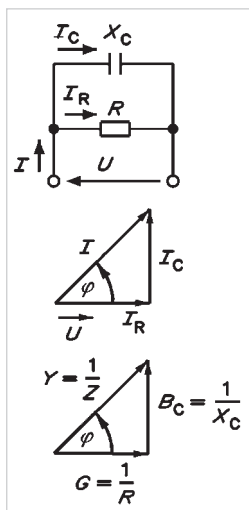
Y admittantie ('schijngeleiding')

G geleiding

B_C capacatieve susceptantie

X_C capacatieve schijnweerstand (capacitantie)

φ fasehoek (faseverschuiving)



Figuur 2.7

Voorbeeld: $I_R = 300 \, \text{mA}$; $I_C = 400 \, \text{mA}$; $I = ?$; $\varphi = ?$

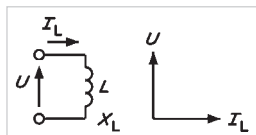
$$I = \sqrt{(300 \, \text{mA})^2 + (400 \, \text{mA})^2} = 500 \, \text{mA}$$

$$\cos \varphi = \frac{300 \, \text{mA}}{500 \, \text{mA}} = 0,6 \rightarrow \varphi = 53^\circ$$

2.1.8 Inductieve schijnweerstand (inductantie)

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L; \quad X_L = \frac{U_L}{I_L}$$

X_L inductieve schijnweerstand (inductantie) in Ω
 ω cirkelfrequentie in rad/s
 L zelfinductie in H
 U_L spanning over de spoel in V
 I_L stroom door de spoel in A



Figuur 2.8

Voorbeeld: $f = 1 \text{ kHz}$; $L = 100 \text{ mH}$; $X_L = ?$

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 0,1 \text{ H} = 628 \Omega$$

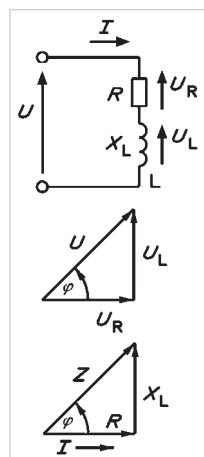
2.1.9 Serieschakeling van effectieve weerstand en inductieve schijnweerstand

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$I = \frac{U}{Z}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U}$$

U spanning
 U_R effectieve (actieve) spanning
 U_L inductieve blindspanning
 Z schijnweerstand
 R effectieve weerstand
 X_L inductieve schijnweerstand (inductantie)
 I stroom
 φ fasehoek (faseverschuiving)



Figuur 2.9

Voorbeeld: $R = 1 \text{ k}\Omega$; $X_L = 1,2 \text{ k}\Omega$; $Z = ?$; $\varphi = ?$

$$Z = \sqrt{(1 \text{ k}\Omega)^2 + (1,2 \text{ k}\Omega)^2} = 1,56 \text{ k}\Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1,56 \text{ k}\Omega} = 0,64 \rightarrow \varphi = 50^\circ$$

2.1.10 Parallelschakeling van effectieve weerstand en inductieve schijnweerstand

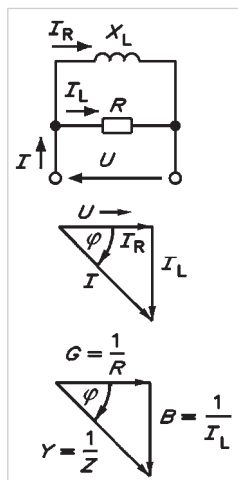
$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}; \quad Z = \frac{U}{I}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}; \quad Z = \frac{R \cdot X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{G}{Y} = \frac{Z}{R} = \frac{I_R}{I}$$

I	totale stroom
I_R	effectieve (actieve) stroom
I_L	inductieve blindstroom
Y	admittantie ('schijngeleiding')
G	geleiding
B_L	inductieve susceptantie
X_L	inductieve schijnweerstand (inductantie)
φ	fasehoek (faseverschuiving)



Figuur 2.10

Voorbeeld: $I_R = 600 \text{ mA}$; $I_L = 400 \text{ mA}$; $I = ?$; $\varphi = ?$

$$I = \sqrt{(600 \text{ mA})^2 + (400 \text{ mA})^2} = 721 \text{ mA}$$

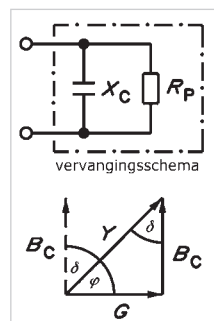
$$\cos \varphi = \frac{0,6 \text{ A}}{0,721 \text{ A}} = 0,832 \rightarrow \varphi = 33,7^\circ$$

2.1.11 Verliesfactor (condensator)

$$\tan \delta = \frac{G_P}{B_C} = \frac{X_C}{R_P} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R_P}; \quad \delta = 90^\circ - \varphi$$

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{d}$$

$\tan \delta$	verliesfactor (= d)
G	effectieve geleiding
B_C	capacitieve susceptantie
R_P	effectieve weerstand



Figuur 2.11

X_P	capacitieve schijnweerstand (capacitantie)
δ	verlieshoek
φ	fasehoek (faseverschuiving)
Q	kwaliteitsfactor

Voorbeeld: $X_C = 500 \, \Omega$; $R_P = 100 \, \text{k}\Omega$; $\tan \delta = ?$; $Q = ?$

$$\tan \delta = \frac{500 \, \Omega}{100 \, \text{k}\Omega} = 5 \cdot 10^{-3} \rightarrow \delta = 0,29^\circ; \quad Q = \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} = 200$$

2.1.12 Verliesfactor (spoel)

$$\tan \delta = \frac{R}{X_L} = d; \quad \delta = 90^\circ - \varphi$$

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{d}$$

$\tan \delta$	verliesfactor (= d)
R	effectieve weerstand
X_L	inductieve schijnweerstand (inductantie)
φ	fasehoek (faseverschuiving)
δ	verlieshoek
Q	kwaliteitsfactor

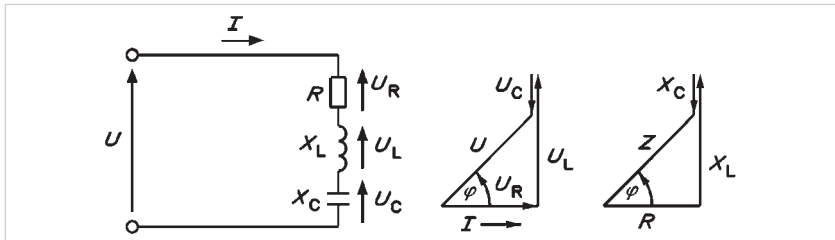


Figuur 2.12

Voorbeeld: $X_L = 80 \, \Omega$; $R = 2 \, \Omega$; $\tan \delta = ?$; $\delta = ?$

$$\tan \delta = \frac{2 \, \Omega}{80 \, \Omega} = 25 \cdot 10^{-3} \rightarrow \delta = 1,43^\circ$$

2.1.13 Serieschakeing van effectieve weerstand, capacitieve en inductieve schijnweerstand



Figuur 2.13

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}; \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$I = \frac{U}{Z}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U}$$

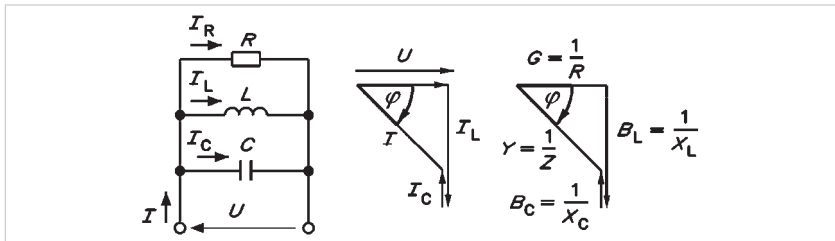
U	spanning
U_R	effectieve (actieve) spanning
U_L	inductieve blindspanning
U_C	capacitieve blindspanning
Z	schijnweerstand (reactantie)
R	effectieve weerstand
X_L	inductieve schijnweerstand (inductantie)
X_C	capacitieve schijnweerstand (capacitantie)
φ	fasehoek (faseverschuiving)

Voorbeeld: $R = 100 \, \Omega$; $X_L = 180 \, \Omega$; $X_C = 60 \, \Omega$; $Z = ?$; $\varphi = ?$

$$Z = \sqrt{(100 \, \Omega)^2 + (180 \, \Omega - 60 \, \Omega)^2} = 156,2 \, \Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{100 \, \Omega}{156,2 \, \Omega} = 0,64 \rightarrow \varphi = 50,2^\circ$$

2.1.14 Parallelschakeling van effectieve weerstand, capacitieve en inductieve schijnweerstand



Figuur 2.14

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

$$Z = \frac{U}{I}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right)^2}$$

$$Z = \frac{R \cdot X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad \text{met} \quad X = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L - X_C}$$

$$\cos \varphi = \frac{G}{Y} = \frac{Z}{R} = \frac{I_R}{I}$$

I	stroom
I_R	effectieve (actieve) stroom
I_L	inductieve blindstroom
I_C	capacitieve blindstroom
Y	admittantie
G	geleiding
B_L	inductieve susceptantie
B_C	capacitieve susceptantie

Voorbeeld: $I_R = 10 \text{ mA}$; $I_L = 20 \text{ mA}$; $I_C = 5 \text{ mA}$; $I = ?$; $\varphi = ?$

$$I = \sqrt{(10 \text{ mA})^2 + (20 \text{ mA} - 5 \text{ mA})^2} = 18 \text{ mA}$$

$$\cos \varphi = \frac{10 \text{ mA}}{18 \text{ mA}} = 0,55 \rightarrow \varphi = 56,3^\circ$$

2.1.15 Seriekring

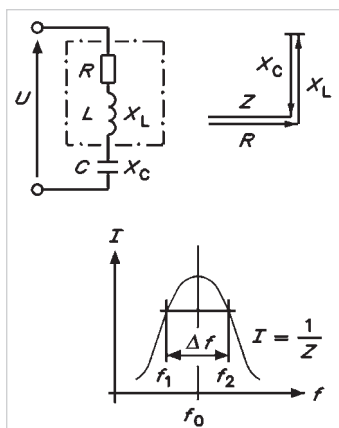
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

bij resonantie is $X_L = X_C$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{d} = \frac{1}{\tan \delta}$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} = f_0 \cdot d$$



Figuur 2.15

Z	schijnweerstand (reactantie)
f_0	resonantiefrequentie
Q	kwaliteitsfactor
d	damping (verliesfactor) ($= \tan \delta$)
Δf	bandbreedte
f_1	onderste grensfrequentie (kantelfrequentie)
f_2	bovenste grensfrequentie (kantelfrequentie)

Voorbeeld: $L = 0,1 \text{ mH}$; $C = 10 \text{ nF}$; $R = 10 \text{ } \Omega$; $f_0 = ?$; $Z = ?$; $\Delta f = ?$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ As/V}}} = 159 \text{ kHz}$$

$$Z = R = 10 \text{ } \Omega; \quad Q = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 159 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}}{10 \text{ V/A}} = 10$$

$$\Delta f = \frac{159 \cdot 10^3 \text{ Hz}}{10} = 15,9 \text{ kHz}$$

2.1.16 Parallelkring

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

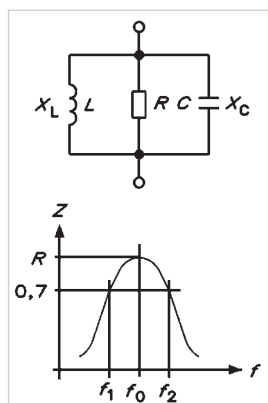
bij resonantie is $B_L = B_C$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

$$Q = \frac{R}{\omega_0 \cdot L} = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}; \quad Q = \frac{1}{d}$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} = f_0 \cdot d$$

Y	admittantie
f_0	resonantiefrequentie
Q	kwaliteitsfactor
G	geleiding
B_L	inductieve susceptantie
B_C	capacitieve susceptantie
f_1	onderste grensfrequentie (kantelfrequentie)
f_2	bovenste grensfrequentie (kantelfrequentie)



Figuur 2.16

Voorbeeld: $L = 0,1 \text{ mH}$; $C = 10 \text{ nF}$; $R = 10 \text{ k}\Omega$; $f_0 = ?$; $Z = ?$; $Q = ?$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ As/V}}} = 159 \text{ kHz}$$

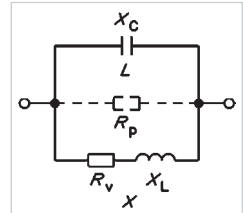
$$Z = R = 10 \text{ k}\Omega; \quad Q = 10 \text{ k}\Omega \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-9} \text{ As/V}}{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}}} = 100$$

2.1.17 Parallelkring met serie-verliesweerstand

$$R_p \approx \frac{L}{C \cdot R_v} = \frac{X_L^2}{R_v} = \frac{X_C^2}{R_v}; \quad R_p \approx Q^2 \cdot R_v$$

Voorbeeld: $L = 0,1 \text{ mH}$; $C = 10 \text{ nF}$; $R_v = 10 \text{ }\Omega$;
 $R_p = ?$

$$R_p = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}}{10 \cdot 10^{-9} \text{ As/V} \cdot 10 \text{ V/A}} = 1 \text{ k}\Omega$$



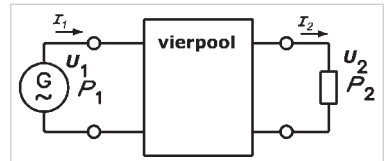
Figuur 2.17

2.2 Damping, versterking, niveau

2.2.1 Dempingsfactoren

$$D_p = \frac{P_1}{P_2}; \quad D_U = \frac{U_1}{U_2}$$

$$D_I = \frac{I_1}{I_2}$$



Figuur 2.18

D_p vermogens-dempingsfactor
 D_U spannings-dempingsfactor
 D_I stroom-dempingsfactor

Voorbeeld: $P_1 = 500 \text{ mW}$; $P_2 = 25 \text{ mW}$; $D_p = ?$

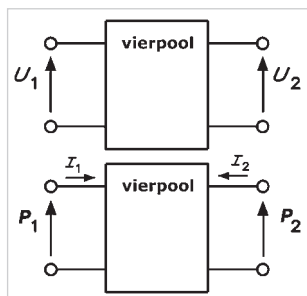
$$D_p = \frac{500 \text{ mW}}{25 \text{ mW}} = 20$$

2.2.2 Overdrachtsfactoren

$$A_P = \frac{P_2}{P_1}$$

$$A_U = \frac{U_2}{U_1}; \quad A_I = \frac{I_2}{I_1}$$

A_P vermogens-overdrachtsfactor
 A_U spannings-overdrachtsfactor
 A_I stroom-overdrachtsfactor



Figuur 2.19

2.2.3 Dempingsfactoren in bel

$$a_U = \log \frac{U_1}{U_2}$$

a_U dempingsfactor in B (bel)
 log logaritme bij het grondtal 10

Voorbeeld: $U_1 = 500 \text{ mV}$; $U_2 = 25 \text{ mV}$; $a_U = ?$

$$a_U = \log \frac{500 \text{ mV}}{25 \text{ mV}} = 1,3 \text{ B}$$

2.2.4 Dempingsfactoren in decibel

$$a_P = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}; \quad a_U = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2}$$

$$a_I = 20 \cdot \log \frac{I_1}{I_2}$$

a dempingsfactor in dB (decibel)

Voorbeeld: $P_1 = 500 \text{ mW}$; $P_2 = 25 \text{ mW}$; $a_P = ?$

$$a_P = 10 \cdot \log \frac{500 \text{ mW}}{25 \text{ mW}} = 13 \text{ dB}$$

2.2.5 Overdrachtsfactoren in decibel

$$-a_P = v_P = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}; \quad -a_U = v_U = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2}$$

$$-a_I = v_I = 20 \cdot \log \frac{I_1}{I_2}$$

v versterkingsfactor in dB

2.2.6 Dempingsfactor in neper

$$a_U = \ln \frac{U_1}{U_2}$$

a_U demping in Np (neper)
 $\ln$ logaritme bij het grondtal e (natuurlijke logaritme)

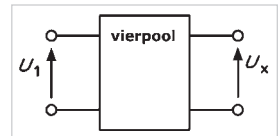
Voorbeeld: $U_1 = 500 \text{ mV}$; $U_2 = 25 \text{ mV}$; $a_U = ?$

$$a_U = \ln \frac{500 \text{ mV}}{25 \text{ mV}} = 3 \text{ Np}$$

2.2.7 Relatief niveau

$$L_{\text{rel}} = 20 \cdot \log \frac{U_x}{U_1}$$

L_{rel} relatief niveau in dB μ V

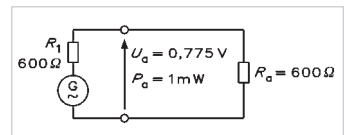


Figuur 2.20

2.2.8 Absoluut niveau in decibel

$$L_{\text{pabs}} = 10 \cdot \log \frac{P_x}{1 \text{ mW}}$$

abs. vermogensniveau L_{pabs} in dBm



Figuur 2.21

$$L_{U_{abs}} = 20 \cdot \log \frac{U_x}{775 \text{ mV}}$$

absoluut spanningsniveau $L_{U_{abs}}$ in dBV

$$L_{I_{abs}} = 20 \cdot \log \frac{I_x}{1,29 \text{ mA}}$$

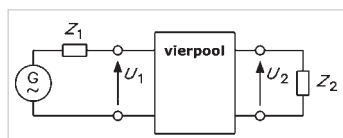
absoluut stroomniveau $L_{I_{abs}}$ in dBI

2.2.9 Effectieve demping

$$a_{eff} = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} + 10 \cdot \log \frac{Z_2}{Z_1}$$

effectieve demping a_{eff} in dB

De vierpool kan zowel een leiding als een complexe schakeling zijn.



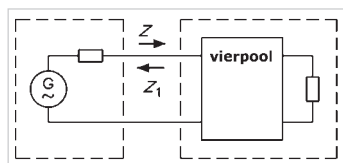
Figuur 2.22

2.2.10 Reflectiedemping

$$a_R = 20 \cdot \log \frac{Z_1 + Z}{Z_1 - Z} = 20 \cdot \log \frac{1}{r}$$

reflectiedemping a_R in dB

De reflectiedemping is een maat voor de grootte van de reflectie aan het uiteinde van de leiding.



Figuur 2.23

2.2.11 Overspraakdemping

$$a_O = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}; \quad a_O = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} = 10 \cdot \log \frac{Z_2}{Z_1}$$

overspraakdemping a_O in dB

De overspraakdemping is de verhouding van het vermogen P_1 tot het vermogen P_2 dat van leiding 1 in leiding 2 wordt ingekoppeld.

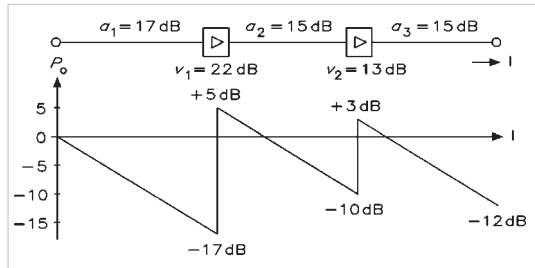
2.2.12 Totale demping van een transmissieweg

$$\alpha = \frac{a}{l}$$

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + \dots$$

$$v = v_1 + v_2 + v_3 + \dots$$

$$a_{\text{eff}} = L_1 - L_2$$



Figuur 2.24

- a demping in dB
- l lengte van de leiding in km
- α karakteristieke demping in dB/km
- v versterking in dB
- L_1 signaalniveau in punt 1
- L_2 signaalniveau in punt 2

Voorbeeld: $a_1 = 17 \text{ dB}$; $a_2 = 15 \text{ dB}$; $a_3 = 15 \text{ dB}$; $a = ?$; $v = ?$; $a_{\text{eff}} = ?$

$$a = 17 \text{ dB} + 15 \text{ dB} + 15 \text{ dB} = 47 \text{ dB}$$

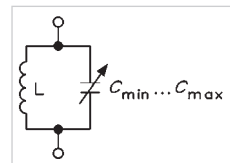
$$v = 22 \text{ dB} + 13 \text{ dB} = 35 \text{ dB}$$

$$a_{\text{eff}} = 47 \text{ dB} - 35 \text{ dB} = 12 \text{ dB}$$

2.2.13 Variabele resonantiefrequentie met draaicondensator

$$\frac{f_{0\text{max}}}{f_{0\text{min}}} = \sqrt{\frac{C_{\text{max}}}{C_{\text{min}}}}$$

- $f_{0\text{max}}$ hoogste instelbare frequentie
- $f_{0\text{min}}$ laagste instelbare frequentie
- C_{max} grootste capaciteit
- C_{min} kleinste capaciteit



Figuur 2.25

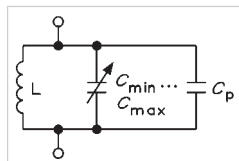
Voorbeeld: $C_{\text{max}} = 350 \text{ pF}$; $C_{\text{min}} = 50 \text{ pF}$; $f_{0\text{max}}/f_{0\text{min}} = ?$

$$\frac{f_{0\text{max}}}{f_{0\text{min}}} = \sqrt{\frac{350 \text{ pF}}{50 \text{ pF}}} = 2,6$$

2.2.14 Variabele resonantiefrequentie met draaicondensator en parallelcondensator

$$\frac{f_{0\max}}{f_{0\min}} = \sqrt{\frac{C_{\max} + C_p}{C_{\min} + C_p}}$$

C_p parallelcapaciteit

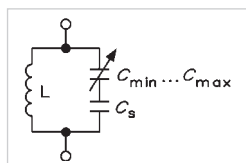


Figuur 2.26

2.2.15 Variabele resonantiefrequentie met draaicondensator en seriecondensator

$$\frac{f_{0\max}}{f_{0\min}} = \sqrt{\frac{C_{\max} \cdot (C_{\min} + C_s)}{C_{\min} \cdot (C_{\max} + C_s)}}$$

C_s seriecapaciteit



Figuur 2.27

2.3 RC-, RL en LC-kringen

2.3.1 RC-laagdoorlaatfilter

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2 + 1}}$$

$$\tan \varphi = \omega \cdot R \cdot C$$

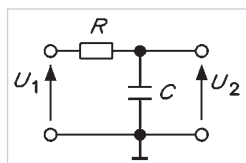
f_g grensfrequentie (kantelfrequentie)

U_2 uitgangsspanning

U_1 ingangsspanning

φ fasehoek (faseverschuiving)

ω cirkelfrequentie ($= 2 \cdot \pi \cdot f$)



Figuur 2.28

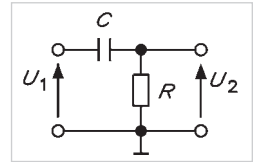
Voorbeeld: $R = 1 \text{ k}\Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$; $f_g = ?$

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^3 \text{ V/A} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ As/V}} = 159 \text{ Hz}$$

2.3.2 RC-hoogdoorlaatfilter

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2} + 1}}; \quad \tan \varphi = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}$$



Figuur 2.29

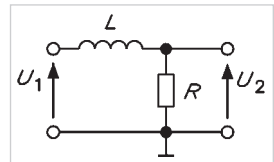
Voorbeeld: $R = 1 \text{ k}\Omega$; $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$; $f = 300 \text{ Hz}$; $\varphi = ?$

$$\tan \varphi = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 300 \text{ Hz} \cdot 1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ }\mu\text{F}} = 0,53 \rightarrow \varphi = 28^\circ$$

2.3.3 RL-laagdoorlaatfilter

$$f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L}; \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)^2 + 1}}$$

$$\tan \varphi = \frac{\omega \cdot L}{R}$$



Figuur 2.30

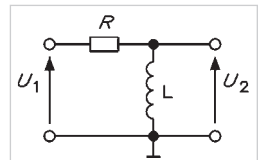
Voorbeeld: $R = 1 \text{ k}\Omega$; $L = 10 \text{ mH}$; $f_g = ?$

$$f_g = \frac{1 \cdot 10^3 \text{ V/A}}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}} = 15,9 \text{ kHz}$$

2.3.4 RL-hoogdoorlaatfilter

$$f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R}{\omega \cdot L}\right)^2 + 1}}; \quad \tan \varphi = \frac{R}{\omega \cdot L}$$



Figuur 2.31

Voorbeeld: $R = 1 \text{ k}\Omega$; $L = 10 \text{ mH}$; $f_g = 15,9 \text{ kHz}$; $U_1 = 100 \text{ mV}$; $U_2 = ?$

$$U_2 = 0,1 \text{ V} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1 \text{ k}\Omega}{2 \cdot 3,14 \cdot 15,9 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ mH}}\right)^2 + 1}} = 71 \text{ mV}$$

2.3.5 LC-laagdoorlaatfilter (T- en π -netwerk)

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

vereenvoudigd: $R \approx C$

$$L = \frac{Z_0}{2 \cdot \pi \cdot f_g}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot Z_0}$$

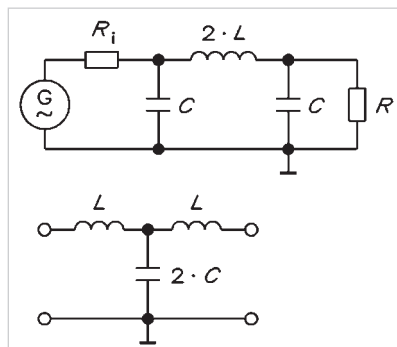
f_0 grensfrequentie (kantelfrequentie) in Hz

L zelfinductie in H

C capaciteit in F

Z_0 impedantie (golfweerstand)

R afsluit- of ingangsweerstand



Figuur 2.32

Dezelfde formules gelden voor een T-netwerk met twee spoelen van elk L henry en een condensator van $2 \cdot C$ farad en voor een π -netwerk met een spoel van $2 \cdot L$ henry en twee condensatoren van elk C farad.

Voorbeeld: π -laagdoorlaatfilter; $L = 10 \text{ mH}$; $C = 2 \mu\text{F}$; $Z_0 = ?$; $f_g = ?$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{10 \text{ mH}}{2 \mu\text{F}}} = 70,7 \Omega$$

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{10 \text{ mH} \cdot 2 \mu\text{F}}} = 1,12 \text{ kHz}$$

2.3.6 LC-hoogdoorlaatfilter (T- en π -netwerk)

Dezelfde formules gelden voor een T-netwerk met twee condensatoren van elk C farad en een spoel van $L/2$ henry en voor een π -netwerk met een condensator van $C/2$ farad en twee spoelen van elk L henry.

$$L = \frac{Z_0}{2 \cdot \pi \cdot f_0}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot Z_0}$$

$$\pi\text{-netwerk: } R = 0,8 \cdot Z_0$$

$$T\text{-netwerk: } R = 1,25 \cdot Z_0$$

$$\text{vereenvoudigd: } R \approx Z_0$$

Voorbeeld: π -hoogdoorlaatfilter; $f_g = 2 \text{ kHz}$; $R = 1 \text{ k}\Omega$; $Z_0 = ?$; $L = ?$; $C = ?$

$$Z_0 = \frac{1 \text{ k}\Omega}{0,8} = 1,25 \text{ k}\Omega$$

$$L = \frac{1,25 \text{ k}\Omega}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ kHz}} = 0,1 \text{ H}$$

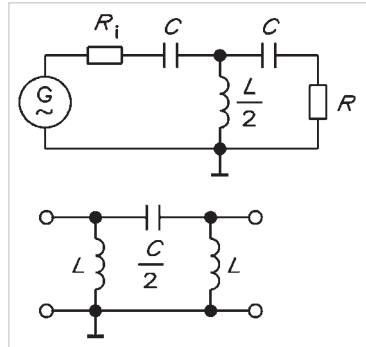
$$C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ kHz} \cdot 1,25 \text{ k}\Omega} = 63,7 \text{ nF}$$

Voorbeeld: T-hoogdoorlaatfilter; $f_g = 2 \text{ kHz}$; $R = 1 \text{ k}\Omega$; $Z_0 = ?$; $L = ?$; $C = ?$

$$Z_0 = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1,25} = 800 \Omega$$

$$L = \frac{800 \Omega}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ kHz}} = 64 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ kHz} \cdot 800 \Omega} = 100 \text{ nF}$$



Figuur 2.33

2.4 Transformatoren

$$U_{01} = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe} \cdot f \cdot N_1$$

$$U_{02} = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe} \cdot f \cdot N_2$$

$$A_{Fe} = A_g \cdot f_{Fe}$$

U_{01} inductiespanning in wikkeling 1

U_{02} inductiespanning in wikkeling 2

$\hat{B}$ topwaarde van de magnetische inductie

A_{Fe} effectieve ijzerdoorsnede in m^2

f frequentie

A_g geometrische ijzerdoorsnede in m^2

f_{Fe} ijzervulfactor

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot k; \quad k \approx 1 \text{ voor nettransformatoren}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

N_1, N_2 aantallen windingen

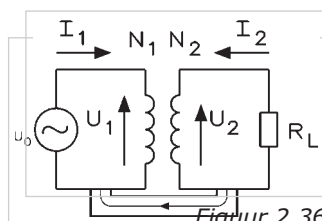
U_1 primaire spanning

U_2 secundaire spanning

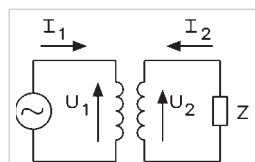
I_1 primaire stroom

I_2 secundaire stroom

T transformatieverhouding



Figuur 2.34



Figuur 2.35

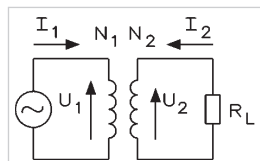
Voorbeeld: $U = 230 \text{ V}$; $I_1 = 0,1 \text{ A}$; $N_1 = 500$; $N_2 = 50$; $U_2 = ?$; $I_2 = ?$

$$U_2 = 230 \text{ V} \cdot \frac{50}{500} = 23 \text{ V}; \quad I_2 = 0,1 \text{ A} \cdot \frac{500}{50} = 1 \text{ A}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}; \quad Z_1 = T^2 \cdot Z_2$$

Z_1 AC-ingangsweerstand

Z_2 AC-uitgangsweerstand



Figuur 2.36

Voorbeeld: $Z_2 = 4 \Omega$; $N_1 = 1000$; $N_2 = 100$; $Z_1 = ?$

$$Z_1 = \left(\frac{1000}{100} \right)^2 \cdot 4 \Omega = 400 \Omega$$

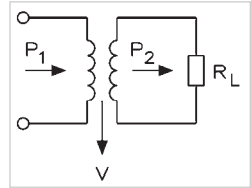
2.4.1 Transformatorverliezen

$$S_1 = S_2$$

(zonder verliezen)

$$P_1 = P_2 + V_{Fe} + V_{Cu}$$

(met verliezen)



Figuur 2.37

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + V_{Fe} + V_{Cu}}; \quad I_1 = \frac{P_1}{U}; \quad V = V_{Fe} + V_{Cu} = P_1 - P_2$$

S_1	schijnbaar ingangsvermogen
S_2	schijnbaar uitgangsvermogen
P_1	effectief ingangsvermogen
P_2	effectief uitgangsvermogen
V_{Fe}	ijzerverliezen
V_{Cu}	koperverliezen

Voorbeeld: $U = 230 \text{ V}/24 \text{ V}$; $P_2 = 200 \text{ W}$; $\eta = 0,92$; $I_1 = ?$; $V = ?$

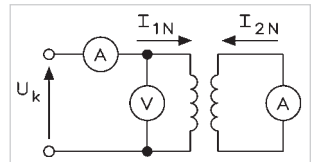
$$P_1 = \frac{200 \text{ W}}{0,92} = 217,4 \text{ W}; \quad I_1 = \frac{217,4 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 0,95 \text{ A}$$

$$V = 217,4 \text{ W} - 200 \text{ W} = 17,4 \text{ W}$$

2.4.2 Kortsluitvastheid van een transformator

$$u_k = 100 \cdot \frac{U_k}{U}; \quad I_{k(c)} = 100 \cdot \frac{I_N}{I_k}$$

u_k	kortsluitspanning in %
U_k	kortsluitspanning in V
U	netspanning
I_{1N}	nominale ingangsstroom
I_{2N}	nominale uitgangsstroom
$I_{k(c)}$	continue kortsluitstroom



Figuur 2.38

Voorbeeld: $U_k = 10 \text{ V}$; $U = 230 \text{ V}$; $u_k = ?$

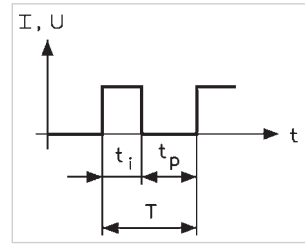
$$u_k = 100 \cdot \frac{10 \text{ V}}{230 \text{ V}} = 4,3\%$$

2.5 Blokgolven

$$T = t_{\text{impuls}} + t_{\text{pauze}}; \quad f = \frac{1}{T}$$

$$df = \frac{T}{t_{\text{impuls}}}; \quad \delta = \frac{1}{df} = \frac{t_{\text{impuls}}}{T}$$

T	periodeduur, periodetijd
t_i	impulsduur ($= t_{\text{impuls}}$)
t_p	pauzeduur ($= t_{\text{pauze}}$)
df	duty factor
δ	duty cycle



Figuur 2.39

Voorbeeld: $t_i = 1 \text{ ms}$; $t_p = 2 \text{ ms}$; $f = ?$; $df = ?$ $\delta = ?$

$$T = 1 \text{ ms} + 2 \text{ ms} = 3 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{3 \text{ ms}} = 333 \text{ Hz}$$

$$df = \frac{3 \text{ ms}}{1 \text{ ms}} = 3$$

$$\delta = \frac{1 \text{ ms}}{3 \text{ ms}} = 0,33$$

2.5.1 Effectieve waarde van een blokgolf

$$U = U_i \cdot \sqrt{\frac{t_i}{T}} = U_i \cdot \sqrt{\delta} = \frac{U_i}{\sqrt{df}}$$

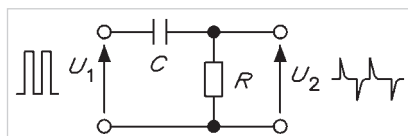
U	effectieve waarde gedurende een periode T
U_i	impulsspanning (hoogte)
t_i	impulsduur
δ	duty cycle
df	duty factor

2.5.2 Differentiator

$$U_2 = R \cdot C \cdot \frac{dU}{dt}$$

$$\tau = R \cdot C$$

τ tijdconstante in s



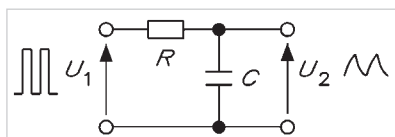
Figuur 2.40

2.5.3 Integrator

$$U_2 = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int U \cdot dt$$

$$\tau = R \cdot C$$

τ tijdconstante in s



Figuur 2.41

2.5.4 RC-banddoorlaatfilter (brug van Wien)

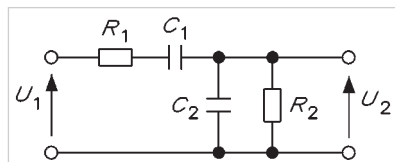
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2}}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}}$$

Als $R_1 = R_2$ en $C_1 = C_2$ dan geldt

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad \text{met} \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{3}$$

U_1 ingangsspanning
 U_2 uitgangsspanning



Figuur 2.42

Voorbeeld: $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$; $f_0 = ?$

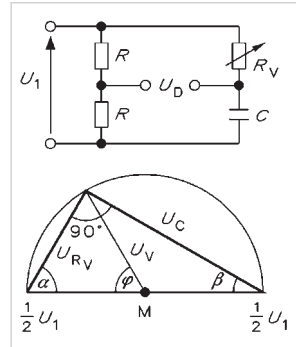
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF}} = 1,59 \text{ kHz}$$

2.5.5 Fasedraaier of fasebrug

$$R_V = \sqrt{R_{\min} \cdot R_{\max}} = X_C$$

r straal van de omgeschreven cirkel
 U_V spanningsverschil
 R_V variabele weerstand

De waarde van de variabele weerstand moet zo worden gekozen dat het meetkundig gemiddelde van de beginweerstand $R_{\min}$ en de eindweerstand $R_{\max}$ gelijk is aan de capacatieve schijnweerstand van C .



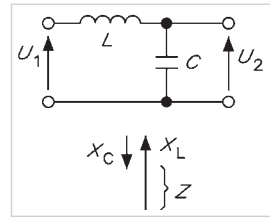
Figuur 2.43

2.5.6 LC-kring

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{X_C}{Z} = U_1 \cdot \frac{X_C}{X_L - X_C}$$

$$f = \frac{U_1}{U_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot C \cdot Z}; \quad s = \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z}{X_C}$$

U_1 ingangsspanning
 U_2 uitgangsspanning
 s filterfactor (spanningsverhouding)



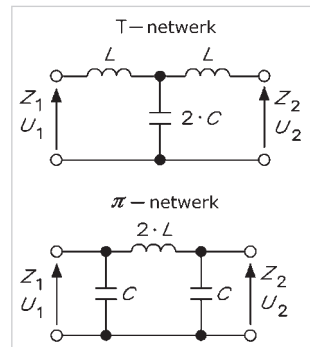
Figuur 2.44

2.5.7 LC-kring (T- en π -netwerk)

$$Z_1 = Z_2 = Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

$$L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_g}; \quad C = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot Z}$$



Figuur 2.45

Z_1 ingangsweerstand in Ω
 Z_2 uitgangsweerstand in Ω
 f_g grensfrequentie (kantelfrequentie) in Hz

doorlaatbereik: $f < f_g$
 stop- of sperbereik: $f > f_g$

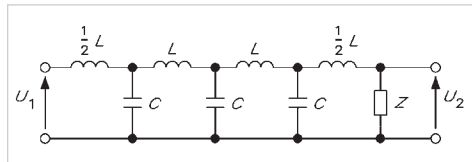
Dezelfde formules gelden voor een T-netwerk met twee spoelen van elk L henry en een condensator van $2 \cdot C$ farad en voor een π -netwerk met een spoel van $2 \cdot L$ henry en twee condensatoren van elk C farad.

2.5.8 LC-vertragslijn

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\tau = \sqrt{L \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g}$$

Z afsluitweerstand
 τ looptijd voor een halve sectie
 f_g grensfrequentie (kantelfrequentie)



Figuur 2.46

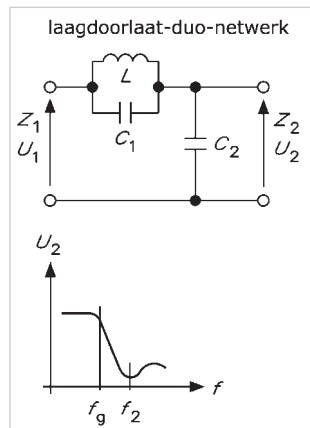
Een spanningsprong aan de ingang komt met een vertraging bij de uitgang aan.

2.5.9 Laagdoorlaat-duo-netwerk

De steile flank van het duo-netwerk wordt verkregen met behulp van een op f_2 afgestemde parallelkring (L en C_1). Condensator C_2 en spoel L moeten worden gedimensioneerd op resonantie bij de grensfrequentie f_g .

Voor de praktische berekening wordt de verhouding $f_g:f_2$ vastgelegd op een waarde van 0,8...0,95. Wanneer R de bij Z_2 aangelegde afsluitweerstand is, dan heeft het netwerk een nominale impedantie van $Z_0 = 1,25 \cdot R$. Onder deze voorwaarden geldt:

$$Z_0 = 1,25 \cdot R$$



Figuur 2.47

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_g}{f_2}\right)^2}; \quad L = m \cdot \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_g}$$

$$C_1 = \frac{1 - m^2}{m} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot Z}; \quad C_2 = m \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot Z}$$

$$f_g = \frac{m \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

f_2	grensfrequentie van sperkring LC_1 in Hz
L	zelfinductie in H
C_1	capaciteit in F
C_2	capaciteit in F
Z_2	karakteristieke impedantie van het netwerk
m	filterconstante

2.5.10 LC-banddoorlaatfilter

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}}$$

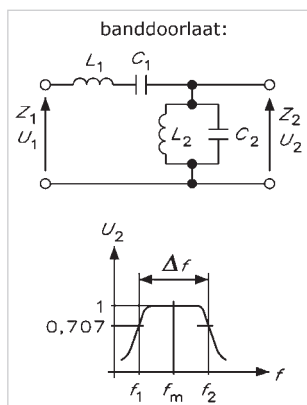
$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}; \quad \Delta f = f_2 - f_1$$

Voor $Z_1 = Z_2 = Z$ geldt:

$$L_1 = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f}; \quad C_1 = \frac{\Delta f}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_1 \cdot f_2}$$

$$L_2 = \frac{Z \cdot \Delta f}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot f_2}; \quad C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot \Delta f}$$

f_1	onderste grensfrequentie (kantelfrequentie) in Hz
f_2	bovenste grensfrequentie (kantelfrequentie) in Hz
f_c	centrale frequentie (middenfrequentie) in Hz
L_1, C_1	seriekring (in H en F)
L_2, C_2	parallelkring (in H en F)
Δf	bandbreedte in Hz



Figuur 2.48

2.5.11 LC-bandsperfilter

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}}$$

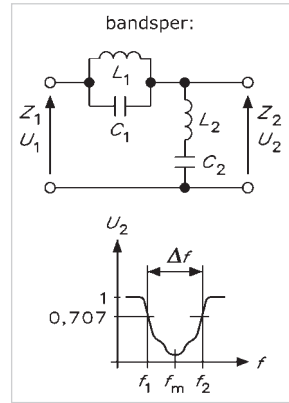
$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}; \quad \Delta f = f_2 - f_1$$

Voor $Z_1 = Z_2 = Z$ geldt:

$$L_1 = \frac{\Delta f \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot f_2}; \quad C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot \Delta f}$$

$$L_2 = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f}; \quad C_2 = \frac{\Delta f}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_1 \cdot f_2}$$

f_1 onderste grensfrequentie (kantelfrequentie) in Hz
 f_2 bovenste grensfrequentie (kantelfrequentie) in Hz
 f_c centrale frequentie (middenfrequentie) in Hz
 L_1, C_1 seriekring (in H en F)
 L_2, C_2 parallelkring (in H en F)
 Δf bandbreedte in Hz



Figuur 2.49

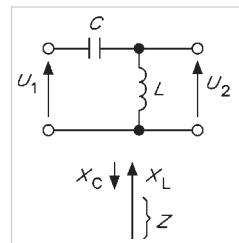
2.5.12 CL-kring

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{X_L}{Z} = U_1 \cdot \frac{X_L}{X_L - X_C}$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\omega L}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}$$

$$s = \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z}{X_L}$$

U_1 ingangsspanning
 U_2 uitgangsspanning
 s filterfactor (spanningsverhouding)



Figuur 2.50

2.5.13 Hoogdoorlaat-duo-netwerk

De steile flank van het duo-netwerk wordt verkregen met behulp van een op f_1 afgestemde parallelkring (L_1 en C). Condensator C en spoel L_2 moeten worden gedimensioneerd op resonantie bij de grensfrequentie f_g .

Voor de praktische berekening wordt de verhouding $f_g:f_1$ vastgelegd op een waarde van 0,8...0,95. Wanneer R de bij Z_2 aangelegde afsluitweerstand is, dan heeft het netwerk een nominale impedantie van $Z_2 = 1,25 \cdot R$. Onder deze voorwaarden geldt:

$$Z_2 = 1,25 \cdot R$$

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_1}{f_g}\right)^2};$$

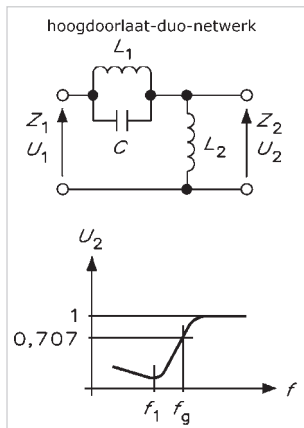
$$C = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot Z}$$

$$L_1 = \frac{m}{1 - m^2} \cdot \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_g};$$

$$L_2 = \frac{1}{m} \cdot \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_g}$$

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot m \cdot Z}$$

f_1	grensfrequentie van sperkring $L_1 C$ in Hz
L_1	zelfinductie in H
L_2	zelfinductie in H
C	capaciteit in F
m	filterconstante
Z	karakteristieke impedantie van het netwerk
R	afsluitweerstand

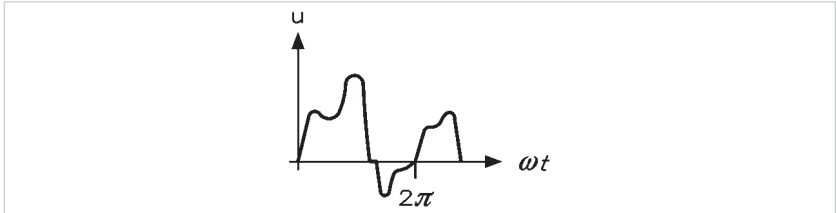


Figuur 2.51

2.5.14 Fourier-reeksen

Willekeurige periodieke golfvorm

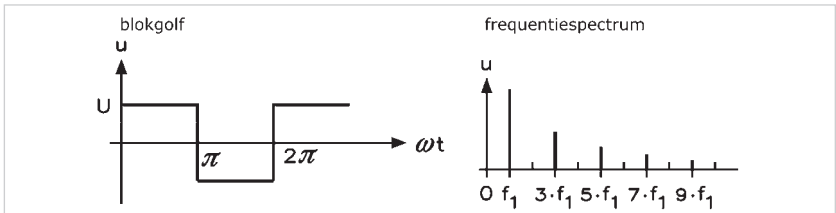
$$f(t) = u_0 + u_1 \cos \omega t + u_2 \cos 2\omega t + u_3 \cos 3\omega t + \dots \\ + u'_1 \sin \omega t + u'_2 \sin 2\omega t + u'_3 \sin 3\omega t + \dots$$



Figuur 2.52

Blokgolf

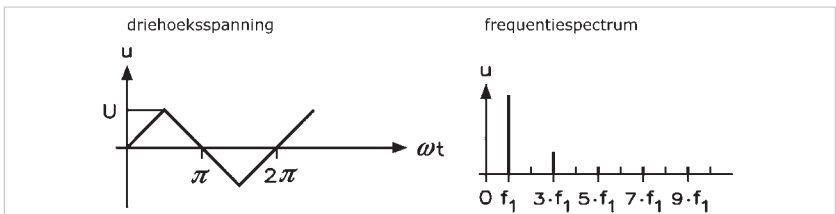
$$f(t) = \frac{4 \cdot U}{\pi} \cdot \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$



Figuur 2.53

Driehoeksspanning

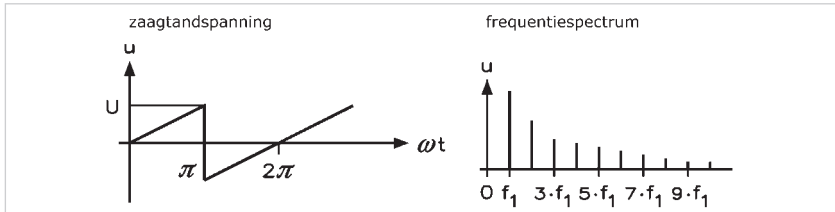
$$f(t) = \frac{8 \cdot U}{\pi^2} \cdot \left(\sin \omega t + \frac{1}{3^2} \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega t + \dots \right)$$



Figuur 2.54

Zaagtandspanning

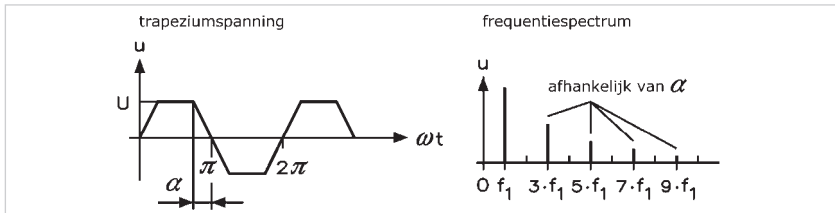
$$f(t) = \frac{2 \cdot U}{\pi} \cdot \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \dots \right)$$



Figuur 2.55

Trapeziumspanning

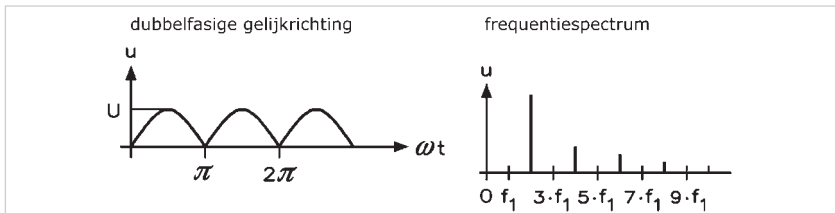
$$f(t) = \frac{4 \cdot U}{\pi \cdot \alpha} \cdot \left(\sin \alpha \cdot \sin \omega t + \frac{\sin 3\alpha}{3^2} \cdot \sin 3\omega t + \frac{\sin 5\alpha}{5^2} \cdot \sin 5\omega t + \dots \right)$$



Figuur 2.56

Dubbelfasige gelijkrichting

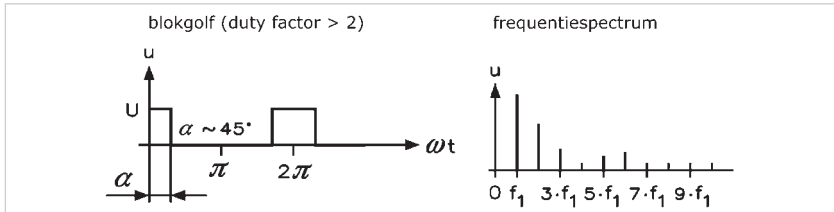
$$f(t) = \frac{4 \cdot U}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 \cdot 3} \cdot \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cdot \cos 4\omega t - \frac{1}{5 \cdot 7} \cdot \cos 6\omega t - \dots \right)$$



Figuur 2.57

Blokgolf met duty factor > 2

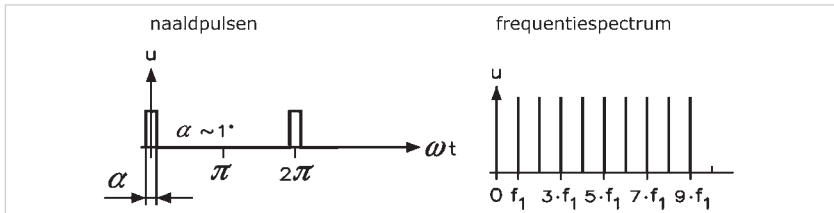
$$f(t) = \frac{2 \cdot U}{\pi} \cdot \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\sin \alpha}{1} \cdot \cos \omega t + \frac{\sin 2\alpha}{2} \cdot \cos 2\omega t + \frac{\sin 3\alpha}{3} \cdot \cos 3\omega t + \dots \right)$$



Figuur 2.58

Naaldpulsen

$$f(t) = \frac{4 \cdot U}{\pi} \cdot \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\sin \alpha}{1} \cdot \cos \omega t + \frac{\sin 3\alpha}{3} \cdot \cos \omega t + \frac{\sin 5\alpha}{5} \cdot \cos 5\omega t + \dots \right)$$



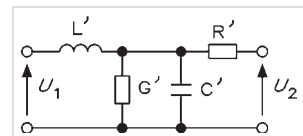
Figuur 2.59

2.5.15 Golfweerstand

Voor verliesvrije leidingen geldt:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

\$Z\$ golfweerstand
 \$L'\$ (serie)zelfinductie per km
 \$C'\$ (shunt)capaciteit per km



Figuur 2.60

Voor niet-verliesvrije leidingen geldt:

$$Z = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}; \quad Z = \frac{U}{I}; \quad Z = \sqrt{Z_O \cdot Z_K}$$

- R' (serie)weerstand per km
 G' (shunt)geleiding per km
 Z_O golfweerstand bij open uitgang
 Z_K golfweerstand bij kortgesloten uitgang

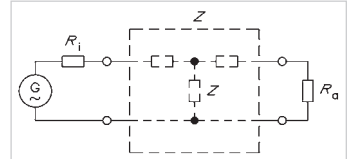
Voorbeeld: golfweerstand bij open uitgang 360Ω ;
 golfweerstand bij kortgesloten uitgang 10Ω ; $Z = ?$

$$Z = \sqrt{360 \Omega \cdot 10 \Omega} = 60 \Omega$$

Aanpassing (maximaal vermogen):

$$R_i = Z = R_a$$

- R_i inwendige weerstand van de spanningsbron
 R_a afsluitweerstand van de leiding



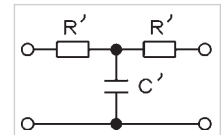
Figuur 2.61

2.6 Karakteristieke grootheden van leidingen

2.6.1 Golfweerstand, dempingsfactor, voortplantingssnelheid (kabel)

Voor lage frequenties geldt:

$$Z = \sqrt{\frac{R'}{\omega \cdot C'}}; \quad \alpha = \sqrt{\frac{\omega \cdot R' \cdot C'}{2}}; \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega}{R' \cdot C'}}$$



Figuur 2.62

- ω cirkelfrequentie van het te transporteren signaal
 α dempingsconstante in dB/km
 v voortplantingssnelheid

Voorbeeld: kabel met $R' = 100 \Omega/\text{km}$; $f = 1 \text{ kHz}$; $C = 32 \text{ nF/km}$;
 $Z = ?$; $\alpha = ?$; $v = ?$

$$Z = \sqrt{\frac{100 \Omega/\text{km}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 32 \text{ nF/km}}} = 700 \Omega$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 100 \Omega/\text{km} \cdot 32 \text{ nF/km}}{2}} = 0,1 \text{ dB/km}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz}}{100 \Omega/\text{km} \cdot 32 \text{ nF/km}}} = 62650 \text{ km/s}$$

2.6.2 Golfweerstand (hoogfrequent-leiding of -kabel)

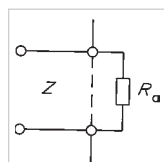
$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Z	golfweerstand in Ω
L	zelfinductie van de leiding in H/m
C	capaciteit van de leiding in F/m

2.6.3 Reflectiecoëfficiënt

$$r = \frac{R_a - Z}{R_a + Z}$$

De reflectiecoëfficiënt r is gelijk aan de verhouding van de gereflecteerde en de heengaande golf.



Figuur 2.63

2.6.4 Reflectiedemping

$$a_R = 20 \cdot \log \frac{1}{r} \quad (\text{in dB})$$

r reflectiecoëfficiënt

De reflectiedemping (ook wel terugstromingsdemping) is een maat voor de grootte van de reflectie aan het uiteinde van de leiding.

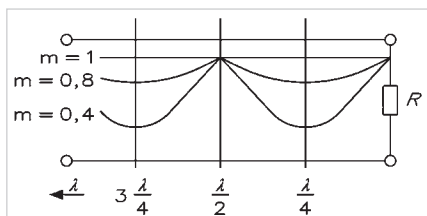
Aanpassingsfactor

$$m = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}$$

$$m = \frac{1-r}{1+r}$$

r reflectiecoëfficiënt

De aanpassingsfactor is de verhouding van spannings- of stroom-minimum tot spannings- of stroom-maximum.



Figuur 2.64

Verloop van spanning of stroom bij verschillende waarden van m .

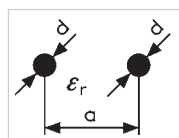
Staande golf-verhouding

$$s = \frac{1}{m}; \quad s = \frac{1+r}{1-r}$$

2.6.5 Golfweerstand in de praktijk*Niet-afgeschermde tweedraads geleider (lintkabel)*

$$Z \approx \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{2 \cdot a}{d}; \quad Z \approx \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \log \frac{2 \cdot a}{d}$$

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln(2 \cdot a/d)}; \quad L = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \ln \frac{2 \cdot a}{d}$$



Figuur 2.65

ϵ_0 permittiviteit van het vacuüm

ϵ permittiviteit van het medium

ϵ_r relatieve permittiviteit = diëlektrische constante ($\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$)

Voorbeeld: $\epsilon_r = 2$; $a = 8$ mm; $d = 1$ mm; $l = 10$ m; $Z = ?$; $C = ?$; $L = ?$

$$Z \approx \frac{120}{\sqrt{2}} \cdot \ln \frac{2 \cdot 8 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} \approx 235 \Omega$$

$$C = \frac{3,14 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm} \cdot 2 \cdot 10 \text{ m}}{\ln(8 \text{ mm}/1 \text{ mm})} = 200 \text{ pF}$$

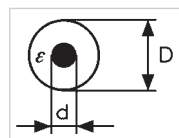
$$L = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \text{ m} \cdot \ln \frac{2 \cdot 8 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 11 \mu\text{H}$$

Coaxiale kabel

$$Z \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d}; \quad Z \approx \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \log \frac{D}{d}$$

Voorbeeld: $\epsilon_r = 2$; $D = 5$ mm; $d = 0,5$ mm; $Z = ?$

$$Z \approx \frac{60}{\sqrt{2}} \cdot \ln \frac{5 \text{ mm}}{0,5 \text{ mm}} \approx 98 \Omega$$

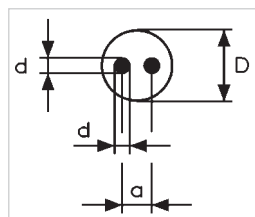


Figuur 2.66

Afgeschermd tweedraads geleider

$$Z \approx \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot a \cdot \left(1 - \frac{a}{D}\right)^2}{d \cdot \left(1 + \frac{a}{D}\right)^2} \right)$$

$$Z \approx \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \log \left(\frac{2 \cdot a \cdot \left(1 - \frac{a}{D}\right)^2}{d \cdot \left(1 + \frac{a}{D}\right)^2} \right)$$

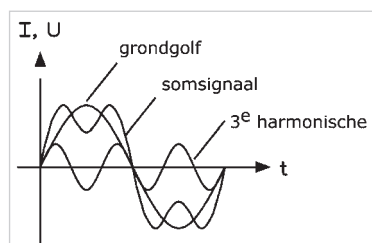


Figuur 2.67

2.6.6 Vervormingsfactor

$$k = \sqrt{\frac{U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + \dots}{U_{1f}^2 + U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + \dots}}$$

$$k = \sqrt{\frac{I_{2f}^2 + I_{3f}^2 + \dots}{I_{1f}^2 + I_{2f}^2 + I_{3f}^2 + \dots}}$$



Figuur 2.68

k	vervormingsfactor
U_{1f}	spanning grondgolf (= 1 ^e harmonische)
U_{2f}	spanning 2 ^e harmonische
U_{3f}	spanning 3 ^e harmonische

2.6.7 Vervorming in decibel

$$a_k = 20 \cdot \log \frac{1}{k}$$

a_k	vervorming in dB
k	vervormingsfactor

2.6.8 Skin-effect

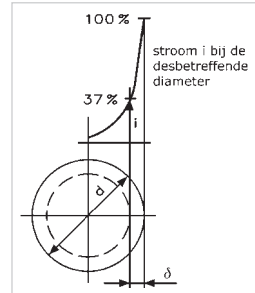
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_r \cdot \gamma}}$$

δ indringdiepte in μm , waar de stroom is afgenomen tot 37% ($= e^{-1}$) van de waarde aan het oppervlak van de geleider

μ_r relatieve permeabiliteit

γ soortelijke geleiding in $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$

f frequentie



Figuur 2.69

Voorbeeld: zilverdraad ($\gamma = 62,5 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$);
 $\mu_r = 1$; $f = 196 \text{ MHz}$; $\delta = ?$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot 3,14 \cdot 196 \text{ MHz} \cdot 1 \cdot 62,5 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2}} = 5,1 \mu\text{m}$$

$$R_{\text{hf}} = n \cdot R$$

voor $f > 10 \text{ MHz}$ geldt:

$$n = k \cdot d \cdot \sqrt{f}; \quad k = \frac{\sqrt{\gamma \cdot \mu_r}}{2} = \sqrt{\frac{\mu_r}{4 \cdot \rho}}$$

n vergrotingsfactor

ρ soortelijke weerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

k materiaalconstante

d draaddiameter in mm

2.6.9 Inductieve verhitting

$$\delta \approx \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{10^7}{f \cdot \mu_r \cdot \gamma}}; \quad f_{\text{min}} = 16 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{d^2 \cdot \mu_r \cdot \gamma}$$

δ indringdiepte in μm (stroom afgenomen tot 37%)

d diameter van het werkstuk in mm

μ_r relatieve permeabiliteit

γ soortelijke geleiding

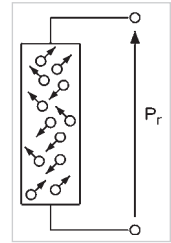
2.6.10 Ruis

$$P_r = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f; \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}}$$

bij 20 °C geldt:

$$P_r = 1,6 \cdot 10^{-20} \text{ W} \cdot \Delta f; \quad kT_0 = 4 \cdot 10^{-21} \frac{\text{W}}{\text{Hz}}$$

P_r ruisvermogen
 k constante van Boltzmann
 T temperatuur in K (kelvin)
 Δf bandbreedte
 kT_0 referentie-ruisvermogen



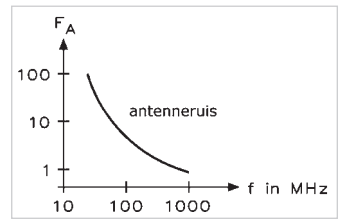
Figuur 2.70

$$F = 1 + F_z$$

$$U_r = \sqrt{F \cdot kT_0 \cdot R \cdot \Delta f}$$

$$F_{\text{eff}} = F + \frac{T_A - T_0}{T_0}$$

U_r ruisspanning
 F ruisgetal
 F_z 'zusatz Rauschzahl'
 F_{eff} effectief ontvanger-ruisgetal
 T_A ruistemperatuur antenne
 T_0 290 K (kelvin)



Figuur 2.71

2.7 Akoestiek

2.7.1 Golflengte van geluidsgolven

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ golflengte van geluidsgolven in m
 c voortplantingssnelheid (geluidssnelheid) in m/s
 f frequentie van de geluidsgolven in Hz

in lucht: $c = 343 \text{ m/s}$ (bij 20 °C en 1013,25 mbar)
 in water: $c = 1470 \text{ m/s}$ (bij 20 °C)
 in beton: $c = 1660 \text{ m/s}$
 in ijzer: $c = 5100 \text{ m/s}$

2.7.2 Geluidssnelheid in vaste stoffen

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

c_S geluidssnelheid in cm/s
 E elasticiteitsmodulus in μbar
 ρ dichtheid in g/cm^3

2.7.3 Geluidssnelheid in vloeistoffen

$$c_V = \frac{1}{\sqrt{B \cdot \rho}}$$

c_V geluidssnelheid in cm/s
 B compressibiliteit in μbar^{-1}
 ρ dichtheid in g/cm^3

2.7.4 Geluidssnelheid in gassen

$$c_G = \sqrt{\frac{\chi \cdot p_0}{\rho_0}}$$

c geluidssnelheid in cm/s
 p_0 dampdruk in μbar
 ρ_0 dichtheid van het gas bij p_0 in g/cm^3
 χ verhouding van de soortelijke warmten (c_p/c_v)

2.7.5 Geluidssnelheid in lucht

$$c_L = \sqrt{\frac{\chi \cdot p}{\rho}}; \quad \frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} \cdot (1 + a \cdot T)$$

$$c_{L0} = 331,5 \text{ m/s}; \quad c_L = 331,5 \cdot \sqrt{1 + a \cdot T} \text{ m/s}; \quad c_{L20} = 343 \text{ m/s}$$

$$\chi_{\text{lucht}} = 1,402; \quad p_0 = 101325 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ mbar};$$

$$\rho_0 = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \quad a = \frac{1}{273,15} = 3,661 \cdot 10^{-3}$$

x	verhouding van de soortelijke warmten (c_p/c_v)
p	luchtdruk in Pa (pascal)
p_0	luchtdruk bij 0 °C in Pa
ρ	dichtheid van de lucht in kg/m ³
ρ_0	dichtheid van de lucht bij 0 °C
T	temperatuur in °C
a	uitzettingscoëfficiënt van lucht
c_{L0}	geluidssnelheid in lucht bij 0 °C en 1013,25 mbar in m/s
c_L	geluidssnelheid in lucht bij T °C
c_{L20}	geluidssnelheid in lucht bij 20 °C

2.7.6 Geluidsdruk

$$p = v \cdot Z; \quad Z = c \cdot \rho \cdot \cos \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot r}; \quad 1 \mu\text{bar} = 0,1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}^2}$$

p	luchtdruk in μbar
v	momentane snelheid van de luchtdeeltjes in cm/s
Z	akoestische impedantie in $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
c	geluidssnelheid in cm/s
ρ	dichtheid van de lucht in g/cm^3
φ	fasehoek tussen p en v
λ	golflengte in m
r	afstand van de geluidsbron in m (voor een vlakke golf is $\cos \varphi = 1$)

2.7.7 Akoestische impedantie

$$Z_{\text{ak}} = \frac{p}{v \cdot A} = \frac{z}{A}$$

$$v = \frac{p}{Z_{\text{ak}} \cdot A} = \frac{p}{z}$$

Z_{ak}	akoestische impedantie in $\text{g}/(\text{cm}^4 \cdot \text{s})$
p	luchtdruk in μbar
v	momentane snelheid van de luchtdeeltjes in cm/s
z	specifieke akoestische impedantie in $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
A	oppervlak in m ²

2.7.8 Geluidsvermogen, geluidsintensiteit

$$P_{\text{ak}} = J \cdot A = p \cdot v \cdot A = v^2 \cdot z \cdot A = \frac{p^2 \cdot A}{z}$$

P_{ak} geluidsvermogen in $(\text{g} \cdot \text{cm}^2)/\text{s}^3$
 J geluidsintensiteit in g/s^3
 z specifieke akoestische impedantie in $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$

2.7.9 Geluidsdrukniveau

$$L = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$$

L geluidsdrukniveau in dB (decibel)
 p geluidsdruk in μbar
 p_0 referentie-geluidsdruk ($= 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$)

2.7.10 Luidheidsniveau

$$\Lambda = 20 \cdot \log \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}_0}$$

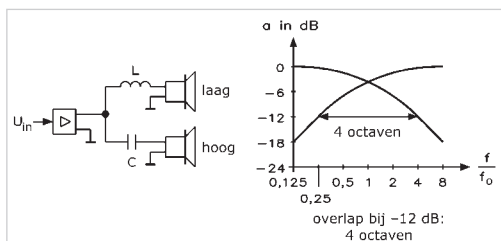
Λ luidheidsniveau in foon
 $\tilde{p}$ geluidsdruk van een willekeurige frequentie in μbar
 $\tilde{p}_0$ referentie-geluidsdruk ($= 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$)

1 $\mu\text{bar} \hat{=} 74$ foon bij 1000 Hz

2.7.11 Luidspreker-scheidingsfilter (6 dB per octaaf)

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot Z}$$

$$L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_0}$$



Figuur 2.72

f_0 overnamefrequentie
 Z luidsprekerimpedantie

2.7.12 Luidspreker-scheidingsfilter (12 dB per octaaf)

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot Z}$$

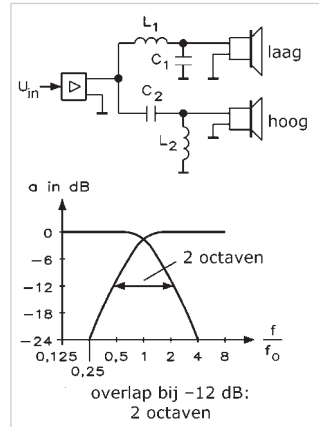
$$L_1 = L_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot f_0}$$

f_0 overnamefrequentie
 Z luidsprekerimpedantie

Voorbeeld: $Z_1 = Z_2 = 4 \Omega$; $f_0 = 1 \text{ kHz}$;
 $C = C_1 = C_2 = ?$;
 $L = L_1 = L_2 = ?$

$$C = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 4 \Omega} = 28 \mu\text{F}$$

$$L = \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \Omega}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz}}$$



Figuur 2.73

2.7.13 Gevoeligheid van luidsprekers

$$\bar{E}_K = \bar{B}_S \cdot \sqrt{Z} \cdot \frac{r}{r_0}$$

$\bar{E}_K$ karakteristieke gevoeligheid in $\mu\text{bar}/\sqrt{\text{VA}}$
 (overdrachtsfactor maal de wortel uit de schijnbare
 weerstand, ten opzichte van de referentie-afstand $r_0 = 1 \text{ m}$)

$\bar{B}_S$ gemiddelde van de overdrachtsfactor over een zeker
 frequentiebereik (bij voorkeur 0,25 kHz...4 kHz) in $\mu\text{bar}/\text{V}$

r afstand van de meetplaats tot de luidspreker in m
 r_0 referentie-afstand (= 1 m)

2.7.14 Reikwijdte van een luidspreker

$$r = \frac{E_K}{B_S \cdot \sqrt{Z}} = \frac{E_K \cdot \sqrt{P}}{p}$$

- r reikwijdte bij de gewenste geluidsdruk in m
 P opgenomen schijnbaar elektrisch vermogen in VA
 p gewenste geluidsdruk in μbar

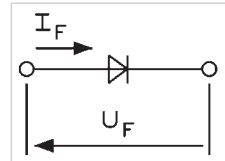
3 Dioden

3.1 Basisberekeningen

3.1.1 Dissipatie in een diode

$$P_V = U_F \cdot I_F$$

P_V dissipatie (verliesvermogen) in W
 U_F spanning in doorlaatrichting*
 I_F stroom in doorlaatrichting



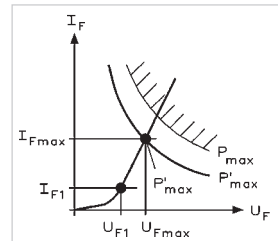
Figuur 3.1

3.1.2 Toelaatbare dissipatie in een diode

$$P'_{\max} = 0,9 \cdot P_{\max}$$

$$I_{F(\max)} = \frac{P_{\max}}{U_F}$$

$P'_{\max}$ maximaal (continu) verliesvermogen
 $P_{\max}$ absoluut maximaal verliesvermogen
 0,9 veiligheidsfactor



Figuur 3.2

Voorbeeld: $U_F = 0,7 \text{ V}$; $P_{\max} = 5 \text{ W}$; $I_{F(\max)} = ?$

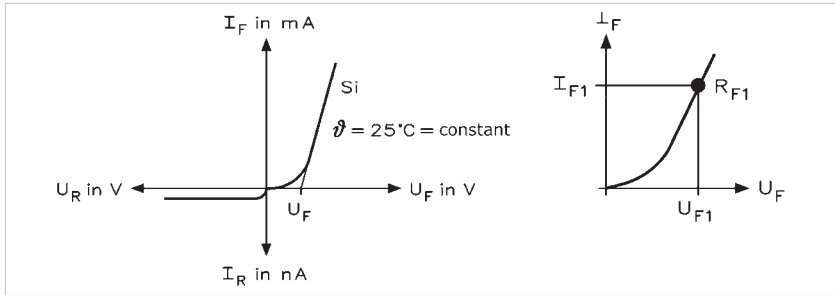
$$I_{F(\max)} = \frac{0,9 \cdot 5 \text{ W}}{0,7 \text{ V}} = 6,4 \text{ A}$$

3.1.3 Statische diodeweerstand (gelijkstroomweerstand)

$$R_F = \frac{U_F}{I_F}; \quad R_R = \frac{U_R}{I_R}$$

R_F doorlaatweerstand in Ω
 R_R sperweerstand in Ω

* Bij dioden staat de index 'F' voor *forward* (doorlaatrichting) en de index 'R' voor *reverse* (sperrichting).



Figuur 3.3

Voorbeeld: $U_F = 0,7 \text{ V}$; $I_F = 3 \text{ A}$; $R_F = ?$

$$R_F = \frac{0,7 \text{ V}}{3 \text{ A}} = 0,23 \Omega$$

3.1.4 Dynamische diodeweerstand (wisselstroomweerstand)

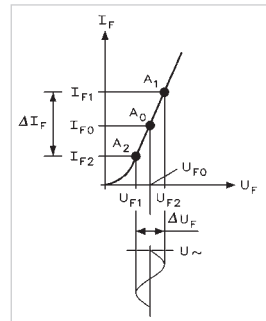
$$r_F = \frac{U_{F2} - U_{F1}}{I_{F2} - I_{F1}} = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$$

$$r_R = \frac{U_{R2} - U_{R1}}{I_{R2} - I_{R1}} = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R}$$

r_F differentiële (dynamische)

doorlaatweerstand

r_R differentiële sperweerstand



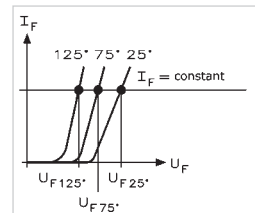
Figuur 3.4

3.1.5 Temperatuurgedrag van dioden

$$\alpha = \frac{\Delta U_F}{\Delta T} < 0$$

$$\alpha \approx -\frac{2 \text{ mV}}{\text{K}} \text{ (bij kamertemperatuur)}$$

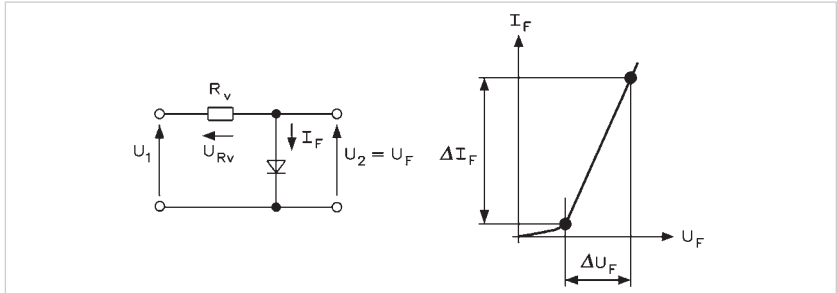
α temperatuurcoëfficiënt (negatief)



Figuur 3.5

3.2 Berekening van diodeschakelingen

3.2.1 Spanningsbegrenzing



Figuur 3.6

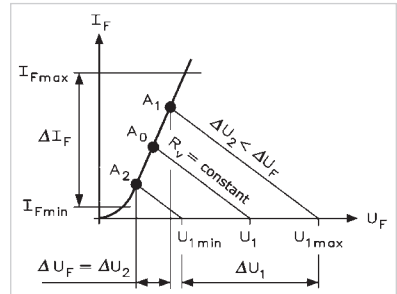
$$U_{Rv} = U_1 - U_F$$

$$R_v = \frac{U_{Rv}}{I_{Rv}} = \frac{U_1 - U_F}{I_F}$$

U_{Rv} spanningsval over R_v
 I_{Rv} stroom door R_v

Voorbeeld: $U_1 = 5 \text{ V}$; $U_F = 0,7 \text{ V}$;
 $I_F = 0,3 \text{ A}$; $R_v = ?$

$$R_v = \frac{5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{0,3 \text{ A}} = 14,3 \Omega$$



Figuur 3.7

$$R_{v\max} \leq \frac{U_{1\min} - U_F}{I_{F\min}}; \quad R_{v\min} \geq \frac{U_{1\max} - U_F}{I_{F\max}}$$

3.2.2 Diode als schakelaar

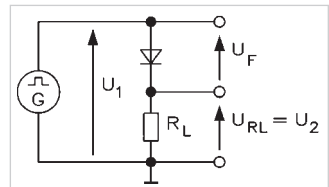
$$U_{RL} = I_F \cdot R_L$$

Diode spert $\equiv$ schakelaar geopend:

$$U_{RL} = U_1 - U_F \approx 0$$

Diode geleidt $\equiv$ schakelaar gesloten:

$$U_{RL} = U_1 - U_F \approx U_1$$



Figuur 3.8

3.3 Gelijkrichtschakelingen

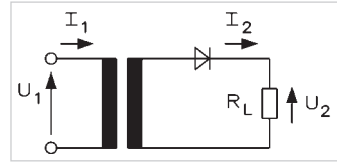
3.3.1 Eenfasige enkelzijdige gelijkrichter

$$\frac{U_{\text{uit,gem}}}{U_{\text{uit,0}}} = 0,45;$$

$$\frac{U_{\text{uit,eff}}}{U_{\text{uit,0}}} = 0,707$$

$$\frac{I_{\text{uit,eff}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 1,571; \quad \frac{U_{\text{diode,sper}}}{U_{\text{uit,gem}}} = 3,142$$

$$\frac{I_{\text{diode}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 1,0; \quad \frac{S_T}{U_{\text{uit,gem}} \cdot I_{\text{uit,gem}}} = 3,09$$



Figuur 3.9

$U_{\text{uit,0}}$	onbelaste uitgangsspanning
$U_{\text{uit,gem}}$	gemiddelde waarde uitgangs-gelijkspanning
$U_{\text{uit,eff}}$	effectieve waarde uitgangs-gelijkspanning
$U_{\text{diode,sper}}$	topwaarde diode-sperspanning
$I_{\text{uit,eff}}$	effectieve waarde trafo-uitgangsstroom
$I_{\text{uit,gem}}$	gemiddelde waarde uitgangsstroom
I_{diode}	stroom door een diode
S_T	nominaal transformatorvermogen

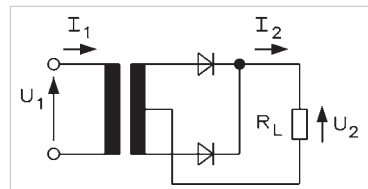
3.3.2 Tweefasige enkelzijdige gelijkrichter

$$\frac{U_{\text{uit,gem}}}{U_{\text{uit,0}}} = 0,45$$

$$\frac{U_{\text{uit,eff}}}{U_{\text{uit,0}}} = 0,5$$

$$\frac{I_{\text{uit,eff}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 0,785; \quad \frac{U_{\text{diode,sper}}}{U_{\text{uit,gem}}} = 3,142$$

$$\frac{I_{\text{diode}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 0,5; \quad \frac{S_T}{U_{\text{uit,gem}} \cdot I_{\text{uit,gem}}} = 1,23$$



Figuur 3.10

3.3.3 Eenfasige dubbelzijdige gelijkrichter (bruggelijkrichter)

$$\frac{U_{\text{uit,gem}}}{U_{\text{uit,0}}} = 0,9$$

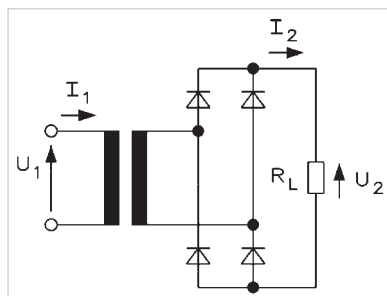
$$\frac{U_{\text{uit,eff}}}{U_{\text{uit,0}}} = 1$$

$$\frac{I_{\text{uit,eff}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 1,11$$

$$\frac{U_{\text{diode,sper}}}{U_{\text{uit,gem}}} = 1,571$$

$$\frac{I_{\text{diode}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 0,5$$

$$\frac{S_T}{U_{\text{uit,gem}} \cdot I_{\text{uit,gem}}} = 1,23$$



Figuur 3.11

3.3.4 Driefasige enkelzijdige gelijkrichter

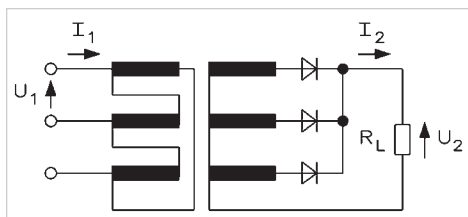
$$\frac{U_{\text{uit,gem}}}{U_{\text{uit,0}}} = 0,675$$

$$\frac{U_{\text{uit,eff}}}{U_{\text{uit,0}}} = 0,686$$

$$\frac{I_{\text{uit,eff}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 0,588$$

$$\frac{U_{\text{diode,sper}}}{U_{\text{uit,gem}}} = 2,094$$

$$\frac{I_{\text{diode}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 0,333; \quad \frac{S_T}{U_{\text{uit,gem}} \cdot I_{\text{uit,gem}}} = 1,23$$



Figuur 3.12

3.3.5 Driefasige dubbelzijdige gelijkrichter (bruggelijkrichter)

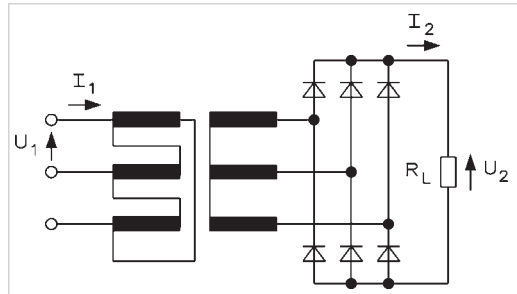
$$\frac{U_{\text{uit,gem}}}{U_{\text{uit},0}} = 1,35$$

$$\frac{U_{\text{uit,eff}}}{U_{\text{uit},0}} = 1,371$$

$$\frac{I_{\text{uit,eff}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 0,82$$

$$\frac{U_{\text{diode,sper}}}{U_{\text{uit,gem}}} = 1,047$$

$$\frac{I_{\text{diode}}}{I_{\text{uit,gem}}} = 0,333; \quad \frac{S_T}{U_{\text{uit,gem}} \cdot I_{\text{uit,gem}}} = 1,05$$



Figuur 3.13

3.3.6 Rekenkundig gemiddelde (gelijkstroom, ohmse belasting)

$$I_{\text{uit,gem}} = \frac{U_{\text{uit,gem}}}{R_L}; \quad I_{\text{uit,eff}} = \frac{U_{\text{uit,eff}}}{R_L}$$

$$P = U_{\text{uit,eff}} \cdot I_{\text{uit,eff}} = I_{\text{uit,eff}}^2 \cdot R_L = \frac{U_{\text{uit,eff}}^2}{R_L}$$

$I_{\text{uit,gem}}$	gemiddelde waarde uitgangs-gelijkstroom
$U_{\text{uit,gem}}$	gemiddelde waarde uitgangs-gelijkspanning
$U_{\text{uit,eff}}$	effectieve waarde uitgangs-gelijkspanning
$I_{\text{uit,eff}}$	effectieve waarde uitgangs-gelijkstroom

3.3.7 Stroombelastbaarheid

Maximale en continue gemiddelde doorlaatstroom:

$$I_{\text{FAVM}} \geq I_{\text{FAV}} = I_{\text{diode,gem}}$$

Maximale en continue effectieve doorlaatstroom:

$$I_{\text{FRMSM}} \geq I_{\text{FRMS}} = I_{\text{diode,eff}}$$

I_{FAVM}	maximum average forward current
I_{FAV}	average forward current
I_{FRMSM}	maximum RMS on-state current
I_{FRMS}	RMS on-state current

3.3.8 Sperspanning

$$U_{\text{RRM}} \geq k \cdot U_{\text{diode,sper}}$$

U_{RRM} peak repetitive reverse voltage

Voorbeeld: $U_{\text{L}} = 230 \text{ V}$; $T = 8,625$; $P_2 = 100 \text{ W}$; $k = 1,8$; $U_{\text{uit,gem}} = ?$; $R_{\text{L}} = ?$

$$U_{\text{uit},0} = \frac{U_{\text{L}}}{T} = \frac{230 \text{ V}}{8,625} = 26,67 \text{ V}$$

$$U_{\text{uit,gem}} = 0,9 \cdot U_{\text{uit},0} = 0,9 \cdot 26,67 \text{ V} = 24 \text{ V}$$

$$U_{\text{uit,eff}} = U_{\text{uit},0} \quad (\text{bruggelijkrichter})$$

$$R_{\text{L}} = \frac{U_{\text{uit,eff}}^2}{P_2} = \frac{(26,67)^2}{100 \text{ W}} = 7,1 \Omega$$

$$I_{\text{uit,gem}} = \frac{U_{\text{uit,gem}}}{R_{\text{L}}} = \frac{24 \text{ V}}{7,1 \Omega} = 3,38 \text{ A}$$

$$I_{\text{diode}} = 0,5 \cdot I_{\text{uit,gem}} = 0,5 \cdot 3,38 \text{ A} = 1,69 \text{ A}$$

$$I_{\text{FAVM}} \geq I_{\text{FAV}} = 1,69 \text{ A}$$

$$I_{\text{uit,eff}} = 1,1 \cdot I_{\text{uit,gem}} = 1,1 \cdot 3,38 = 3,72 \text{ A}$$

$$I_{\text{FRMSM}} \geq I_{\text{diode,eff}} = 3,72 \text{ A}$$

$$U_{\text{diode,sper}} = 1,571 \cdot U_{\text{uit,gem}} = 1,571 \cdot 24 \text{ V} = 37,7 \text{ V}$$

$$U_{\text{RRM}} \geq k \cdot U_{\text{diode,sper}} = 1,8 \cdot 37,7 \text{ V} = 67,9 \text{ V}$$

3.4 Afvlakking

3.4.1 Eenfasige enkelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator

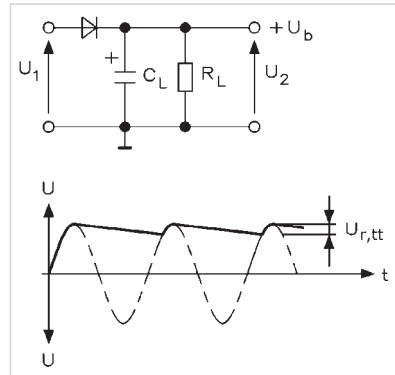
$$C_L = k \cdot \frac{I_L}{U_r}$$

$$C_L \approx \frac{I_L}{U_{r,tt} \cdot f}$$

C_L afvlakcondensator
 U_r rimpelspanning
 k constante
 (hier: $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ s}$)

Voorbeeld: $U_r = 1 \text{ V}$; $I_L = 100 \text{ mA}$;
 $C_L = ?$

$$C_L = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot \frac{100 \text{ mA}}{1 \text{ V}} = 480 \mu\text{F}$$



Figuur 3.14

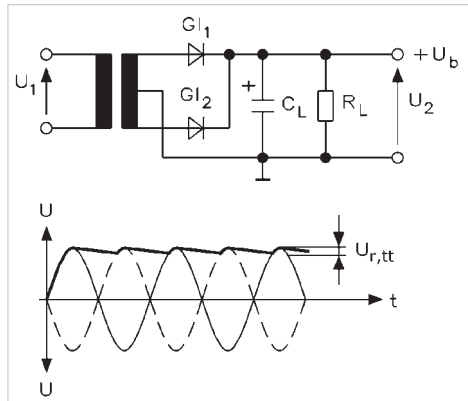
3.4.2 Tweefasige enkelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator

$$C_L = k \cdot \frac{I_L}{U_r}$$

$$C_L \approx \frac{I_L}{U_{r,tt} \cdot f}$$

C_L afvlakcondensator
 U_r rimpelspanning
 k constante
 (hier: $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ s}$)

Voorbeeld: $U_r = 1 \text{ V}$;
 $I_L = 100 \text{ mA}$;
 $C_L = ?$



Figuur 3.15

$$C_L = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot \frac{100 \text{ mA}}{1 \text{ V}} = 180 \mu\text{F}$$

3.4.3 Eenfasige dubbelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator

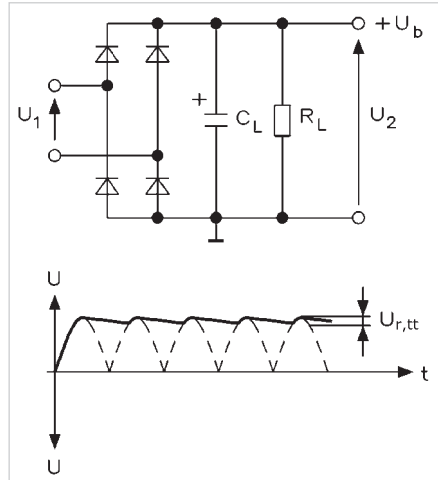
$$C_L = k \cdot \frac{I_L}{U_r}$$

$$C_L \approx \frac{I_L}{U_{r,tt} \cdot f}$$

C_L afvlakcondensator
 U_r rimpelspanning
 k constante
 (hier: $1,8 \cdot 10^{-3}$ s)

Voorbeeld: $U_{r,tt} = 1$ V;
 $I_L = 100$ mA;
 $C_L = ?$

$$C_L = \frac{100 \text{ mA}}{1 \text{ V}_{tt} \cdot 100 \text{ Hz}} = 1000 \mu\text{F}$$

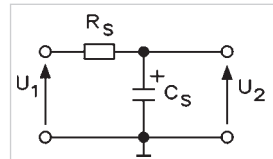


Figuur 3.16

3.4.4 RC-afvlakking

$$S = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{U_{r1}}{U_{r2}} \approx \omega_r \cdot R_S \cdot C_S$$

S filterfactor
 ω_r cirkelfrequentie rimpelspanning
 $\Delta U_1 = U_{r1}$ rimpelspanning aan de ingang
 $\Delta U_2 = U_{r2}$ rimpelspanning aan de uitgang



Figuur 3.17

Voorbeeld: $f = 50$ Hz (eenfasige enkelzijdige gelijkrichting);
 $S = 5$; $R_S = 10 \Omega$; $C_S = ?$

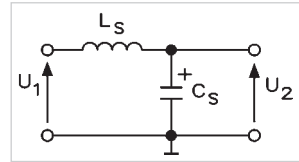
$$C_S = \frac{S}{\omega_r \cdot R_S} = \frac{5}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 10 \Omega} = 1592 \mu\text{F}$$

3.4.5 LC-afvlakking

$$S = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{U_{r1}}{U_{r2}} \approx \omega_r^2 \cdot L_S \cdot C_S$$

Voorbeeld: $f = 100 \text{ Hz}$ (bruggelijkrichter);
 $S = 5$; $C_S = 1000 \mu\text{F}$; $L_S = ?$

$$L_S = \frac{S}{\omega_r^2 \cdot C_S} = \frac{5}{(2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz})^2 \cdot 1000 \mu\text{F}} = 2,54 \text{ mH}$$



Figuur 3.18

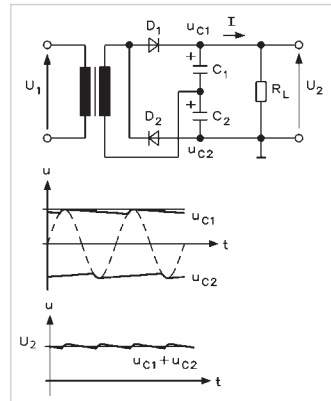
3.4.6 Spanningsverdubbeling (Delon-schakeling)*

$$\hat{u}_2 = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}}$$

U_{eff} effectieve secundaire
 trafospanning
 $\hat{u}_2$ uitgangsspanning
 (topwaarde)

Voorbeeld: $U_{\text{eff}} = 12 \text{ V}$; $\hat{u}_2 = ?$

$$\hat{u}_2 = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12 \text{ V} = 33,9 \text{ V}$$

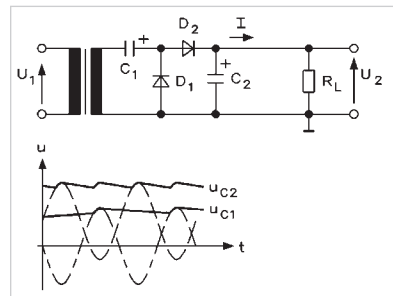


Figuur 3.19

3.4.7 Spanningsverdubbeling (Villard-schakeling)

$$\hat{u}_2 = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}}$$

U_{eff} effectieve secundaire
 trafospanning
 $\hat{u}_2$ uitgangsspanning
 (topwaarde)



Figuur 3.20

* De Delon-schakeling wordt ook wel Greinacher-schakeling genoemd.

3.4.8 Spanningsvermenigvuldiging (Villard-schakeling)

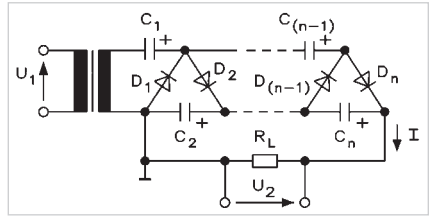
$$\hat{U}_2 = n \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}}$$

U_{eff} effectieve secundaire

trafospanning

$\hat{U}_2$ uitgangsspanning
(topwaarde)

n aantal trappen



Figuur 3.21

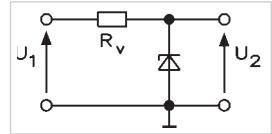
3.5 Spanningsstabilisatie met een zenerdiode

3.5.1 Onbelaste stabilisatieschakeling

In onbelaste toestand:

$$P_{\min} = 0,1 \cdot P_{\text{tot}}; \quad P_{\max} = 0,9 \cdot P_{\text{tot}}$$

$$R_V = \frac{U_1 - U_Z}{I_Z}$$



Figuur 3.22

P_{gem} gemiddeld verliesvermogen

P_{tot} totaal verliesvermogen

$P_{\min}$ minimaal verliesvermogen

$P_{\max}$ maximaal verliesvermogen

Voorbeeld: $P_{\text{tot}} = 2 \text{ W}$; $U_Z = 4,7 \text{ V}$; $U_1 = 9 \text{ V}$; $R_V = ?$

$$P_{\text{gem}} = 0,5 \cdot P_{\text{tot}} = 0,5 \cdot 2 \text{ W} = 1 \text{ W}$$

$$I_Z = \frac{P_{\text{gem}}}{U_Z} = \frac{1 \text{ W}}{4,7 \text{ V}} = 213 \text{ mA}; \quad R_V = \frac{9 \text{ V} - 4,7 \text{ V}}{213 \text{ mA}} = 20 \Omega$$

3.5.2 Belaste stabilisatieschakeling

In belaste toestand:

$$R_{V\min} = \frac{U_{\text{in,max}} - U_Z}{I_{Z\max} + I_{L\min}}; \quad R_{V\max} = \frac{U_{\text{in,min}} - U_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}}$$

$$R_V = \frac{U_{\text{in}} - U_Z}{I_Z + I_{L\max}}$$

U_{in}	ingangsspanning (niet gestabiliseerd)
U_Z	zenerspanning
I_Z	stroom door de zenerdiode
I_L	stroom door de belasting

Voorbeeld: $P_{tot} = 2 \text{ W}$; $U_Z = 4,7 \text{ V}$; $I_{Zmin} = ?$ $I_{Zmax} = ?$

$$P_{min} = 0,1 \cdot P_{tot} = 0,1 \cdot 2 \text{ W} = 0,2 \text{ W}$$

$$P_{max} = 0,9 \cdot P_{tot} = 0,9 \cdot 2 \text{ W} = 1,8 \text{ W}$$

$$I_{Zmin} = \frac{0,2 \text{ W}}{4,7 \text{ V}} = 42,6 \text{ mA}; \quad I_{Zmax} = \frac{1,8 \text{ W}}{4,7 \text{ V}} = 383 \text{ mA}$$

Belastbaarheid van de serieweerstand

$$P_{Rv} = I_{tot}^2 \cdot R_v$$

3.5.3 Differentialaalweerstand van een zenerdiode

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

r_Z differentiaalweerstand

3.5.4 Afvlakfactor

$$G = \frac{\Delta U_{uit}}{\Delta U_{in}} = \frac{R_v}{r_Z} + 1$$

G afvlakfactor

3.5.5 Stabilisatiefactor

$$S = G \cdot \frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{\Delta U_{uit}}{\Delta U_{in}} \cdot \frac{U_{uit}}{U_{in}} = \left(\frac{R_v}{r_Z} + 1 \right) \cdot \frac{U_{uit}}{U_{in}}$$

S stabilisatiefactor

3.6 Capaciteitsdiode

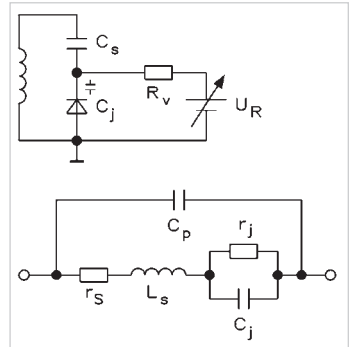
$$C_j = \frac{k}{(U_R + U_S)^n}$$

$$Q = \frac{1}{\omega \cdot C_j \cdot r_s + \frac{1}{\omega \cdot C_D \cdot r_j}}$$

$$\text{bij } f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_D \cdot \sqrt{r_j \cdot r_s}} \text{ geldt:}$$

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{r_j}{r_s}}$$

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_D \cdot r_s} \text{ bij } Q=1$$



Figuur 3.23

k	type-afhankelijke constante
n	type-afhankelijke exponent
C_D	diodecapaciteit
C_j	sperlaagcapaciteit
U_R	aangelegde sperspanning
U_S	diffusiespanning (voor silicium $\approx 0,7$ V)
C_p	parallelcapaciteit (capaciteit van de behuizing)
r_s	weerstand van de aansluitingen (0,5...5 Ω)
r_j	weerstand van de sperlaag (10^6 ... 10^{10} Ω)
L_s	zelfinductie van de aansluitingen (1...10 nH)

Voorbeeld: capaciteitsdiode van het type BB104:

$$C_D = 14 \dots 40 \text{ pF}; r_j = 10^6 \Omega; r_s = 3 \Omega; f_m = ?$$

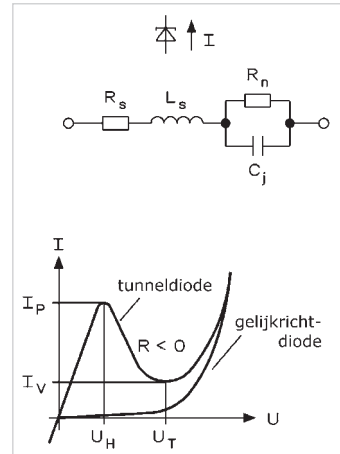
$$f_{m1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 14 \text{ pF} \cdot \sqrt{10^6 \Omega \cdot 3 \Omega}} = 6,6 \text{ MHz}$$

$$f_{m2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 40 \text{ pF} \cdot \sqrt{10^6 \Omega \cdot 3 \Omega}} = 2,3 \text{ MHz}$$

3.7 Tunneldiode

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_S \cdot C_j} - \frac{1}{(|-R_n| \cdot C_j)^2}}$$

C_j sperlaagcapaciteit
 $|-R_n|$ absolute waarde van de negatieve weerstand van de diode
 L_S zelfinductie van de aansluitingen (1...10 nH)
 f_m midden- of resonantiefrequentie



Figuur 3.24

4 Bipolaire transistoren

4.1 Karakteristieken en parameters

4.1.1 Spanning, stroom, versterking

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

$$\text{NPN: } -I_E = I_C + I_B$$

$$\text{PNP: } I_E = (-I_C) + (-I_B)$$

U_{CE} collector-emitterspanning

U_{BC} basis-collectorspanning

U_{BE} basis-emitterspanning

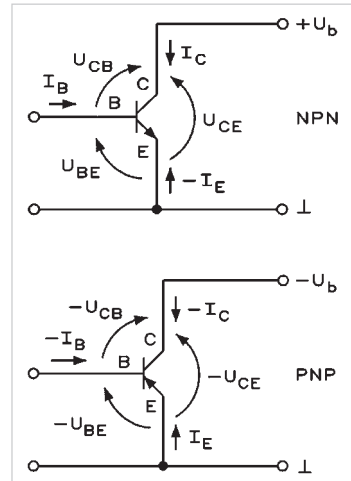
I_E emitterstroom

I_C collectorstroom

I_B basisstroom

Voorbeeld: $I_E = 200 \text{ mA}$; $I_C = 199 \text{ mA}$;
 $I_B = ?$

$$I_B = 200 \text{ mA} - 199 \text{ mA} = 1 \text{ mA}$$



Figuur 4.1

Statische (gelijkstroom)versterking

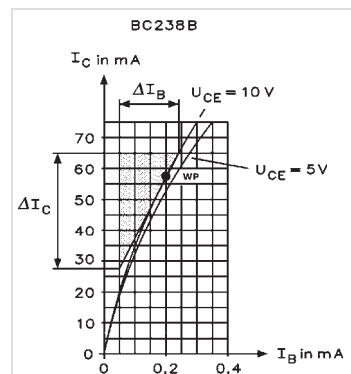
$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

Voorbeeld: $B = 250$; $I_B = 2 \text{ mA}$; $I_C = ?$

$$I_C = 250 \cdot 2 \text{ mA} = 500 \text{ mA}$$

Dynamische (wisselstroom)versterking

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$



Figuur 4.2

Voorbeeld: $\Delta I_B = 2 \text{ mA}$; $\beta = 150$; $\Delta I_C = ?$

$$\Delta I_C = 150 \cdot 2 \text{ mA} = 300 \text{ mA}$$

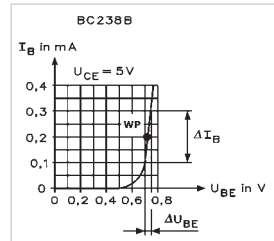
Statische (gelijkstroom)ingangsweerstand

$$R_{BE} = \frac{U_{BE}}{I_B}$$

Voorbeeld: $U_{BE} = 0,66 \text{ V}$; $I_B = 0,5 \text{ mA}$;

$$R_{BE} = ?$$

$$R_{BE} = \frac{0,66 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = 1,32 \text{ k}\Omega$$



Figuur 4.3

Dynamische (wisselstroom)ingangsweerstand

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

Voorbeeld: $\Delta U_{BE} = 0,1 \text{ V}$; $\Delta I_B = 0,1 \text{ mA}$; $R_{BE} = ?$

$$R_{BE} = \frac{0,1 \text{ V}}{0,1 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega$$

Statische (gelijkstroom)uitgangsweerstand

$$R_{CE} = \frac{U_{CE}}{I_C}$$

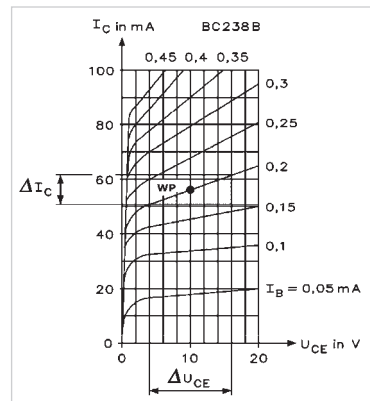
Voorbeeld: $U_{CE} = 4,5 \text{ V}$; $I_C = 8 \text{ mA}$;

$$R_{CE} = ?$$

$$R_{CE} = \frac{4,5 \text{ V}}{8 \text{ mA}} = 560 \Omega$$

Dynamische (wisselstroom)uitgangsweerstand

$$r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$$



Figuur 4.4

Voorbeeld: $\Delta U_{CE} = 1,5 \text{ V}$; $\Delta I_C = 2 \text{ mA}$; $r_{CE} = ?$

$$r_{CE} = \frac{1,5 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 750 \Omega$$

4.1.2 Vierpool-parameters

h-parameters voor de gemeenschappelijke-emitterschakeling

h_{11e} ingangsimpedantie bij kortgesloten uitgang

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad \text{bij } U_{CE} = \text{constant}$$

h_{12e} spanningsterugwerking bij open ingang

$$h_{12e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \quad \text{bij } I_B = \text{constant}$$

h_{21e} stroomversterking bij kortgesloten uitgang

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \text{bij } U_{CE} = \text{constant}$$

h_{22e} uitgangsadmittantie bij open ingang

$$h_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \quad \text{bij } I_B = \text{constant}$$

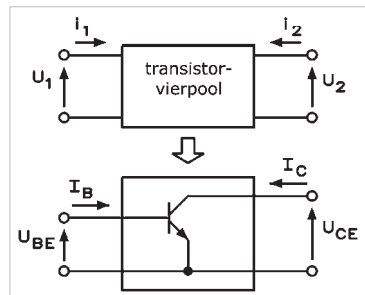
In de praktijk:

$$h_{11e} \approx r_{ie}; \quad h_{21e} \approx \beta$$

$$h_{11e} \approx r_{ie}; \quad h_{21e} \approx \beta$$

$$h_{22e} \approx \frac{1}{r_{ue}}$$

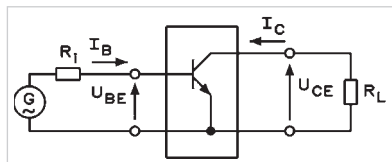
r_{ie} wisselstroom-
ingangsweerstand
 β wisselstroomversterking
 r_{ue} wisselstroom
uitgangswaerstand



Figuur 4.5

4.1.3 Bedrade vierpool (gemeenschappelijke-emitterschakeling)

ΔI_B	ingangs-wisselstroom
ΔI_C	uitgangs-wisselstroom
ΔU_{BE}	ingangs-wisselspanning
ΔU_{CE}	uitgangs-wisselspanning
R_i	inwendige weerstand
R_L	belastingsweerstand
Z_1	ingangsweerstand
Z_2	uitgangsweerstand



Figuur 4.6

Ingangsweerstand

$$Z_1 = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

$$h\text{-parameter: } Z_1 = \frac{h_{11e} + \det h_e \cdot R_L}{1 + h_{22e} \cdot R_L}$$

$$y\text{-parameter: } Z_1 = \frac{1 + y_{22e} \cdot R_L}{y_{11e} + \det y_e \cdot R_L}$$

Uitgangsweerstand

$$Z_2 = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$$

$$h\text{-parameter: } Z_2 = \frac{h_{11e} + R_i}{\det h_e + h_{22e} \cdot R_i}$$

$$y\text{-parameter: } Z_2 = \frac{1 + y_{11e} \cdot R_i}{y_{22e} + \det y_e \cdot R_i}$$

Stroomversterking

$$v_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

$$h\text{-parameter: } v_i = \frac{h_{21e}}{1 + h_{22e} \cdot R_L}$$

$$y\text{-parameter: } v_i = \frac{y_{21e}}{y_{11e} + \det y_e \cdot R_L}$$

Spanningsversterking

$$v_u = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}}$$

$$h\text{-parameter: } v_u = \frac{-h_{21e} \cdot R_L}{h_{11e} + \det h_e \cdot R_L}$$

$$y\text{-parameter: } v_u = \frac{-y_{21e} \cdot R_L}{1 + y_{22e} \cdot R_L}$$

Vermogensversterking

$$v_p = v_u \cdot v_i$$

$$h\text{-parameter: } v_p = \frac{(h_{21e})^2 \cdot R_L}{(1 + h_{22e} \cdot R_L) \cdot (h_{11e} + \det h_e \cdot R_L)}$$

$$y\text{-parameter: } v_p = \frac{(y_{21e})^2 \cdot R_L}{(1 + y_{22e} \cdot R_L) \cdot (y_{11e} + \det y_e \cdot R_L)}$$

Ingangsaanpassing

$$Z_1 = R_i$$

$$h\text{-parameter: } Z_1 = R_i = \sqrt{\frac{h_{11e} \cdot \det h_e}{h_{22e}}}$$

$$y\text{-parameter: } Z_1 = R_i = \sqrt{\frac{y_{22e}}{y_{11e} \cdot \det y_e}}$$

Uitgangsaanpassing

$$Z_2 = R_L$$

$$h\text{-parameter: } Z_2 = R_L = \sqrt{\frac{h_{11e}}{h_{22e} \cdot \det h_e}}$$

$$y\text{-parameter: } Z_2 = R_L = \sqrt{\frac{y_{11e}}{y_{22e} \cdot \det y_e}}$$

Determinanten

$$\det h_e = h_{11e} \cdot h_{22e} - h_{12e} \cdot h_{21e}$$

$$\det y_e = y_{11e} \cdot y_{22e} - y_{12e} \cdot y_{21e}$$

4.1.4 y-parameters van de gemeenschappelijke-emitterschakeling

y_{11e} ingangsadmittantie bij kortgesloten uitgang

$$y_{11e} = \frac{\Delta I_B}{\Delta U_{BE}} \quad \text{bij } U_{CE} = \text{constant}$$

y_{12e} terugwerkingsadmittantie bij kortgesloten ingang

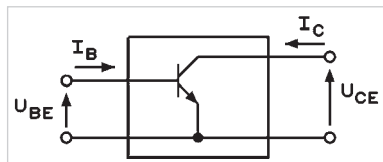
$$y_{12e} = \frac{\Delta I_B}{\Delta U_{CE}} \quad \text{bij } U_{BE} = \text{constant}$$

y_{21e} overdrachtsadmittantie bij kortgesloten uitgang

$$y_{21e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}} \quad \text{bij } U_{CE} = \text{constant}$$

y_{22e} uitgangsadmittantie bij kortgesloten ingang

$$y_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \quad \text{bij } U_{BE} = \text{constant}$$



Figuur 4.7

4.1.5 h- en y-parameters

Omrekening van de h-parameters uit de basisconfiguraties

index *b* ≡ gemeenschappelijke-basischakeling

index *e* ≡ gemeenschappelijke-emitterschakeling

index *c* ≡ gemeenschappelijke-collectorschakeling

Gemeenschappelijke-emitterschakeling

$$h_{11e} \approx \frac{h_{11b}}{1 + h_{21b}}; \quad h_{12e} \approx \frac{\det h_b - h_{12b}}{1 + h_{21b}}$$

$$h_{21e} \approx -\frac{h_{21b}}{1 + h_{21b}}; \quad h_{22e} \approx \frac{h_{22b}}{1 + h_{21b}}$$

$$\det h_e \approx \frac{\det h_b}{1 + h_{21b}}$$

Gemeenschappelijke-basischakeling

$$h_{11b} \approx \frac{h_{11e}}{1+h_{21e}}; \quad h_{12b} \approx \frac{\det h_e - h_{12e}}{1+h_{21e}}$$

$$h_{21b} \approx -\frac{h_{21e}}{1+h_{21e}}; \quad h_{22b} \approx \frac{h_{22e}}{1+h_{21e}}; \quad \det h_b \approx \frac{\det h_e}{1+h_{21e}}$$

Gemeenschappelijke-collectorschakeling

$$h_{11c} \approx h_{11e}; \quad h_{11c} \approx \frac{h_{11b}}{1+h_{21b}}; \quad h_{12c} \approx 1$$

$$h_{21c} \approx -(1+h_{21e}); \quad h_{21c} \approx -\frac{1}{1+h_{21b}}$$

$$h_{22c} \approx h_{22e}; \quad h_{22c} \approx \frac{h_{22b}}{1+h_{21b}}$$

$$\det h_c \approx 1+h_{21e} \approx -h_{21c}; \quad \det h_c \approx \frac{1}{1+h_{21b}}$$

Voorbeeld: transistor van het type BC107:

$h_{11e} = 2,7 \text{ k}\Omega$; $h_{12e} = 1,5 \cdot 10^{-4}$; $h_{21e} = 220$; $h_{22e} = 18 \text{ }\mu\text{S}$;
h-parameters voor gemeenschappelijke-basis- en
gemeenschappelijke-collectorschakeling?

$$\det h_e = 2,7 \text{ k}\Omega \cdot 18 \text{ }\mu\text{S} - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 220 = 0,0816$$

Gemeenschappelijke-basischakeling:

$$h_{11b} \approx \frac{h_{11e}}{1+h_{21e}} = \frac{2,7 \text{ k}\Omega}{1+220} = 12 \text{ }\Omega$$

$$h_{12b} \approx \frac{\det h_e - h_{12e}}{1+h_{21e}} = \frac{0,0816 - 1,5 \cdot 10^{-4}}{1+220} = 3,7 \cdot 10^{-4}$$

$$h_{21b} \approx -\frac{h_{21e}}{1+h_{21e}} = -\frac{220}{1+220} = -0,995$$

$$h_{22b} \approx \frac{h_{22e}}{1+h_{21e}} = \frac{18 \cdot 10^{-6} \text{ S}}{1+220} = 8,14 \cdot 10^{-8} \text{ S}$$

Gemeenschappelijke-collectorschakeling

$$h_{11c} \approx h_{11e} = 2,7 \text{ k}\Omega$$

$$h_{12c} \approx 1$$

$$h_{21c} \approx -(1 + h_{21e}) = -(1 + 220) = -221$$

$$h_{22c} \approx h_{22e} = 18 \text{ }\mu\text{S}$$

*Omrekening van de y-parameters uit de basisconfiguraties**Gemeenschappelijke-emitterschakeling*

$$Y_{11e} = Y_{11b} + Y_{12b} + Y_{21b} + Y_{22b}$$

$$Y_{12e} = -(Y_{12b} + Y_{22b})$$

$$Y_{21e} = -(Y_{21b} + Y_{22b})$$

$$Y_{22e} = Y_{22b}$$

$$\det y_e = Y_{11b} \cdot Y_{22b} - Y_{12b} \cdot Y_{21b}$$

Gemeenschappelijke-basischakeling

$$Y_{11b} = Y_{11e} + Y_{12e} + Y_{21e} + Y_{22e}$$

$$Y_{12b} = -(Y_{12e} + Y_{22e})$$

$$Y_{21b} = -(Y_{21e} + Y_{22e})$$

$$Y_{22b} = Y_{22e}$$

$$\det y_b = Y_{11e} \cdot Y_{22e} - Y_{12e} \cdot Y_{21e}$$

Gemeenschappelijke-collectorschakeling

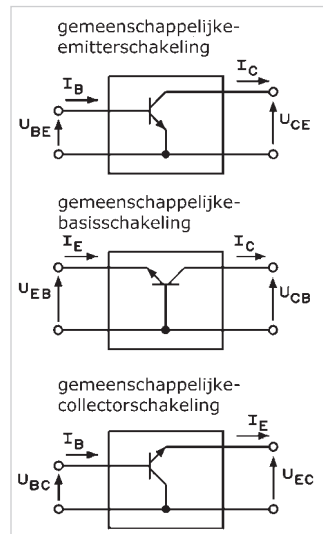
$$Y_{11c} = Y_{11e}$$

$$Y_{12c} = -(Y_{11e} + Y_{12e})$$

$$Y_{21c} = -(Y_{11e} + Y_{21e})$$

$$Y_{22c} = Y_{11e} + Y_{12e} + Y_{21e} + Y_{22e}$$

$$\det y_c = Y_{11e} \cdot Y_{22e} - Y_{12e} \cdot Y_{21e}$$



Figuur 4.8

4.1.6 Dissipatie (verliesvermogen)

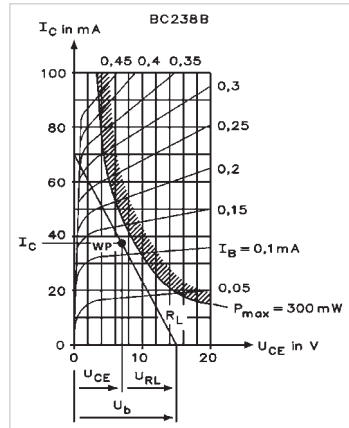
$$P_{\max} \approx P_{CE} = U_{CE} \cdot I_C$$

$$P_{\max} \approx 0,9 \cdot P_{\text{tot}}$$

$P_{\max}$ maximaal verliesvermogen

P_{tot} totaal verliesvermogen

0,9 veiligheidsfactor



Figuur 4.9

4.1.7 Instelling van het werkpunt

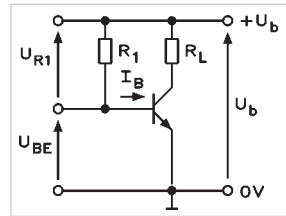
$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_B}$$

$$U_{R1} = U_b - U_{BE}$$

U_b voedingsspanning

U_{BE} basis-emitterspanning

I_B basisstroom



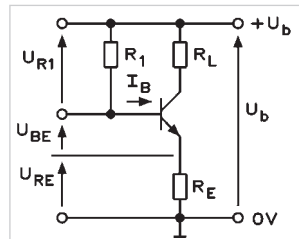
Figuur 4.10

Voorbeeld: $U_b = 9 \text{ V}$; $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $I_B = 100 \mu\text{A}$; $R_1 = ?$

$$U_{R1} = 9 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 8,3 \text{ V}; \quad R_1 = \frac{8,3 \text{ V}}{100 \mu\text{A}} = 83 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_B}$$

$$U_{R1} = U_b - U_{BE} - U_{RE}$$



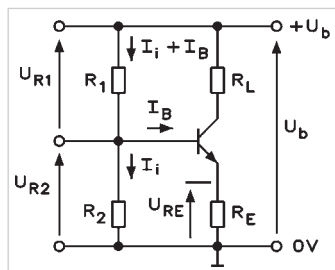
Figuur 4.11

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_i + I_B}$$

$$U_{R1} = U_b - U_{BE} - U_{RE}$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_i}; \quad U_{R2} = U_{BE} - U_{RE}$$

$$I_i = (2 \dots 10) \cdot I_B$$



Figuur 4.12

I_i instelstroom

Voorbeeld: $U_b = 9 \text{ V}$; $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $U_{RE} = 0,9 \text{ V}$; $U_{CE} = 4 \text{ V}$;
 $I_B = 100 \mu\text{A}$; $I_i = 5 \cdot I_B$; $I_C = 10 \text{ mA}$;
 $R_1 = ?$; $R_2 = ?$; $R_L = ?$; $R_E = ?$

$$U_{R1} = 9 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - 0,9 \text{ V} = 7,4 \text{ V}; \quad I_i = 5 \cdot 0,1 \text{ mA} = 0,5 \text{ mA}$$

$$R_1 = \frac{7,4 \text{ V}}{0,5 \text{ mA} + 0,1 \text{ mA}} = 12,3 \text{ k}\Omega; \quad R_2 = \frac{0,9 \text{ V} + 0,7 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = 3,2 \text{ k}\Omega$$

Berekening van R_L :

$$R_L = \frac{U_{RL}}{I_C}; \quad U_{RL} = U_b - U_{CE} - U_{RE}$$

$$U_{RL} = 9 \text{ V} - 4 \text{ V} - 0,9 \text{ V} = 4,1 \text{ V}; \quad R_L = \frac{4,1 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 410 \Omega$$

Berekening van R_E :

$$R_E \approx \frac{U_{BE}}{I_C}; \quad \text{in de praktijk: } R_E \approx 0,1 \cdot R_L$$

$$R_E = \frac{0,9 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 90 \Omega$$

4.1.8 Belastingslijn voor gelijk- en wisselstroom

Voor gelijkstroom geldt:

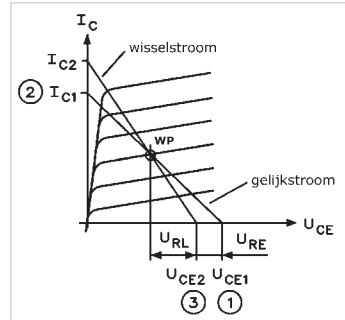
punt 1: $U_{CE1} = U_b$ ($I_C = 0$)

punt 2: $I_{C1} = \frac{U_b}{R_L + R_E}$ ($U_{CE} = 0$)

$$I_{C1} = \frac{U_b}{R_L} \quad (\text{zonder } R_E)$$

Voorbeeld: $U_b = 12 \text{ V}$; $U_{RE} = 1 \text{ V}$;
 $R_L = 1 \text{ k}\Omega$; $R_E = 200 \Omega$;
 $U_{CE1} = 12 \text{ V}$; $I_{C1} = ?$;
 $U_{CE2} = ?$; $I_{C2} = ?$

$$I_{C1} = \frac{12 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega + 200 \Omega} = 10 \text{ mA}$$



Figuur 4.13

Voor wisselstroom bij ohmse belasting geldt:

punt 3: $U_{CE2} = U_b - U_{RE}$

$$U_{CE2} = 12 \text{ V} - 1 \text{ V} = 11 \text{ V}$$

Verbinding met het werkpunt WP geeft de wisselstroom-belastingslijn

$$I_{C2} = \frac{U_{CE2}}{R_L} \quad \text{of} \quad I_{C2} = \frac{U_{RL}}{R_L}$$

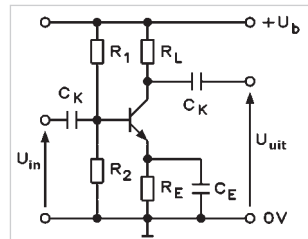
4.2 Kleinsignaalversterking

4.2.1 Gemeenschappelijke-emitterschakeling

$$v_i = \beta \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

$$v_u = v_i \cdot \frac{R_L}{r_{ie}}; \quad v_u = \frac{\beta}{r_{ie}} \cdot \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

$$v_p = v_u \cdot v_i$$



Figuur 4.14

$\beta = h_{21e}$	stroomversterking bij kortgesloten uitgang
$R_C = (h_{22e})^{-1}$	uitgangsweerstand bij open ingang
R_L	belastingsweerstand
$r_{ie} = h_{11e}$	ingangsweerstand bij kortgesloten uitgang
v_u	spanningsversterking
v_i	stroomversterking
v_p	vermogensversterking

Voorbeeld: $h_{11e} = 2,7 \text{ k}\Omega$; $h_{21e} = 220$; $h_{22e} = 40 \mu\text{S}$; $R_L = 5 \text{ k}\Omega$;
 $v_i = ?$; $v_u = ?$; $v_p = ?$

$$v_i = 220 \cdot \frac{(40 \mu\text{S})^{-1}}{(40 \mu\text{S})^{-1} + 5 \text{ k}\Omega} = 183; \quad v_u = 183 \cdot \frac{5 \text{ k}\Omega}{2,7 \text{ k}\Omega} = 340$$

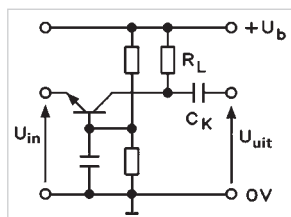
$$v_p = 340 \cdot 183 = 62220$$

4.2.2 Gemeenschappelijke-basischakeling

$$r_{ib} \approx \frac{r_{ie}}{\beta}; \quad v_{ib} \approx \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \approx 1$$

$$v_{ub} \approx \frac{R_L}{r_{ib}}$$

$$v_{pb} \approx \frac{R_L}{r_{ib}}$$



Figuur 4.15

r_{ib}	ingangsweerstand basischakeling
$r_{ie} = h_{11e}$	ingangsweerstand bij kortgesloten uitgang
α	stroomversterking
v_{ub}	spanningsversterking
v_{pb}	vermogensversterking

Voorbeeld: $h_{11e} = 2,7 \text{ k}\Omega$; $h_{21e} = 220$; $h_{22e} = 40 \text{ mS}$; $R_L = 5 \text{ k}\Omega$;
 $v_i = ?$; $v_u = ?$; $v_p = ?$

$$r_{ib} \approx \frac{r_{ie}}{\beta} = \frac{h_{11e}}{h_{21b}} = \frac{2,7 \text{ k}\Omega}{220} = 12,3 \Omega$$

$$v_{ub} \approx \frac{R_L}{r_{ib}} = \frac{5 \text{ k}\Omega}{12,3 \Omega} = 406,5$$

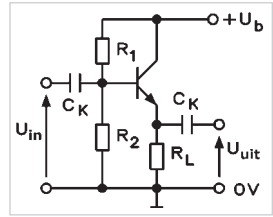
$$v_{ib} \approx 1; \quad v_{pb} \approx v_{ub}$$

4.2.3 Gemeenschappelijke-collectorschakeling

$$r_{ic} \approx \beta \cdot R_L; \quad \frac{1}{r_{in}} = \frac{1}{r_{ic}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$r_{uc} \approx \frac{R_i + r_{ie}}{\beta}; \quad \gamma = \beta + 1 \approx v_{ic}$$

$$v_{uc} \approx 1; \quad v_{pc} \approx \gamma$$



Figuur 4.16

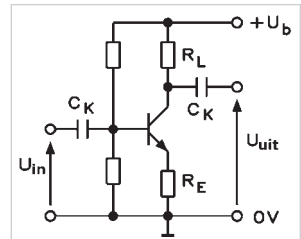
r_{ic}	ingangsweerstand gemeenschappelijke-collectorschakeling
r_{uc}	uitgangsweerstand
r_{in}	totale ingangsweerstand
γ	stroomversterkingsfactor
v_{ic}	stroomversterking
v_{uc}	spanningsversterking
v_{up}	vermogensversterking
R_i	inwendige weerstand van de signaalbron

4.2.4 Stroomtegenkoppeling

$$\alpha = \frac{U_{tk}}{U_{u\sim}} = \frac{U_{RE\sim}}{U_{u\sim}}$$

$$v'_u = \frac{v_u}{1 + \alpha \cdot v_u}; \quad k' = \frac{k}{1 + \alpha \cdot v_u}$$

$$\text{in de praktijk: } v_u \approx \frac{R_L}{R_E}$$



Figuur 4.17

α	fractie van de teruggekoppelde spanning
U_{tk}	teruggekoppelde spanning
$U_{u\sim}$	uitgangs-wisselspanning
$U_{RE\sim}$	emitter-wisselspanning
v_u	spanningsversterking
v'_u	spanningsversterking met tegenkoppeling
k	vervormingsfactor
k'	vervormingsfactor met tegenkoppeling

Voorbeeld: $U_{tk} = 0,2 \text{ V}$; $U_{u\sim} = 5 \text{ V}$; $v_u = 50$; $\alpha = ?$; $v'_u = ?$

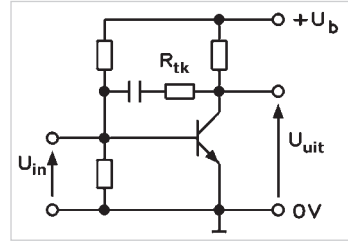
$$\alpha = \frac{U_{tk}}{U_{u\sim}} = \frac{0,2 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 0,04; \quad v'_u = \frac{v_u}{1 + \alpha \cdot v_u} = \frac{50}{1 + 0,04 \cdot 50} = 16,6$$

4.2.5 Spanningstegenkoppeling

$$\alpha = \frac{U_{tk}}{U_{u\sim}}$$

$$v'_u = \frac{v_u}{1 + \alpha \cdot v_u}$$

$$k' = \frac{k}{1 + \alpha \cdot v_u}$$



Figuur 4.18

- α fractie van de teruggekoppelde spanning
- U_{tk} teruggekoppelde spanning
- $U_{u\sim}$ uitgangs-wisselspanning
- v_u spanningsversterking
- v'_u spanningsversterking met tegenkoppeling
- k vervormingsfactor
- k' vervormingsfactor met tegenkoppeling
- R_{tk} tegenkoppelweerstand

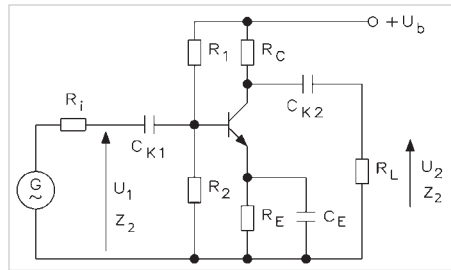
4.2.6 Koppelcondensatoren

$$f_o \approx \sqrt{n} \cdot f_g$$

$$X_{CK1} = R_i + Z_1$$

$$X_{CK2} = R_L + Z_2$$

$$X_{CE} \approx \frac{r_{BE} + R_L}{\beta}$$



Figuur 4.19

- f_o onderste kantelfrequentie van de versterkerschakeling
- n aantal hoogdoorlaatfilters
- f_g grensfrequentie van een afzonderlijke hoogdoorlaatsectie
- X_{CK1} capacitieve schijnweerstand van de ingangscondensator
- X_{CK2} capacitieve schijnweerstand van de uitgangscondensator
- X_{CE} capacitieve schijnweerstand van de emittercondensator

R_i	inwendige weerstand van de signaalbron
Z_1	wisselstroom-ingangsweerstand
Z_2	wisselstroom-uitgangsweerstand
r_{BE}	ingangsweerstand (gemeenschappelijke-emitterschakeling) ($\approx h_{11e}$)
β	stroomversterking bij kortgesloten uitgang

Voorbeeld: $Z_1 = 2,72 \text{ k}\Omega$; $R_i = 10 \text{ k}\Omega$; $f_o = 20 \text{ Hz}$; $f_g = ?$; $C_{K1} = ?$

In de schakeling komen 3 hoogdoorlaatsecties voor: C_{K1} , C_E en C_{K2} ; zodoende is $n = 3$

$$f_g = \frac{f_o}{\sqrt{n}} = \frac{20 \text{ Hz}}{\sqrt{3}} = 11,5 \text{ Hz}$$

$$C_{K1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 11,5 \text{ Hz} \cdot (10 \text{ k}\Omega + 2,72 \text{ k}\Omega)} = 1,1 \text{ }\mu\text{F}$$

4.3 De transistor als schakelaar

$$R_B \approx \frac{B_{\min} \cdot R_L}{o}$$

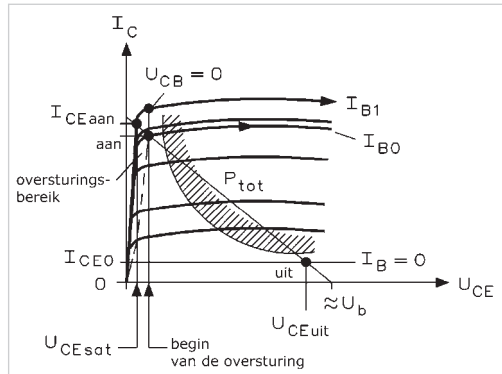
$$I_{CEaan} \approx \frac{U_b}{R_L}$$

$$o = \frac{I_{B1}}{I_{B0}} = \frac{B_{\min} \cdot I_{B1}}{I_{CEaan}}$$

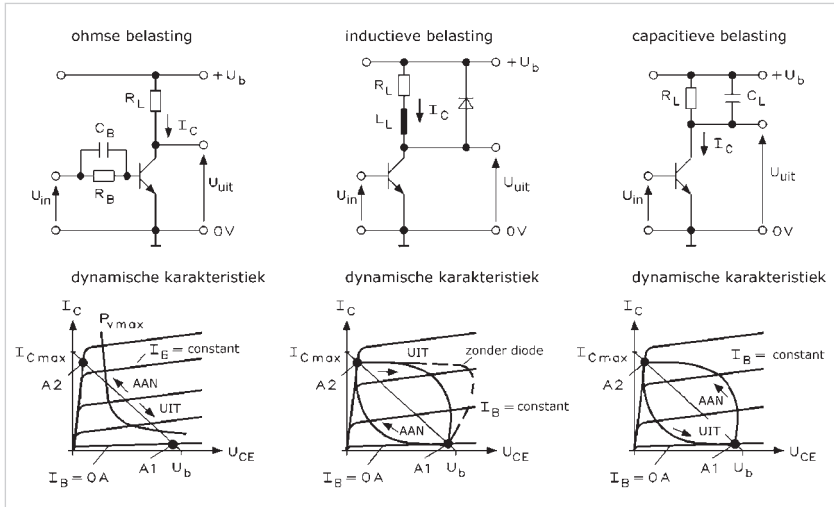
$$P_V = U_{CEsat} \cdot I_{CEaan}$$

$$P_S \approx U_b \cdot I_{CEaan}$$

R_B	basisweerstand
o	oversturingsfactor (2...10)
U_{CEsat}	verzadigingsspanning
$B_{\min}$	gelijkstroomversterking
P_S	schakelvermogen van de transistor
P_V	dissipatie in de transistor



Figuur 4.20



Figuur 4.21

Voorbeeld: $I_{CEaan} = 0,5 \text{ A}$; $I_{B1} = 50 \text{ mA}$; $U_{CEsat} = 300 \text{ mV}$; $B_{min} = 35$;
 $U_b = 24 \text{ V}$; $R_L = 27 \Omega$; $\phi = ?$; $P_v = ?$; $P_s = ?$

$$\phi = \frac{35 \cdot 50 \text{ mA}}{500 \text{ mA}} = 3,5; \quad R_B \approx \frac{35 \cdot 27 \Omega}{3,5} = 270 \Omega$$

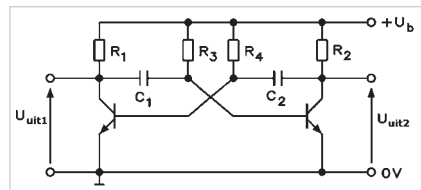
$$P_v = 300 \text{ mV} \cdot 0,5 \text{ A} = 150 \text{ mW}; \quad P_s \approx 24 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 12 \text{ W}$$

4.3.1 Astabiele multivibrator

$$t_1 \approx 0,7 \cdot R_4 \cdot C_2$$

$$t_2 \approx 0,7 \cdot R_3 \cdot C_1$$

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2}$$



Figuur 4.22

Voorbeeld: $R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$; $C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$; $f = ?$

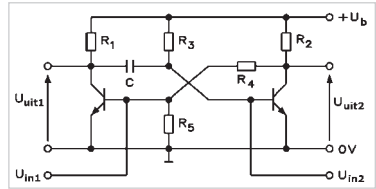
$$t_1 = t_2 \approx 0,7 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF} = 0,7 \text{ ms}; \quad f = \frac{1}{0,7 \text{ ms} + 0,7 \text{ ms}} = 714 \text{ Hz}$$

4.3.2 Monostabiele multivibrator

$$t_m \approx 0,7 \cdot R_3 \cdot C$$

Voorbeeld: $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$;
 $C = 10 \mu\text{F}$; $t_m = ?$

$$t_m \approx 0,7 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 10 \mu\text{F} = 70 \text{ ms}$$



Figuur 4.23

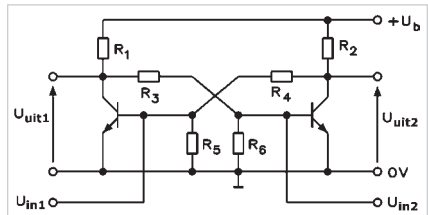
4.3.3 Bistabiele multivibrator (flipflop)

$$R_1 \geq R_2 = \frac{U_b}{I_{C\max}}$$

$$R_3 \leq 0,2 \dots 0,8 \cdot \beta \cdot R_2$$

$$R_4 \leq 0,2 \dots 0,8 \cdot \beta \cdot R_1$$

$$R_5 = R_6$$



Figuur 4.24

4.3.4 Schmitt-trigger (drempelwaardeschakelaar)

$$U_{aan} = \frac{R_5}{R_5 + R_2} \cdot U_b + 0,7 \text{ V}$$

$$U_{uit} = \frac{R_5}{R_5 + R_1} \cdot U_b + 0,7 \text{ V}$$

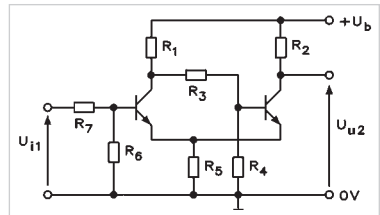
$$\Delta U = U_{aan} - U_{uit}$$

Voorbeeld: $U_b = 12 \text{ V}$; $R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 39 \Omega$; $R_1 = 470 \Omega$;
 $R_2 = 180 \Omega$; $R_5 = 39 \Omega$; $\Delta U = ?$

$$U_{aan} = \frac{39 \Omega}{39 \Omega + 180 \Omega} \cdot 12 \text{ V} + 0,7 \text{ V} = 2,84 \text{ V}$$

$$U_{uit} = \frac{39 \Omega}{39 \Omega + 470 \Omega} \cdot 12 \text{ V} + 0,7 \text{ V} = 1,62 \text{ V}$$

$$\Delta U = 2,84 \text{ V} - 1,62 \text{ V} = 1,22 \text{ V}$$



Figuur 4.25

4.4 Sinusgeneratoren (oscillatoren)

4.4.1 RC-hoogdoorlaat-fasedraaier

Bij vier RC-secties:

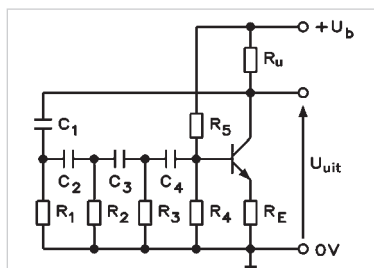
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

met $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$
 en $C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4$

Bij drie RC-secties:

$$f = \frac{1}{15,4 \cdot R \cdot C}$$

met $R = R_1 = R_2 = R_3$ en $C = C_1 = C_2 = C_3$



Figuur 4.26

4.4.2 RC-laagdoorlaat-fasedraaier

Bij vier RC-secties:

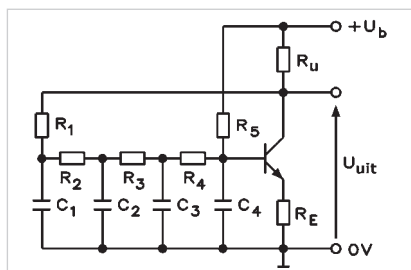
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

met $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$
 en $C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4$

Bij drie RC-secties:

$$f = \frac{1}{2,5 \cdot R \cdot C}$$

met $R = R_1 = R_2 = R_3$ en $C = C_1 = C_2 = C_3$

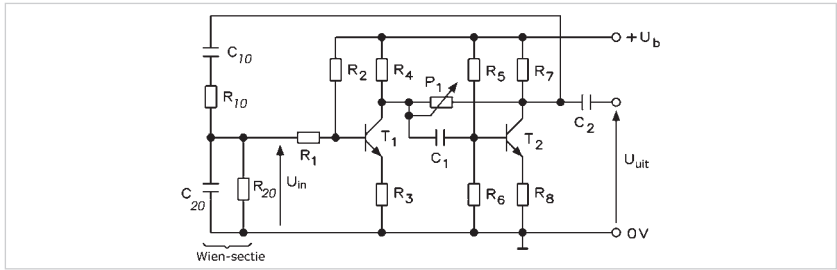


Figuur 4.27

4.4.3 RC-Wienbrug-oscillator

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

met $R = R_{10} = R_{20}$
 en $C = C_{10} = C_{20}$



Figuur 4.28

Voorbeeld: $R_{10} = R_{20} = 10 \text{ k}\Omega$; $C_{10} = C_{20} = 100 \text{ nF}$; $f = ?$

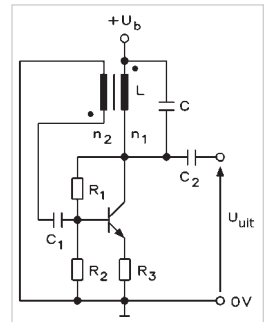
$$f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF}} = 159 \text{ Hz}$$

4.4.4 LC-oscillator (Meißner-oscillator)

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}$$

Voorbeeld: $C = 10 \text{ nF}$; $L = 10 \text{ mH}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{10 \text{ nF} \cdot 10 \text{ mH}}} = 15,9 \text{ kHz}$$



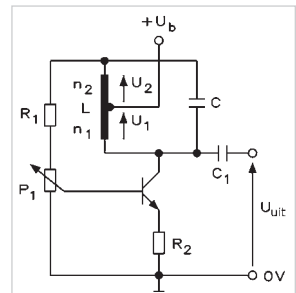
Figuur 4.29

4.4.5 LC-oscillator (Hartley-oscillator)

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}$$

Voorbeeld: $C = 10 \text{ nF}$; $L = 100 \text{ }\mu\text{H}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{10 \text{ nF} \cdot 100 \text{ }\mu\text{H}}} = 159 \text{ kHz}$$



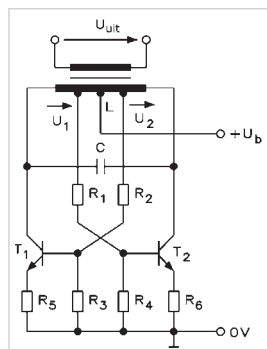
Figuur 4.30

4.4.6 LC-oscillator (tegenfase-Hartley-oscillator)

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}$$

Voorbeeld: $C = 1 \text{ nF}$; $L = 0,5 \text{ mH}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{1 \text{ nF} \cdot 0,5 \text{ mH}}} = 225 \text{ kHz}$$



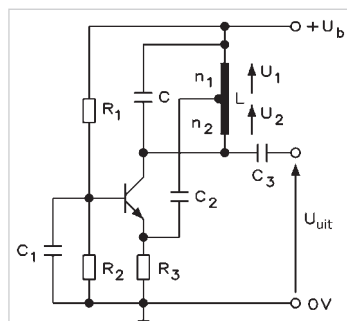
Figuur 4.31

4.4.7 LC-oscillator (Colpitts-oscillator I)

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}$$

Voorbeeld: $C = 0,5 \text{ nF}$; $L = 2 \text{ mH}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{0,5 \text{ nF} \cdot 2 \text{ mH}}} = 159 \text{ kHz}$$



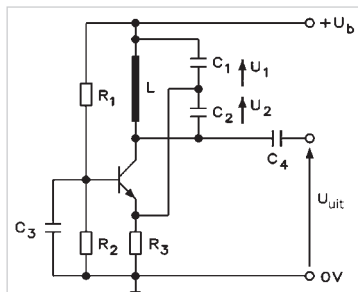
Figuur 4.32

4.4.8 LC-oscillator (Colpitts-oscillator II)

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}$$

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Voorbeeld: $C_1 = C_2 = 0,5 \text{ nF}$;
 $L = 1,5 \text{ mH}$; $f = ?$



Figuur 4.33

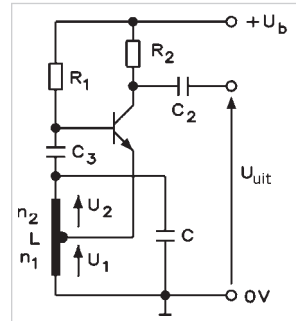
$$C = \frac{0,5 \text{ nF} \cdot 0,5 \text{ nF}}{0,5 \text{ nF} + 0,5 \text{ nF}} = 250 \text{ pF}; \quad f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{250 \text{ pF} \cdot 1,5 \text{ mH}}} = 260 \text{ kHz}$$

4.4.9 LC-oscillator (ECO-oscillator*)

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}$$

Voorbeeld: $C = 0,5 \text{ nF}$; $L = 2 \text{ mH}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{0,5 \text{ nF} \cdot 2 \text{ mH}}} = 159 \text{ kHz}$$



Figuur 4.34

4.4.10 Kristaloscillator voor lage frequenties

Serieresonantiefrequentie:

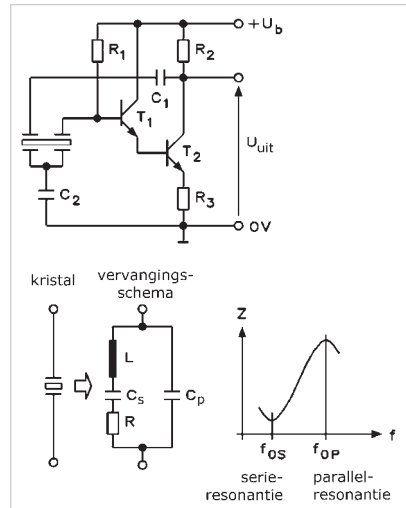
$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C_s \cdot L}}$$

Parallelresonantiefrequentie:

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{C_p + C_s}{C_p \cdot C_s \cdot L}}}$$

Frequentieverschil:

$$\Delta f = \frac{f_s \cdot C_s}{2 \cdot (C_p + C_s)} W$$



Figuur 4.35

* ECO = *Electron Coupled Oscillator*.

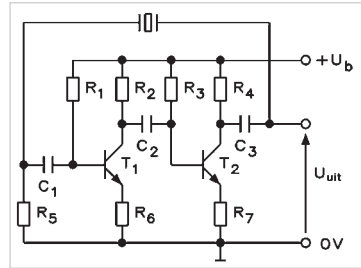
4.4.11 Kristaloscillator voor hoge frequenties

Dynamische capaciteit:

$$C_{\text{dyn}} = \frac{2 \cdot (C_p + C_s) \cdot \Delta f}{f_s}$$

Dynamische zelfinductie:

$$L_{\text{dyn}} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_s)^2 \cdot C_{\text{dyn}}}$$

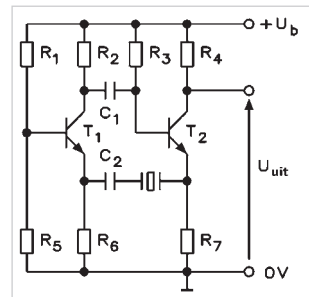


Figuur 4.36

4.4.12 Kristaloscillator voor zeer hoge frequenties

Effectieve serieweerstand:

$$R_{\text{eff}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L}{Q}$$

Capaciteitsverhouding: $C_r = \frac{C_p}{C_s}$ Kwaliteitsfactor: $Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L}{R_{\text{eff}}}$ Ohmse weerstand: $R = \left(\frac{C_s + C_p}{R_L} \right) \cdot R_s$ 

Figuur 4.37

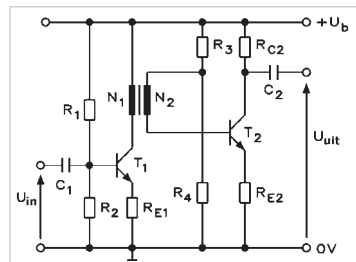
4.5 Terugkoppeling

4.5.1 Inductieve koppeling bij kleinsignaalversterkers

 $V_{\text{tot}} = V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \dots$

$$T = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

$$R_1 = \frac{(U_b - U_{BE} - U_E) \cdot B}{(n+1) \cdot I_C}$$



Figuur 4.38

$$R_2 = \frac{(U_b - U_E) \cdot B}{n \cdot I_C}; \quad R_E = R_{E1} = R_{E2} = \frac{U_E}{I_C + I_B}$$

T	transformatieverhouding
Z_1	wisselstroom-ingangsweerstand
Z_2	wisselstroom-uitgangsweerstand
R_1, R_2	spanningsdeler
B	stroomversterking
R_E	emitterweerstand
U_E	spanning over emitterweerstand

4.5.2 Capacitieve koppeling bij kleinsignaalversterkers

$$f'_g = f_g \cdot \sqrt{2^{(n-1)}}$$

$$C_K = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot R_{in}}$$

in de praktijk:

$$C_E = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot R_E}$$

met $C_E = C_{E1} = C_{E2}$

Voorbeeld: $f_o = 10 \text{ Hz}$; $R_E = 2,75 \text{ k}\Omega$; $C_K = ?$

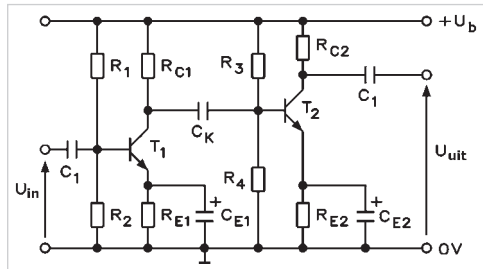
$$C_K = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \text{ Hz} \cdot 2,75 \text{ k}\Omega} = 5,8 \mu\text{F}$$

Voorbeeld: viertraps-versterker; $f_g = 10 \text{ Hz}$; $f'_g = ?$

$$f'_g = 10 \text{ Hz} \cdot \sqrt{2^{(4-1)}} = 28,28 \text{ Hz}$$

Voorbeeld: $f_o = 10 \text{ Hz}$; $R_E = 150 \Omega$; $C_K = ?$

$$C_K = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \text{ Hz} \cdot 150 \Omega} = 1062 \mu\text{F}$$



Figuur 4.39

4.5.3 Darlingtonschakeling

Gelijke transistoren

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2; \quad r_{BE} = r_{BE1} + \beta_1 \cdot r_{BE2}$$

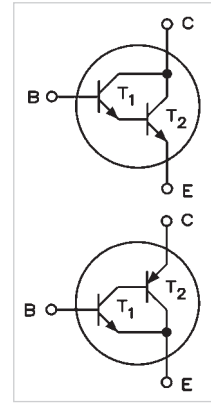
$$r_{CE} = r_{CE2} \parallel \frac{2 \cdot r_{CE1}}{\beta_2}$$

r_{BE} dynamische basis-emitterweerstand
 β dynamische stroomversterking

Voorbeeld: $\beta_1 = 200$; $\beta_2 = 150$; $r_{BE1} = 2,7 \text{ k}\Omega$;
 $r_{BE2} = 2,2 \text{ k}\Omega$; $\beta = ?$; $r_{BE} = ?$

$$\beta = 200 \cdot 150 = 30000$$

$$r_{BE} = 2,7 \text{ k}\Omega + 200 \cdot 2,2 \text{ k}\Omega = 442,7 \text{ k}\Omega$$



Figuur 4.40

Complementaire transistoren

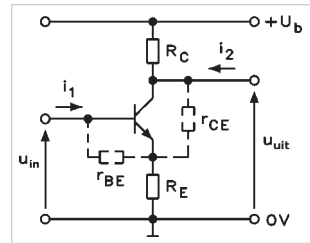
$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2; \quad r_{BE} = r_{BE1}; \quad r_{CE} = r_{CE2} \parallel \frac{r_{CE1}}{\beta_2}$$

4.5.4 Gemeenschappelijke-emitterschakeling met stroomtegenkoppeling

$$v_u = \frac{u_{uit}}{u_{in}} \approx \frac{R_C}{R_E}$$

$$r_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = r_{BE} + \beta \cdot R_E \approx \beta \cdot R_E$$

$$r_{uit} = \frac{u_{uit}}{i_{uit}} = R_C \parallel r_{CE} \cdot \left(1 + \frac{R_E}{r_{BE}}\right) \approx R_C$$



Figuur 4.41

Voorbeeld: $\beta = 200$; $R_E = 220 \text{ }\Omega$; $R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$; $v_u = ?$; $r_{in} = ?$; $r_{uit} = ?$

$$v_u \approx \frac{2,2 \text{ k}\Omega}{220 \text{ }\Omega} = 10; \quad r_{in} \approx 200 \cdot 220 \text{ }\Omega = 44 \text{ k}\Omega$$

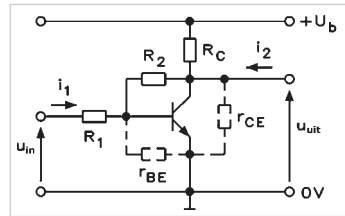
$$r_{uit} \approx R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$$

4.5.5 Gemeenschappelijke-emitterschakeling met spanningstegenkoppeling

$$v_u = \frac{u_{uit}}{u_{in}} \approx \frac{R_2}{R_1}$$

$$r_{in} = R_1 + \left(r_{BE} \parallel R_2 \cdot \frac{R_2}{v_u} \right) \approx R_1$$

$$r_{uit} = R_C \parallel r_{CE}$$



Figuur 4.42

Voorbeeld: $\beta = 200$; $R_1 = 22 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$; $R_C = 1 \text{ k}\Omega$; $r_{CE} = 4,2 \text{ k}\Omega$;
 $v_u = ?$; $r_{in} = ?$; $r_{uit} = ?$

$$v_u \approx \frac{120 \text{ k}\Omega}{22 \text{ k}\Omega} = 5,45; \quad r_{in} \approx R_1 = 22 \text{ k}\Omega; \quad r_{uit} = \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 4,2 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 4,2 \text{ k}\Omega} = 800 \Omega$$

4.5.6 Bootstrapschakeling

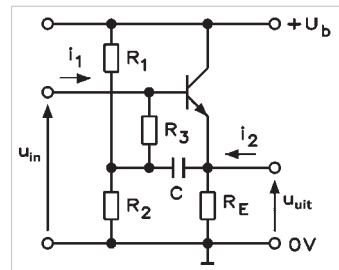
$$v_u \approx 1; \quad R_1 \parallel R_2 \geq 10 \cdot R_E$$

$$C \geq \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot (R_1 \parallel R_2)}$$

$$r_{in} = (r_{BE} + \beta \cdot R_E) \parallel R_3 \cdot \frac{\beta \cdot (R_E \parallel r_{CE})}{r_{BE}}$$

$$r_{uit} \approx R_E \parallel \frac{r_{BE} + R_3}{\beta}$$

$$I_B \cdot R_3 \ll U_{BE}$$



Figuur 4.43

- r_{in} dynamische ingangsweerstand
- r_{uit} dynamische uitgangsweerstand
- f_o onderste grensfrequentie
- R_E emitterweerstand
- r_{BE} dynamische basis-emitterweerstand
- r_{CE} dynamische collector-emitterweerstand

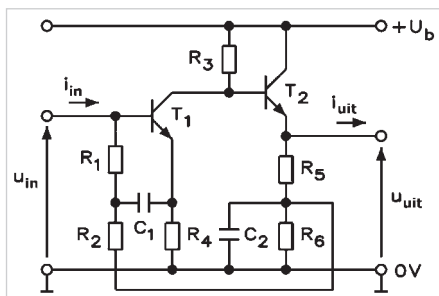
4.5.7 Tweekraps bootstrapschakeling

$$v_u = \frac{R_3}{R_4}$$

$$r_{uit} = R_5 \parallel \frac{r_{BE2} + R_3}{\beta_2}$$

$$r_{in} = (r_{BE1} + \beta_1 \cdot R_E) \parallel \left\| R_3 \cdot \frac{\beta_1 (R_{E1} \parallel r_{CE1})}{r_{BE1}} \right\|$$

r_{in} dynamische ingangsweerstand
 r_{uit} dynamische uitgangsweerstand
 r_{BE} dynamische basis-emitterweerstand
 r_{CE} dynamische collector-emitterweerstand



Figuur 4.44

4.6 Vermogensversterkers

4.6.1 Klasse-A versterker (emitterschakeling)

$$U_{CEmax} = U_b$$

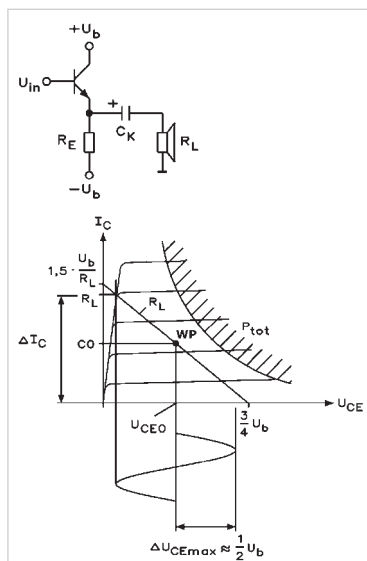
$$I_{Cmax} = \frac{U_b}{2 \cdot R_L}$$

$$P_{\sim} = \frac{U_b^2}{8 \cdot R_L}$$

$$P_{-} = \frac{U_b^2}{4 \cdot R_L}$$

$$\eta = \frac{P_{\sim}}{P_{-}}$$

$$C_K = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot R_L}$$



Figuur 4.45

Voorbeeld: $U_b = 24 \text{ V}$; $R_L = 4 \Omega$; $f_o = 20 \text{ Hz}$; $P_{\sim} = ?$; $P_- = ?$;
 $\eta = ?$; $C_K = ?$

$$P_{\sim} = \frac{(24 \text{ V})^2}{8 \cdot 4 \Omega} = 18 \text{ W}; \quad P_- = \frac{(24 \text{ V})^2}{4 \cdot 4 \Omega} = 36 \text{ W}$$

$$C_K = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \text{ Hz} \cdot 4 \Omega} = 2000 \mu\text{F}; \quad \eta = \frac{P_{\sim}}{P_-} = \frac{18 \text{ W}}{36 \text{ W}} = 0,5$$

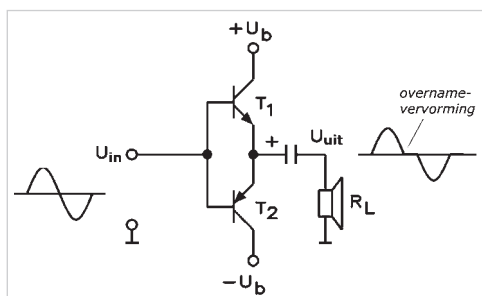
4.6.2 Klasse-B versterker (balansschakeling)

$$U_{CE\text{max}} = 0,75 \cdot U_b$$

$$I_{C\text{max}} = 1,5 \cdot \frac{U_b}{R_L}$$

$$P_{\sim} = \frac{U_b^2}{32 \cdot R_L}$$

$$P_- = \frac{U_b^2}{4 \cdot R_L}$$



Figuur 4.46

Voorbeeld: $U_b = 36 \text{ V}$; $R_L = 4 \Omega$; $f_o = 20 \text{ Hz}$; $P_{\sim} = ?$; $P_- = ?$

$$P_{\sim} = \frac{(36 \text{ V})^2}{32 \cdot 4 \Omega} = 10,1 \text{ W}; \quad P_- = \frac{(36 \text{ V})^2}{4 \cdot 4 \Omega} = 81 \text{ W}$$

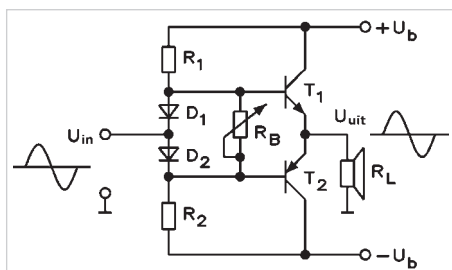
4.6.3 Klasse-AB versterker (symmetrische voedingsspanning)

$$U_{CE\text{max}} = 2 \cdot U_b$$

$$I_{C\text{max}} = \frac{U_b}{2 \cdot R_L}$$

$$P_{\sim} = \frac{U_b^2}{8 \cdot R_L}$$

$$P_- = \frac{U_b^2}{4 \cdot R_L}$$



Figuur 4.47

Voorbeeld: $U_b = 24 \text{ V}$; $R_L = 4 \Omega$; $f_o = 20 \text{ Hz}$; $P_{\sim} = ?$; $P_- = ?$

$$P_{\sim} = \frac{(24 \text{ V})^2}{8 \cdot 4 \Omega} = 18 \text{ W}; \quad P_- = \frac{(24 \text{ V})^2}{4 \cdot 4 \Omega} = 36 \text{ W}$$

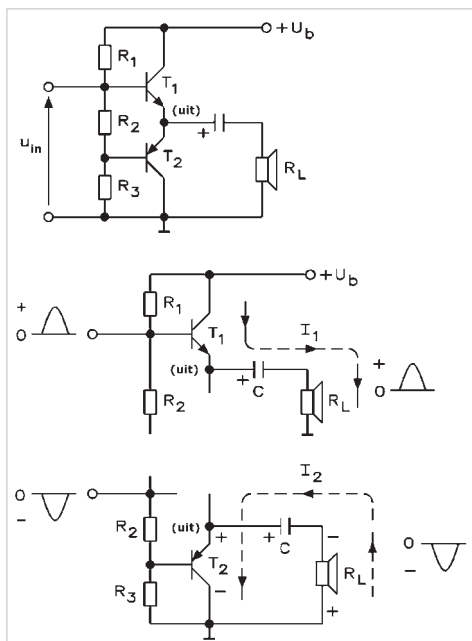
4.6.4 Klasse-AB versterker (enkelzijdige voedingsspanning)

$$U_{CE\max} = 2 \cdot U_b$$

$$I_{C\max} = \frac{U_b}{2 \cdot R_L}$$

$$P_{\sim} = \frac{U_b^2}{8 \cdot R_L}$$

$$P_- = \frac{U_b^2}{4 \cdot R_L}$$



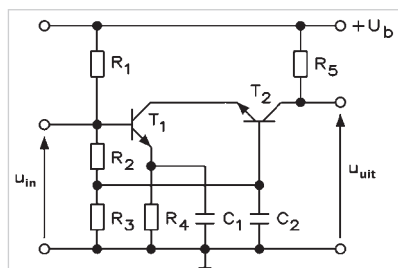
Figuur 4.48

4.6.5 Cascodeschakeling

$$v_u \approx \beta_1 \cdot \frac{R_5}{r_{BE1}}; \quad r_{uit} \approx R_5$$

$$r_{in} = r_{BE1} \parallel R_2 \parallel R_3$$

r_{in} ingangsweerstand
 r_{uit} uitgangsweerstand
 r_{BE} basis-emitterweerstand
 β wisselstroomversterking



Figuur 4.49

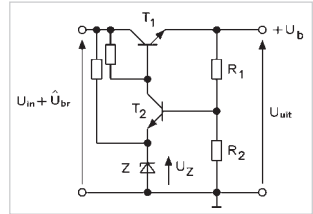
4.7 Spannings- en stroombronnen

4.7.1 Constante-spanningsbron

$$U_{\text{uit}} = (U_Z + U_{\text{BE}(T_2)}) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$U_{\text{in}} - \hat{U}_{\text{br}} \geq U_{\text{uit}} + U_{\text{CEsat}}(T_1)$$

U_{br} op de ingangsspanning
gesuperponeerde brom-
of rimpelspanning



Figuur 4.50

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 15 \text{ V}$; $R_1 = R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$; $U_Z = 4,7 \text{ V}$; $U_{\text{uit}} = ?$

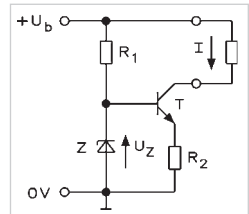
$$U_{\text{uit}} = (4,7 \text{ V} + 0,7 \text{ V}) \cdot \frac{4,7 \text{ k}\Omega + 4,7 \text{ k}\Omega}{4,7 \text{ k}\Omega} = 10,8 \text{ V}$$

4.7.2 Constante-stroombron

$$I = \frac{U_Z - U_{\text{BE}}}{R_2}$$

Voorbeeld: $R_2 = 220 \Omega$; $U_Z = 4,7 \text{ V}$; $I = ?$

$$I = \frac{4,7 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{220 \Omega} = 18 \text{ mA}$$



Figuur 4.51

4.7.3 Verschilversterker

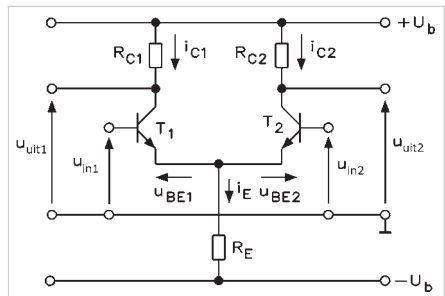
$$v_u = \frac{u_{\text{uit1}} - u_{\text{uit2}}}{u_{\text{in1}} - u_{\text{in2}}}$$

$$v_u = -\beta \cdot \frac{R_C \parallel r_{\text{CE}}}{r_{\text{BE}}}$$

$$u_{\text{uit1}} = (u_{\text{in1}} - i_E \cdot R_E) \cdot v_u$$

$$u_{\text{uit2}} = (u_{\text{in2}} - i_E \cdot R_E) \cdot v_u$$

v_u spanningsversterking



Figuur 4.52

4.7.4 Warmteweerstand

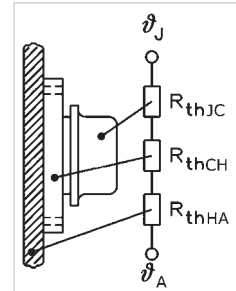
$$R_{th} = \frac{\Delta \vartheta}{P_v}$$

zonder koellichaam:

$$R_{thJA} = \frac{\vartheta_J - \vartheta_A}{P_{tot}}$$

met koellichaam:

$$R_{thJA} = R_{thJC} + R_{thCH} + R_{thHA}$$



Figuur 4.53

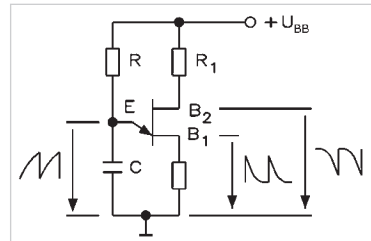
- R_{th} warmteweerstand (thermische weerstand)
- R_{thJA} warmteweerstand tussen junctie en omgeving*
- R_{thJC} warmteweerstand tussen junctie en behuizing
- R_{thCH} warmteweerstand tussen behuizing en koellichaam
- R_{thHA} warmteweerstand tussen koellichaam en omgeving
- $\Delta \vartheta$ temperatuurverschil
- ϑ_J junctietemperatuur
- ϑ_A omgevingstemperatuur
- P_{tot} totaal verliesvermogen (gedissipeerd vermogen)

4.7.5 Uni-junctie-transistor

$$U_{B1} = \eta \cdot U_{BB}; \quad \eta = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$U_P = U_D + \eta \cdot U_{BB}$$

$$T \approx R \cdot C \cdot \ln \frac{1}{1 - \eta}; \quad f = \frac{1}{T}$$



Figuur 4.54

- U_{B1}, U_{B2} spanningsval over basisweerstanden
- η intrinsieke weerstandsverhouding
- U_{BB} spanning tussen basis 1 en basis 2
- U_P peak-point emitterspanning
- U_D spanningsval over de emitterdiode

* J = junction, halfgeleiderkristal; C = case, behuizing; H = heatsink, koellichaam; A = ambient, omgeving.

Voorbeeld: $\eta = 0,7$; $U_{BB} = 10 \text{ V}$; $U_D = 0,7 \text{ V}$; $U_{B1} = ?$; $U_P = ?$

$$U_{B1} = 0,7 \cdot 10 \text{ V} = 7 \text{ V}; \quad U_P = 0,7 \text{ V} + 0,7 \cdot 10 \text{ V} = 7,7 \text{ V}$$

Voorbeeld: $\eta = 0,7$; $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 100 \text{ nF}$; $f = ?$

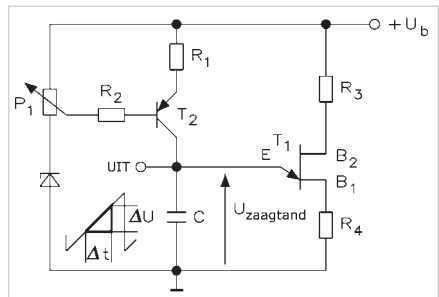
$$T \approx 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF} \cdot \ln \frac{1}{1-0,7} = 1,2 \text{ ms}; \quad f = \frac{1}{1,2 \text{ ms}} = 833 \text{ Hz}$$

4.7.6 Uni-junctie-transistor als zaagtandgenerator

$$I = \frac{U_Z - U_{BE}}{R_4}$$

$$U_{\text{zaagtand}} = \frac{I_C \cdot t}{C}$$

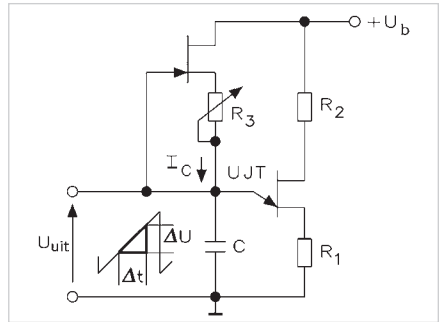
$$f \approx \frac{I_C}{U_P \cdot C}$$



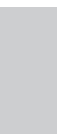
Figuur 4.55

$$U_{\text{zaagtand}} = \frac{I_C \cdot t}{C}$$

$$f \approx \frac{U_b}{(U_b \cdot \eta + 0,7 \text{ V}) \cdot R_1 \cdot C}$$



Figuur 4.56



5 FET's en MOSFET's

5.1 Veldeffect-transistoren (FET's)

Bij de veldeffect-transistor loopt de te reguleren stroom door een 'kanaal' van N- of P-gedoteerd halfgeleidermateriaal (silicium). Men onderscheidt N-kanaal-FET's en P-kanaal-FET's. Veldeffect-transistoren worden ook wel sperlaag-FET's genoemd.

5.1.1 Gemeenschappelijke-sourceschakeling

$$R_S = \frac{-U_{GS}}{I_D}; \quad R_L = \frac{U_b - U_{DS} + U_{GS}}{I_D}$$

$$v_S \approx S \cdot \frac{r_{DS} \cdot R_L}{r_{DS} + R_L}; \quad v_S \approx S \cdot R_L$$

$$v_S = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta U_{GS}}; \quad S = -\frac{2}{U_P} \cdot \sqrt{I_D \cdot I_{DS}}$$

$$R_{inS} \approx R_2; \quad R_{uitS} \approx R_L$$

$$y_{21} = S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad \text{bij } U_{DS} = \text{constant}$$

$$y_{22} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} \quad \text{bij } U_{GS} = \text{constant}$$

R_S sourceweerstand

R_L belastingsweerstand

R_{inS} ingangsweerstand (gemeenschappelijke-sourceschakeling)

R_{uitS} uitgangsweerstand (gemeenschappelijke-sourceschakeling)

R_2 gate-lekweerstand

I_D drainstroom

I_{DS} drainstroom bij $U_{GS} = 0 \text{ V}$

U_{DS} drain-source spanning

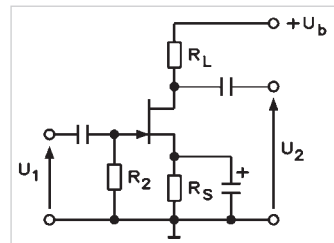
U_P afknijpspanning ($I_D \approx 0 \text{ A}$)

v_S spanningsversterking (gemeenschappelijke-sourceschakeling)

S steilheid in mA/V

y_{21} overdrachtsadmittantie bij kortgesloten uitgang

y_{22} uitgangsadmittantie bij kortgesloten ingang



Figuur 5.1

Voorbeeld: $U_{GS} = -2 \text{ V}$; $I_D = 5 \text{ mA}$; $U_b = 12 \text{ V}$; $U_{DS} = 5 \text{ V}$; $S = 10 \text{ mA/V}$;
 $R_S = ?$; $R_L = ?$; $v_S = ?$

$$R_S = \frac{-(-2 \text{ V})}{5 \text{ mA}} = 400 \Omega; \quad R_L = \frac{12 \text{ V} - 5 \text{ V} + (-2 \text{ V})}{5 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$v_S \approx 10 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 10 \text{ V}$$

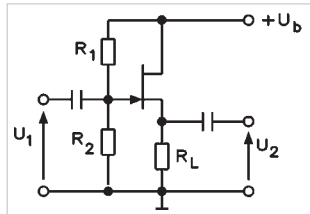
5.1.2 Gemeenschappelijke-drainschakeling

$$R_1 = \frac{U_b - U_{RL} - U_{GS}}{I_i}$$

$$R_2 = \frac{U_{RL} + U_{GS}}{I_i}; \quad v_D \approx \frac{S \cdot R_L}{1 + S \cdot R_L}$$

$$R_{inD} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_{uitD} = \frac{R_L}{1 + S \cdot R_L}$$

$$S = -\frac{2}{U_p} \cdot \sqrt{I_D \cdot I_{DS}}$$



Figuur 5.2

R_1, R_2	instelweerstand (spanningsdelers)
R_{inD}	ingangswestand (gemeenschappelijke-drainschakeling)
R_{uitD}	uitgangswestand (gemeenschappelijke-drainschakeling)
U_b	voedingsspanning
U_{RL}	spanning over belastingsweerstand
U_p	afknijpspanning ($I_D \approx 0 \text{ A}$)
I_i	instelstroom
I_{DS}	drainstroom bij $U_{GS} = 0 \text{ V}$
S	steilheid in mA/V

Voorbeeld: $U_{RL} = 7 \text{ V}$; $I_i = 10 \mu\text{A}$; $S = 10 \text{ mA/V}$; $R_L = 1 \text{ k}\Omega$; $U_b = 12 \text{ V}$;
 $v_D = ?$; $R_{uitD} = ?$

$$v_D \approx \frac{10 \text{ mA/V} \cdot 1 \text{ k}\Omega}{1 + 10 \text{ mA/V} \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 0,91;$$

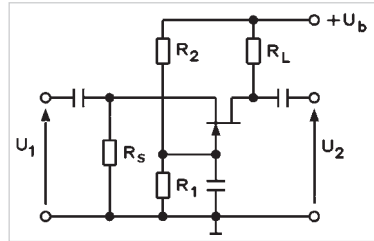
$$R_{uitD} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 + 10 \text{ mA/V} \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 91 \Omega$$

5.1.3 Gemeenschappelijke-gateschakeling

$$V_G \approx \frac{S \cdot R_L}{1 + S \cdot R_S}$$

$$R_{inG} \approx R_S + \frac{1}{S}; \quad R_{uitG} \approx R_L$$

$$S = -\frac{2}{U_P} \cdot \sqrt{I_D \cdot I_{DS}}$$



Figuur 5.3

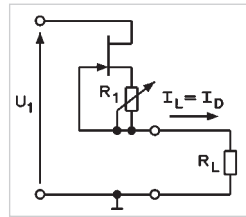
U_P afknijpspanning ($I_D \approx 0$ A)
 I_{DS} drainstroom bij $U_{GS} = 0$ V

5.1.4 Constante-stroombron

$$I_L = I_D; \quad I_D = \frac{|U_{GS}|}{R_1}$$

Voorbeeld: $U_{GS} = -2$ V; $R_1 = 220 \Omega$; $I_D = ?$

$$I_D = \frac{|-2 \text{ V}|}{220 \Omega} = 9,1 \text{ mA}$$



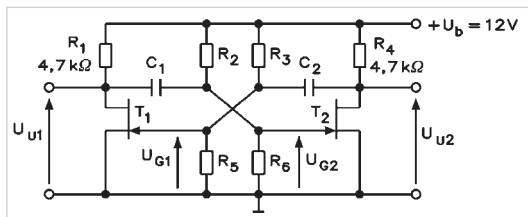
Figuur 5.4

5.1.5 Blokvolggenerator

$$t_{G1} = 0,7 \cdot R_3 \cdot C_2$$

$$t_{G2} = 0,7 \cdot R_2 \cdot C_1$$

$$f = \frac{1}{t_{G1} + t_{G2}}$$



Figuur 5.5

Voorbeeld: $R_2 = R_3 = 1 \text{ M}\Omega$; $C_1 = C_2 = 100 \mu\text{F}$; $f = ?$

$$t_{G1} = 0,7 \cdot 1 \text{ M}\Omega \cdot 100 \mu\text{F} = 70 \text{ s}; \quad t_{G2} = 0,7 \cdot 1 \text{ M}\Omega \cdot 100 \mu\text{F} = 70 \text{ s}$$

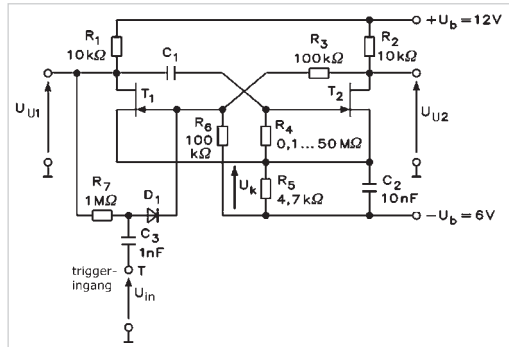
$$f = \frac{1}{70 \text{ s} + 70 \text{ s}} = 0,007 \text{ Hz}$$

5.1.6 Monostabiele multivibrator

$$t_m = 0,7 \cdot R_4 \cdot C_1$$

Voorbeeld: $R_4 = 1 \text{ M}\Omega$;
 $C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$;
 $t_m = ?$

$$t_m = 0,7 \cdot 1 \text{ M}\Omega \cdot 10 \text{ }\mu\text{F} = 7 \text{ s}$$



Figuur 5.6

5.1.7 Wisselspanningsversterker

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_1 \cdot r_{in}}$$

$$\text{met } r_{in} = R_G \parallel R_{GS}$$

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_2 \cdot (r_{uit} + R_L)}$$

$$\text{met } r_{uit} = R_D \parallel r_{DS}$$

$$f_b = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (C_{22} + C_{sch}) \cdot r_{uit}}$$

$$\text{met } r_{uit} = R_D \parallel r_{DS}$$

f_o onderste grensfrequentie

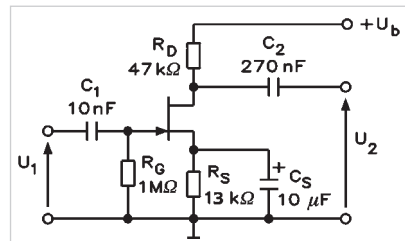
f_b bovenste grensfrequentie

r_{in} wisselstroom-ingangsweerstand

r_{uit} wisselstroom-uitgangsweerstand

C_{sch} schakelcapaciteit

C_{22} uitgangscapaciteit



Figuur 5.7

Voorbeeld: $U_b = 24 \text{ V}$; $U_{DS} = 15 \text{ V}$; $U_{GS} = -2 \text{ V}$; $I_D = 150 \text{ }\mu\text{A}$;
 $-I_{GSS} = 500 \text{ nA}$; $R_L = 10 \text{ k}\Omega$; $y_{22} = 25 \text{ }\mu\text{S}$; $C_{22} = 1 \text{ pF}$;
 $C_{sch} = 150 \text{ pF}$; $f_o = 30 \text{ Hz}$;
 $R_D = ?$; $R_S = ?$; $R_G = ?$; $C_1 = ?$; $C_2 = ?$; $f_b = ?$

$$R_D = \frac{U_b - U_{DS} + U_{GS}}{I_D} = \frac{24 \text{ V} - 15 \text{ V} - 2 \text{ V}}{150 \mu\text{A}} = 46,7 \text{ k}\Omega \approx 47 \text{ k}\Omega$$

$$R_S = \frac{-U_{GS}}{I_D} = \frac{|-2 \text{ V}|}{150 \mu\text{A}} = 13,3 \text{ k}\Omega; \quad R_G = \frac{0,5 \text{ V}}{-I_{GSS}} = \frac{0,5 \text{ V}}{500 \text{ nA}} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_{GS} = \frac{-U_{GS}}{-I_{GSS}} = \frac{2 \text{ V}}{500 \text{ nA}} = 4 \text{ M}\Omega; \quad r_{in} = R_G \parallel R_{GS} = 1 \text{ M}\Omega \parallel 4 \text{ M}\Omega \approx 1 \text{ M}\Omega$$

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 30 \text{ Hz} \cdot 1 \text{ M}\Omega} = 5,3 \text{ nF}$$

$$r_{uit} = R_D \parallel r_{DS} = 46,7 \text{ k}\Omega \parallel \frac{1}{25 \mu\text{S}} \approx 21,6 \text{ k}\Omega$$

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 30 \text{ Hz} \cdot (21,6 \text{ k}\Omega + 13 \text{ k}\Omega)} \approx 153 \text{ nF}$$

$$f_b = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot (1 \text{ pF} + 150 \text{ pF}) \cdot 21,6 \text{ k}\Omega} = 48,8 \text{ kHz}$$

5.2 MOSFET's

MOSFET's (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) zijn FET's met een geïsoleerde gate; afhankelijk van het geleidende kanaal worden N- en P-kanaal-typen onderscheiden. Daarnaast worden (afhankelijk van de wijze van aansturing) nog verarmings- en verrijkingstypen (depletion resp. enhancement) onderscheiden.

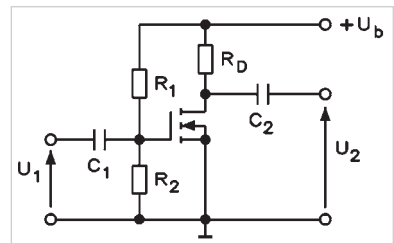
5.2.1 Gemeenschappelijke-sourceschakeling

$$v_u = \frac{u_2}{u_1} = -S \cdot (r_{DS} \parallel R_D)$$

$$r_{DS} \gg R_D \rightarrow v_u \approx S \cdot R_D$$

$$U_2 = -S \cdot U_{GS} \cdot (r_{DS} \parallel R_L)$$

$$Z_1 \approx R_1 \parallel R_2; \quad Z_2 \approx R_D$$



Figuur 5.8

Voorbeeld: $S = 10 \text{ mA/V}$; $R_D = 1 \text{ k}\Omega$; $r_{DS} = 2 \text{ M}\Omega$;
 $v_u = ?$; $Z_2 = ?$

$$r_{DS} \parallel R_D = \frac{2 \text{ M}\Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega}{2 \text{ M}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} \approx 1 \text{ k}\Omega$$

$$v_u = 10 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \cdot \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ M}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ M}\Omega} = 10; \quad Z_2 \approx R_D = 1 \text{ k}\Omega$$

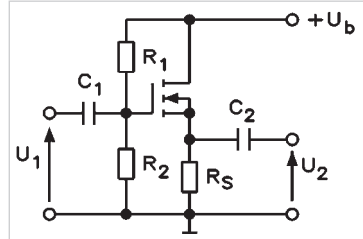
5.2.2 Gemeenschappelijke-drainschakeling

$$v_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{S \cdot (r_{DS} \parallel R_S)}{1 + S \cdot (r_{DS} \parallel R_D)}$$

$$r_{DS} \gg R_D \rightarrow v_u \approx \frac{S \cdot R_S}{1 + S \cdot R_S}$$

$$U_2 = - S \cdot U_{GS} \cdot (r_{DS} \parallel R_L)$$

$$Z_1 \approx R_1 \parallel R_2; \quad Z_2 \approx R_S \parallel \frac{1}{S}$$



Figuur 5.11

Voorbeeld: $S = 10 \text{ mA/V}$; $R_S = 1 \text{ k}\Omega$; $r_{DS} = 2 \text{ M}\Omega$; $v_u = ?$

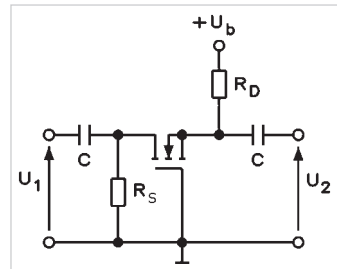
$$r_{DS} \parallel R_S = \frac{2 \text{ M}\Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega}{2 \text{ M}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} \approx 1 \text{ k}\Omega; \quad v_u = \frac{10 \text{ mA/V} \cdot 1 \text{ k}\Omega}{1 + 10 \text{ mA/V} \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 0,9$$

5.2.3 Gemeenschappelijke-gateschakeling

$$v_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{S \cdot R_D}{1 + S \cdot R_S}$$

$$r_{DS} \gg R_D \rightarrow v_u \approx \frac{S \cdot R_S}{1 + S \cdot R_S}$$

$$U_2 = - S \cdot U_{GS} \cdot (r_{DS} \parallel R_L)$$



Figuur 5.12

Voorbeeld: $S = 10 \text{ mA/V}$; $R_S = 1 \text{ k}\Omega$; $R_D = 1 \text{ k}\Omega$; $v_u = ?$

$$v_u = \frac{10 \text{ mA/V} \cdot 1 \text{ k}\Omega}{1 + 10 \text{ mA/V} \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 0,9$$

6 Speciale componenten

Veel materialen en componenten hebben een niet-lineaire karakteristiek.

6.1 Thermistoren

Thermistoren zijn polykristallijne temperatuurafhankelijke halfgeleiderweerstand.

6.1.1 NTC-weerstanden*

$$R_{NTC} = R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot e^{-B \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_w} - \frac{1}{\vartheta_k} \right)}$$

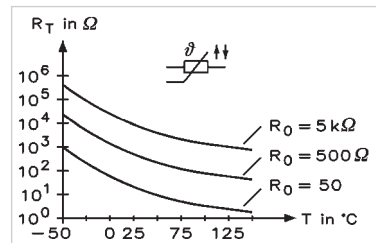
$$R_{NTC} = R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot e^{\alpha_R \cdot \Delta\vartheta \cdot (\vartheta_k / \vartheta_w)}$$

$$\alpha_R = \frac{-B}{\vartheta^2}$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_w - \vartheta_k$$

$$R_\tau = \sqrt{R_w \cdot R_k}$$

- R_{NTC} weerstand in Ω
- B materiaalconstante ($-2,5 \text{ \%}/\text{K} \dots -5,5 \text{ \%}/\text{K}$)
- α_R temperatuurcoëfficiënt
- ϑ_w 'warme' weerstand
- ϑ_k 'koude' weerstand
- $\Delta\vartheta$ temperatuurverschil
- τ afkoelingstijdconstante
- R_τ weerstand na τ seconden na uitschakelen



Figuur 6.1

Voorbeeld: $R_{20^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ k}\Omega$; $\vartheta_{aan} = 50^{\circ}\text{C}$; $B = -4 \text{ \%}/\text{K}$; $R_{NTC} = ?$

$$R_{NTC} = 5 \text{ k}\Omega \cdot e^{-4\%/K \cdot (1/20^{\circ}\text{C} - 1/50^{\circ}\text{C})} = 4,43 \text{ k}\Omega$$

* NTC = Negative Temperature Coefficient.

6.1.2 Meet- en compensatie-thermistors

$$U_{\max} = \sqrt{G \cdot R_T \cdot \Delta \vartheta_{\max}}; \quad I_{\max} = \sqrt{\frac{G \cdot \Delta \vartheta_{\max}}{R_T}}$$

G	dissipatieconstante in W/K
$U_{\max}$	maximale toelaatbare spanning over de thermistor
$I_{\max}$	maximaal toelaatbare stroom door de thermistor
$\Delta \vartheta_{\max}$	maximaal toelaatbare opwarming in K
R_T	weerstand van de thermistor bij omgevingstemperatuur T

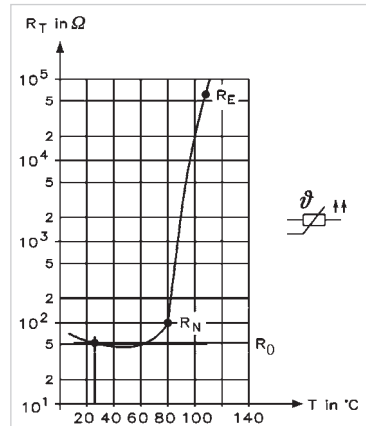
6.1.3 PTC-weerstanden*

$$R_N = 2 \cdot R_0$$

$$\alpha_R = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\vartheta_1 - \vartheta_2}$$

$$R_2 \approx R_1 \cdot e^{\alpha_R \cdot (\vartheta_N - \vartheta_1)}$$

R_1, R_2	weerstandswaarden bij ϑ_1 en ϑ_2 boven ϑ_N
R_0	beginweerstand bij $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ of $\vartheta = 25^\circ\text{C}$
R_N	nominale weerstand bij ϑ_N
ϑ_N	omslagtemperatuur
α_R	temperatuurcoëfficiënt boven ϑ_N
R_E	eindweerstand



Figuur 6.2

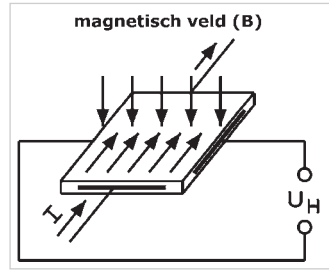
6.2 Magnetisch gevoelige componenten

6.2.1 Hall-generator

$$U_H = \frac{R_H}{d} \cdot I \cdot B = K \cdot I \cdot B$$

* PTC = Positive Temperature Coefficient.

U_H	Hall-spanning
R_H	Hall-constante in m^3/C $= \text{m}^3/\text{As}$
K	typeconstante $= R_H/d$ in m^2/C
d	dikte van het plaatje
I	stroom in lengterichting van het plaatje
B	fluxdichtheid (magnetische inductie) loodrecht op het plaatje



Figuur 6.3

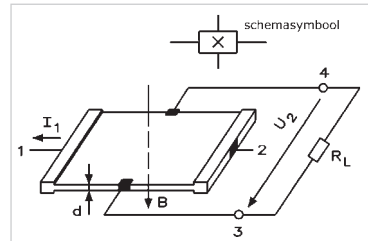
Voorbeeld: $B = 1,5 \text{ T}$; $K = 10 \text{ m}^2/\text{C}$; $I = 10 \text{ mA}$; $U_H = ?$

$$U_H = 1,5 \text{ T} \cdot 10 \text{ mA} \cdot 10 \text{ m}^2/\text{C} = 150 \text{ mV}$$

6.2.2 Magnetisch gevoelige weerstanden*

$$\Delta I = \frac{U}{R_B - R_0}$$

R_0	weerstand zonder magnetisch veld
R_B	weerstand in magnetisch veld



Figuur 6.4

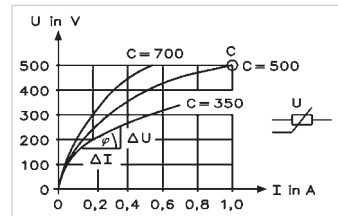
Voorbeeld: $U = 3 \text{ V}$; $R_0 = 30 \Omega$;
 $R_{B1,5T} = 250 \Omega$; $\Delta I = ?$

$$\Delta I = \frac{3 \text{ V}}{250 \Omega - 30 \Omega} = 13,6 \text{ mA}$$

6.2.3 Spanningsafhankelijke weerstand (VDR)**

$$U = C \cdot I^\beta; \quad I = K \cdot U^\gamma; \quad K = \frac{1}{C^\gamma}$$

$$\beta = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \tan \varphi; \quad \beta = \frac{1}{\gamma}$$



Figuur 6.5

* Ook: MDR = Magnetic Dependent Resistor.

** VDR = Voltage Dependent Resistor.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{C \cdot I^\beta}{I} = \frac{C}{I^{(1-\beta)}}; \quad R = \frac{U}{I} = \frac{U}{K \cdot U^\gamma} = \frac{1}{K \cdot U^{(\gamma-1)}}$$

$$P_V = U \cdot I = C \cdot I^{(1+\beta)} = K \cdot U^{(1+\gamma)}; \quad C_W = C_K \cdot (1 + \alpha_C \cdot \vartheta)$$

C	vormconstante (15...1000)
β	materiaalconstante (0,14...0,5)
φ	hellingshoek van de karakteristiek
α_C	-0,0012...-0,0018
γ	omgekeerde waarde van β
P_V	verliesvermogen (dissipatie)
C_W	vormconstante in warme toestand
C_K	vormconstante in koude toestand

6.2.4 Peltier-element

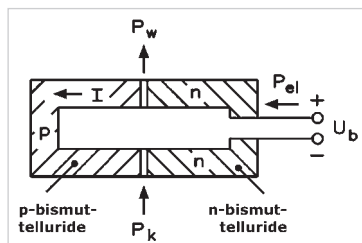
$$P_W = \alpha \cdot I \cdot \vartheta_W; \quad P_K = \alpha \cdot I \cdot \vartheta_K$$

$$P_V = I^2 \cdot R$$

$$P_{el} = \alpha \cdot I \cdot \Delta\vartheta + I^2 \cdot R$$

$$P_{el} = P_W - P_K + P_V = \alpha \cdot I \cdot \Delta\vartheta + P_V$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_W - \vartheta_K$$



Figuur 6.6

P_W	af te voeren verliesvermogen
P_K	koelvermogen
P_V	verliesvermogen in de stroomkring
ϑ_W	warme temperatuur
ϑ_K	koude temperatuur
$\Delta\vartheta$	temperatuurverschil
α	materiaalconstante in V/K

6.3 Opto-elektronische componenten

6.3.1 Golfengte van licht

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{f}$$

λ	golflengte van de lichtstraling
c	lichtsnelheid; $c \approx 300000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
f	frequentie

6.3.2 Lichtgevoelige weerstand (LDR)

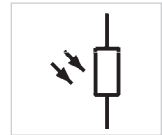
$$I_F = \frac{n \cdot e \cdot \tau}{T}; \quad I_D = \frac{U_b}{R_D}; \quad I_{F\max} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R_i}}$$

$$P_V = I_F^2 \cdot R_i = \frac{U_F^2}{R_i}$$

$$U_F = I_F \cdot R_i$$

$$U_{\text{ext}} = U_b - U_F$$

I_F	lichtafhankelijke fotostroom in A
I_D	donkerstroom (kortsluitstroom) zonder lichtinval
$P_{\max}$	maximaal toelaatbare dissipatie
n	aantal ladingsdragers per seconde
e	elementaire lading in A · s
τ	levensduur van de ladingsdragers in s
T	looptijd van de ladingsdragers tussen de elektroden in s
R_i	inwendige weerstand in Ω
R_D	donkerweerstand in Ω
R_{ext}	externe weerstand in Ω
R_{1000}	weerstand bij een verlichtingssterkte van 1000 lux
U_b	voedingsspanning (in het voorbeeld 5 V)
U_{ext}	spanning over externe weerstand
U_F	spanning over de lichtgevoelige weerstand



Figuur 6.7

Voorbeeld: $R_D = 1 \text{ M}\Omega$; $R_{1000} = 2,2 \text{ k}\Omega$; $R_v = 10 \text{ k}\Omega$; $U_{\text{ext}} = ?$

$$I_{D\min} = \frac{5 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega + 1 \text{ M}\Omega} = 4,95 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_{D\max} = \frac{5 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = 409,8 \text{ }\mu\text{A}$$

$$U_{\text{ext}(\max)} = 4,95 \text{ }\mu\text{A} \cdot 1 \text{ M}\Omega = 4,95 \text{ V}$$

$$U_{\text{ext}(\min)} = 409,8 \text{ }\mu\text{A} \cdot 2,2 \text{ k}\Omega = 0,9 \text{ V}$$

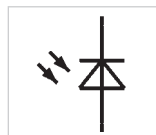
6.3.3 Fotodiode

$$U_F = I_F \cdot R_i; \quad U_{\text{uit}} = U_b - U_F$$

$$I_D = \frac{U_b}{R_D}; \quad P_{\text{max}} = I_F^2 \cdot R_i = \frac{U_F^2}{R_i}$$

$$I_{F\text{max}} = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}}{R_i}}; \quad U_{F\text{max}} = \sqrt{P_{\text{max}} \cdot R_i}$$

U_b	voedingsspanning
U_F	spanning over de fotodiode
U_{uit}	uitgangsspanning
I_F	lichtafhankelijke fotostroom
I_D	donkerstroom (kortsluitstroom) zonder lichtinval
R_i	inwendige weerstand
R_D	donkerweerstand

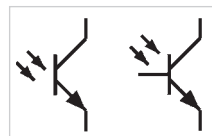


Figuur 6.8

6.3.4 Fototransistor

$$I_C = (1+B) \cdot I_{CB0}; \quad s = \frac{I_C}{\Phi}$$

I_C	collectorstroom
I_{CB0}	collector-lekstroom
B	gelijkstroomversterking (in gemeenschappelijke-emitterschakeling)
s	lichtstroom-gevoeligheid in mA/lm
Φ	lichtstroom in lm



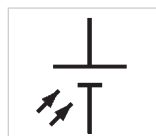
Figuur 6.9

6.3.5 Foto-voltaïsche cel

$$R_i = \frac{U_V}{I_K} \quad \text{bij } E = \text{constant}$$

$$s = \frac{I_F}{\Phi} = \frac{e}{A}; \quad e = \frac{I_F}{E} = s \cdot A$$

$$I_F = e \cdot E = s \cdot \Phi$$



Figuur 6.10

$$U_{\text{uit}} = \frac{U_V \cdot R_{\text{ext}}}{R_i + R_{\text{ext}}}; \quad U_{\text{uit}} = \frac{U_V}{2} \quad \text{als } R_i = R_{\text{uit}}$$

$$I = \frac{U_{\text{uit}}}{R_{\text{ext}}} = \frac{U_V}{2 \cdot R_{\text{ext}}} \quad (\text{als } R_i = R_{\text{uit}})$$

I_F	lichtafhankelijke fotostroom
U_V	onbelaste spanning (vrijloopspanning)
R_i	inwendige weerstand (afhankelijk van hoeveelheid licht)
I_K	kortsluitstroom (bij $R_{\text{ext}} = 0$)
Φ	lichtstroom in lm
A	lichtgevoelig oppervlak in cm^2
s	lichtstroom-gevoeligheid in mA/lm
e	verlichtingssterkte-gevoeligheid in mA/lx
E	verlichtingssterkte in lx (lux)

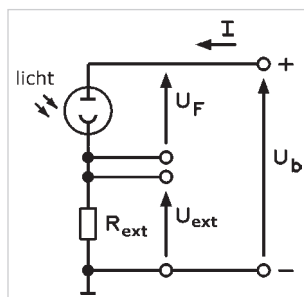
6.3.6 Vacuüm-fotocel

$$I_F = I_{\text{ext}} - I_0; \quad I_{\text{ext}} = I_F + I_0$$

$$U_{\text{ext}} = I_{\text{ext}} \cdot R_{\text{ext}}; \quad U_F = U_b - U_{\text{ext}}$$

$$s = \frac{I_F}{\Phi} = \frac{e}{A}; \quad e = \frac{I_F}{E} = s \cdot A$$

U_F	spanning over de fotocel
I_F	lichtafhankelijke fotostroom
Φ	lichtstroom in lm
E	verlichtingssterkte in lx
A	lichtgevoelig oppervlak in cm^2
e	verlichtingssterkte-gevoeligheid in mA/lx
s	lichtstroom-gevoeligheid in mA/lm
I_0	donkerstroom (kortsluitstroom) zonder lichtinval



Figuur 6.11

6.3.7 Gasgevulde fotocel

$$I_F = I_{\text{ext}} - I_0; \quad I_{\text{ext}} = I_F + I_0; \quad U_{\text{ext}} = I_{\text{ext}} \cdot R_{\text{ext}}$$

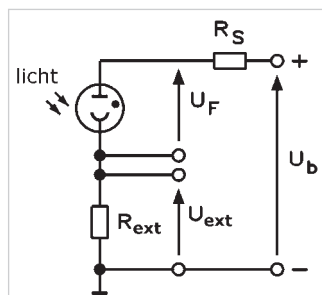
$$U_F = U_b - I_{\text{ext}} \cdot (R_{\text{ext}} + R_S)$$

$$I_{\text{ext}} = \frac{U_b - U_F}{R_{\text{ext}} + R_S}$$

$$I_{\text{ext(max)}} = I_{k(\text{max})} \cdot A$$

$$s = \frac{I_F}{\Phi} = \frac{e}{A}; \quad e = \frac{I_F}{E} = s \cdot A$$

R_S begrenzingsweerstand
 $I_{k(\text{max})}$ maximale kathodestroom
 in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$



Figuur 6.12

voor overige symbolen zie paragraaf 6.3.6

6.3.8 Fotomultiplicatorbuis

$$I_a = s \cdot \Phi \cdot v_{\text{tot}}; \quad I_k = s \cdot \Phi$$

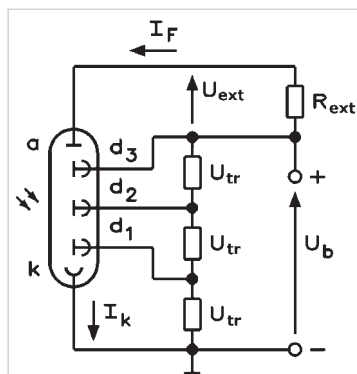
$$v_{\text{tot}} = \frac{I_a}{I_k}; \quad v_{\text{tot}} = (v_{\text{tr}})^n$$

$$v_{\text{tr}} = \delta \cdot \eta$$

$$U_b = n \cdot U_{\text{tr}} + U_{\text{ext}}$$

$$I_k = I_{k0} + I_{kf}$$

$$e = \frac{I_{kf}}{E} = s \cdot A$$



Figuur 6.13

v_{tot} totale versterking
 v_{tr} versterking per trap
 n aantal trappen
 (anodetrap niet meegerekend)
 U_{tr} spanning per trap
 δ secundaire-emissiefactor
 η rendement per trap
 I_{k0} kathode-donkerstroom
 I_{kf} kathode-fotostroom
 e verlichtingssterkte-gevoeligheid in $\mu\text{A}/\text{lx}$
 A lichtgevoelig oppervlak in cm^2

6.3.9 Licht: grootheden en eenheden

Grootheid	Eenheid	Vergelijking
lichtstroom Φ	lumen (lm)	
hoeveelheid licht Q	lumen-uur (lm · h)	$Q = \Phi \cdot t$
lichtsterkte I	candela (cd)	$I = \Phi / \omega$
verlichtingssterkte E	lux (lm / m ²)	$E = \Phi / A$
luminantie L (stralend oppervlak) (reflecterend oppervlak)	cd / cm ² cd / m ²	$L = \Phi / (\omega \cdot A \cdot \cos \varepsilon)$
belichting H	lux-seconde (lx · s)	$H = E \cdot t$
lichtrendement η	lm / W	$\eta = \Phi / P$
reflectie ρ	–	$\rho = \Phi_{\rho} / \Phi$
absorptie a	–	$a = \Phi_a / \Phi$
ruimtehoek ω	steradiaal (sr)	$\omega = A / r^2$

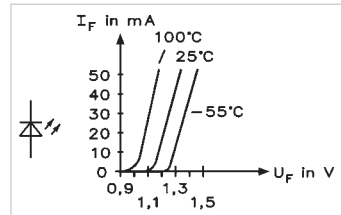
6.3.10 LED (lichtgevende diode)*

$$R_S = \frac{U_b - U_F}{I_F};$$

$$P_V = U_F \cdot I_F$$

$$\eta = \frac{P_{\text{opt}}}{U_F \cdot I_F}$$

I_F doorlaatstroom (5...100 mA)
 U_F doorlaatspanning (1,3...4,0 V)
 P_V verliesvermogen (30...100 mW)
 P_{opt} uitgestraald optisch vermogen in mW
 R_S seriële weerstand



Figuur 6.14

Voorbeeld: $U_F = 1,7 \text{ V}$; $I_F = 20 \text{ mA}$; $U_b = 5 \text{ V}$; $R_S = ?$

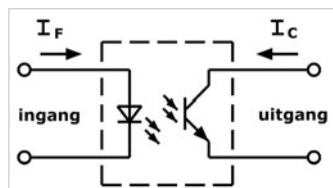
$$R_S = \frac{5 \text{ V} - 1,7 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 165 \Omega$$

* LED = Light Emitting Diode.

6.3.11 Optocoupler

$$CTR = \frac{I_C}{I_F}$$

CTR current transfer ratio
 R_1 serieweerstand LED
 R_2 serieweerstand transistor



Figuur 6.15

Voorbeeld: $U_b = 5 \text{ V}$; $U_F = 1,7 \text{ V}$;

$I_F = 20 \text{ mA}$; $I_C = 12 \text{ mA}$; $R_1 = ?$; $CTR = ?$; $R_2 = ?$

$$R_1 = \frac{5 \text{ V} - 1,7 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 165 \Omega; \quad R_2 = \frac{5 \text{ V}}{12 \text{ mA}} = 417 \Omega$$

$$CTR = \frac{12 \text{ mA}}{20 \text{ mA}} = 0,6$$

7 Operationele versterkers

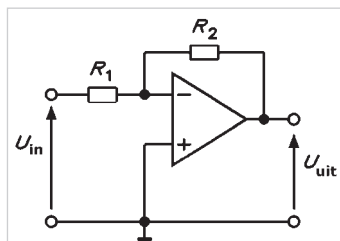
7.1 Basisschakelingen

7.1.1 Inverterende versterker

$$v = -\frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{uit}}{U_{in}}$$

Voorbeeld: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$;
 $U_{in} = +100 \text{ mV}$; $U_{uit} = ?$

$$U_{uit} = -100 \text{ mV} \cdot \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = -1 \text{ V}$$



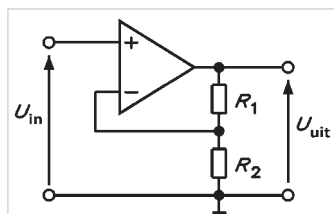
Figuur 7.1

7.1.2 Niet-inverterende versterker

$$v = 1 + \frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{uit}}{U_{in}}$$

Voorbeeld: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$;
 $U_{in} = 100 \text{ mV}$; $U_{uit} = ?$

$$U_{uit} = 100 \text{ mV} \cdot \left(1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega}\right) = 200 \text{ mV}$$



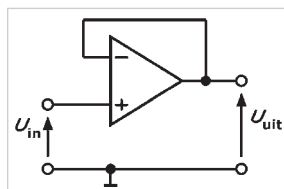
Figuur 7.2

7.1.3 Impedantietransformator

$$U_{uit} = U_{in}$$

$$v = \frac{U_{uit}}{U_{in}} = 1$$

$$\begin{aligned} r_{in} &= 10^5 \dots 10^{24} \Omega \\ r_{uit} &= 50 \dots 75 \Omega \end{aligned}$$



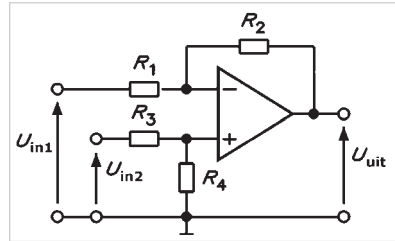
Figuur 7.3

7.1.4 Verschilversterker

$$U_{uit} = (U_{in2} - U_{in1}) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_1 = R_3; \quad R_2 = R_4$$

Voorbeeld: $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$;
 $R_2 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$;
 $U_{in1} = +1 \text{ V}$;
 $U_{in2} = +0,5 \text{ V}$;
 $U_{uit} = ?$



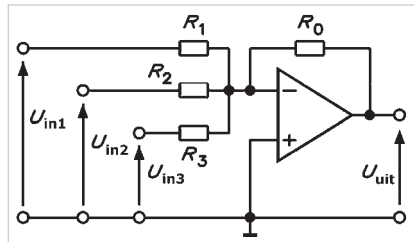
Figuur 7.4

$$U_{uit} = (0,5 \text{ V} - 1 \text{ V}) \cdot \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = -5 \text{ V}$$

7.1.5 Optelschakeling (sommeerversterker)

$$\begin{aligned} -U_{uit} &= U_{in1} \cdot \frac{R_0}{R_1} + U_{in2} \cdot \frac{R_0}{R_2} + \\ &+ U_{in3} \cdot \frac{R_0}{R_3} \end{aligned}$$

Voorbeeld: $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$;
 $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$;
 $U_{in1} = +1 \text{ V}$; $U_{in2} = +0,5 \text{ V}$; $U_{in3} = +0,25 \text{ V}$;
 $U_{uit} = ?$

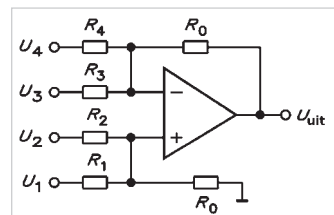


Figuur 7.5

$$U_{uit} = -(1 \text{ V} + 0,5 \text{ V} + 0,25 \text{ V}) = -1,75 \text{ V}$$

7.1.6 Aftrekschakeling

$$-U_{uit} = R_0 \cdot \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} - \frac{U_3}{R_3} - \frac{U_4}{R_4} \right)$$



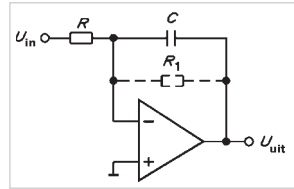
Figuur 7.6

7.1.7 Integrator

$$-U_{\text{uit}} = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t U_{\text{in}} \cdot dt$$

Voorbeeld: $R = 1 \text{ M}\Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$;
 $U_{\text{in}} = +1 \text{ V}$; $U_{\text{uit}} = ?$

$$U_{\text{uit}} = -\frac{1}{1 \text{ M}\Omega \cdot 1 \mu\text{F}} \cdot 1 \text{ V} = -1 \frac{\text{V}}{\text{s}}$$

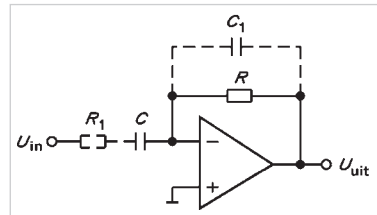


Figuur 7.7

7.1.8 Differentiator

$$-U_{\text{uit}} = R \cdot C \cdot \frac{dU_{\text{in}}}{dt}$$

voor $R \cdot C_1 \leq R_1 \cdot C$



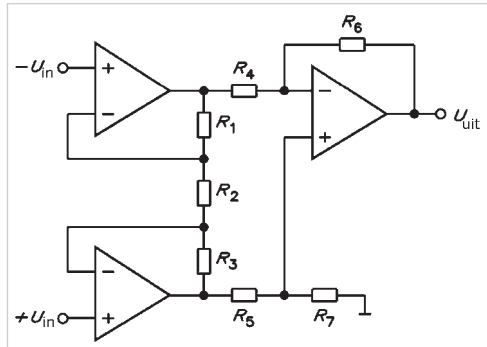
Figuur 7.8

7.1.9 Instrumentatieversterker

$$v_u = \frac{R_6}{R_4} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_2} \right)$$

met $R_1 = R_3$, $R_4 = R_5$,
 $R_6 = R_7$

v_u spannings-
 versterking



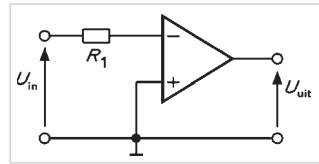
Figuur 7.9

7.2 Comparator en Schmitt-trigger

7.2.1 Inverterende nuldoorgangsdetector

$$U_{\text{uit}} = \begin{cases} +U_{\text{sat}} & \text{voor } U_{\text{in}} < 0 \text{ V} \\ -U_{\text{sat}} & \text{voor } U_{\text{in}} > 0 \text{ V} \end{cases}$$

$+U_{\text{sat}}$ positieve verzadigde uitgangsspanning
 $-U_{\text{sat}}$ negatieve verzadigde uitgangsspanning

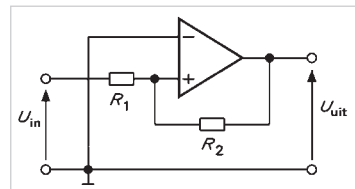


Figuur 7.10

7.2.2 Niet-inverterende nuldoorgangsdetector

$$U_{\text{uit}} = \begin{cases} +U_{\text{sat}} & \text{voor } U_{\text{in}} > 0 \text{ V} \\ -U_{\text{sat}} & \text{voor } U_{\text{in}} < 0 \text{ V} \end{cases}$$

$+U_{\text{sat}}$ positieve verzadigde uitgangsspanning
 $-U_{\text{sat}}$ negatieve verzadigde uitgangsspanning

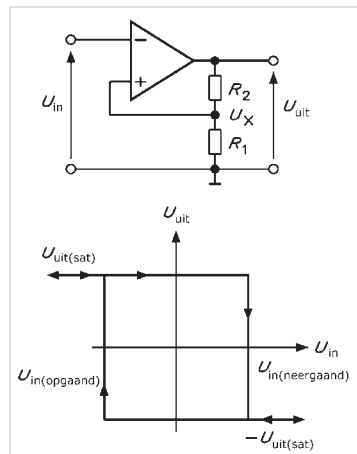


Figuur 7.11

7.2.3 Analoge comparator met hysteresis

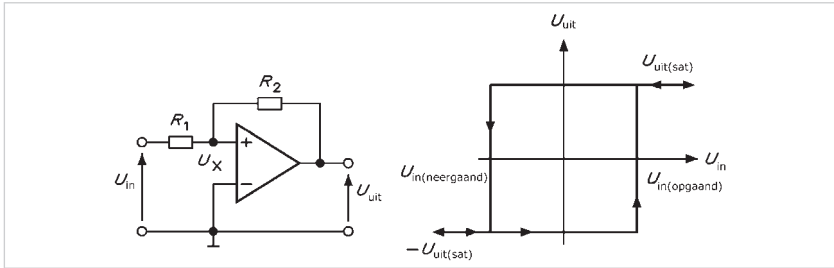
$$U_{\text{uit}} = \begin{cases} +U_{\text{sat}} & \text{voor } U_{\text{in}} > 0 \text{ V} \\ -U_{\text{sat}} & \text{voor } U_{\text{in}} < 0 \text{ V} \end{cases}$$

$+U_{\text{sat}}$ positieve verzadigde uitgangsspanning
 $-U_{\text{sat}}$ negatieve verzadigde uitgangsspanning



Figuur 7.12

7.2.4 Inverterende Schmitt-trigger



Figuur 7.13

$$U_X = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (+U_{\text{sat}}); \quad U_X = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (-U_{\text{sat}})$$

$$U_H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot ((+U_{\text{sat}}) - (-U_{\text{sat}}))$$

$$U_{\text{sat}} \approx U_b$$

Voorbeeld: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$;
 $U_b = \pm 12 \text{ V}$; $U_H = ?$

$$U_H = \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot (12 \text{ V} + 12 \text{ V}) = 2,18 \text{ V}$$

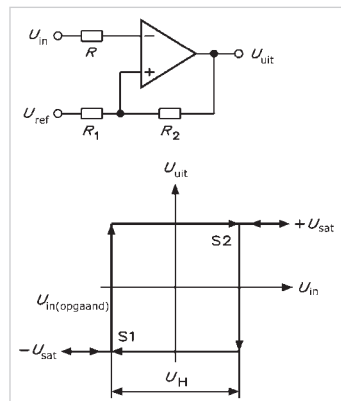
7.2.5 Niet-inverterende Schmitt-trigger

$$S_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (U_{\text{ref}} - U_{\text{sat}})$$

$$S_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (U_{\text{ref}} + U_{\text{sat}})$$

$$U_H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot 2 \cdot U_{\text{sat}}$$

$$U_b \approx U_{\text{sat}}$$



Figuur 7.14

Voorbeeld: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$; $U_b = \pm 12 \text{ V}$; $U_{\text{ref}} = 6 \text{ V}$; $U_H = ?$

$$U_H = \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 2 \cdot 12 \text{ V} = 2,18 \text{ V}$$

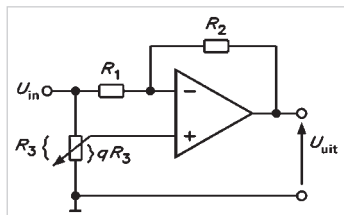
7.2.6 Continu regelbare versterking

$$U_{\text{uit}} = (2q - 1) \cdot U_{\text{in}}$$

$$\text{met } 0 \leq q \leq 1$$

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 2,5 \text{ V}$; $q = 0,5$; $U_{\text{uit}} = ?$

$$U_{\text{uit}} = (2 \cdot 0,5 - 1) \cdot 2,5 \text{ V} = 0 \text{ V}$$



Figuur 7.15

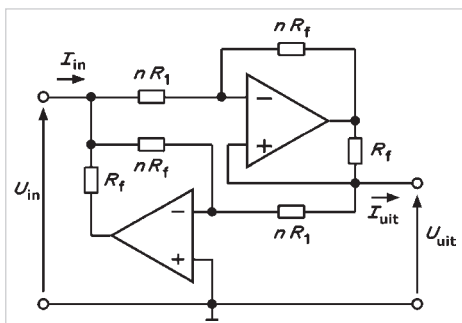
7.2.7 Gyrator

$$I_{\text{uit}} = \frac{U_{\text{in}}}{R_1}; \quad I_{\text{in}} = \frac{U_{\text{uit}}}{R_1}$$

$$\frac{U_{\text{in}}}{I_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{uit}}}{U_{\text{uit}}} \cdot R_1^2$$

$$Z_{\text{in}} = \frac{1}{Z_{\text{uit}}} \cdot R_1^2$$

waarbij: $n \gg 1$



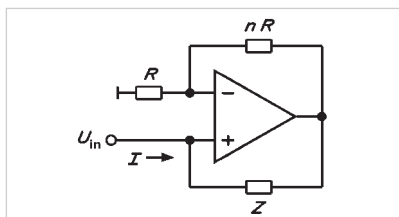
Figuur 7.16

7.2.8 Negatieve impedantie (kortsluitstabiël)

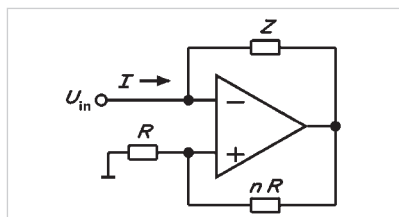
$$Z_{\text{in}} = \frac{U_{\text{in}}}{I} = -\frac{Z}{n} \quad (\text{figuur 7.17})$$

7.2.9 Negatieve impedantie (openstabiël)

$$Z_{\text{in}} = \frac{U_{\text{in}}}{I} = -\frac{Z}{1+n} \quad (\text{figuur 7.18})$$



Figuur 7.17



Figuur 7.18

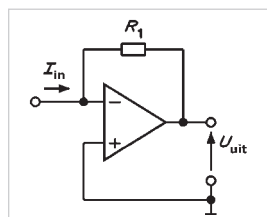
7.3 Opamp-omzetters

7.3.1 Inverterende stroom-spanningomzetter

$$-U_{\text{uit}} = R_1 \cdot I_{\text{in}}$$

Voorbeeld: $I_{\text{in}} = 1 \text{ mA}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $U_{\text{uit}} = ?$

$$-U_{\text{uit}} = R_1 \cdot I_{\text{in}} = 1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ mA} = 1 \text{ V}$$



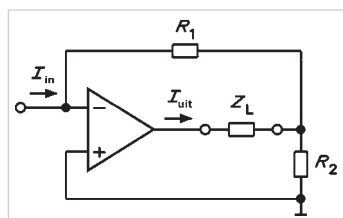
Figuur 7.19

7.3.2 Inverterende stroomversterker

$$-I_{\text{uit}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot I_{\text{in}}$$

Voorbeeld: $I_{\text{in}} = 1 \text{ mA}$;
 $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $I_{\text{uit}} = ?$

$$-I_{\text{uit}} = \left(1 + \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega}\right) \cdot 1 \text{ mA} = 2 \text{ mA}$$



Figuur 7.20

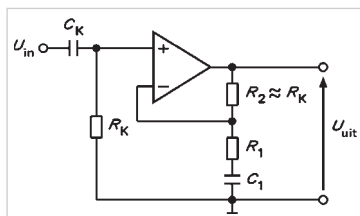
7.3.3 Wisselspanningsversterker met driftcompensatie

$$v_{u\sim} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{voor} \quad \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1} \ll 1$$

$$v_{u-} \approx 1$$

Voorbeeld: $U_{in} = 100 \text{ mV}$;
 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$;
 $U_{uit\sim} = ?$

$$U_{uit\sim} = 100 \text{ mV} \cdot \left(1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \right) = 1,1 \text{ V}$$

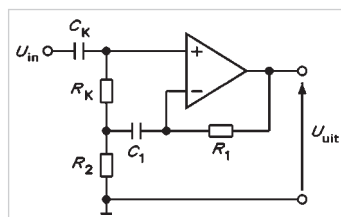


Figuur 7.21

7.3.4 Bootstrap-wisselspanningsversterker

$$v_{u\sim} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{voor } \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1} \ll 1$$



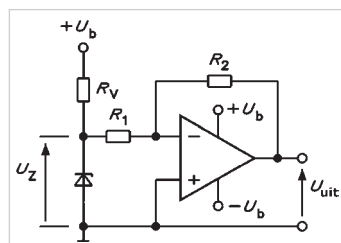
Figuur 7.22

7.3.5 Constante-spanningsbron

$$-U_{uit} = U_Z \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Voorbeeld: $U_Z = 4,7 \text{ V}$;
 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $U_{uit} = ?$

$$-U_{uit} = 4,7 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 4,7 \text{ V}$$

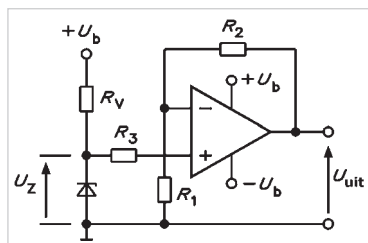


Figuur 7.23

$$U_{uit} = U_Z \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Voorbeeld: $U_Z = 4,7 \text{ V}$;
 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $U_{uit} = ?$

$$U_{uit} = 4,7 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \right) = 9,4 \text{ V}$$



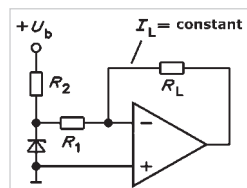
Figuur 7.24

7.3.6 Constante-stroombron

$$I_L = \frac{U_{\text{uit}}}{R_L} = \frac{U_Z}{R_1}$$

Voorbeeld: $U_Z = 4,7 \text{ V}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $I_L = ?$

$$I_L = \frac{4,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 4,7 \text{ mA}$$

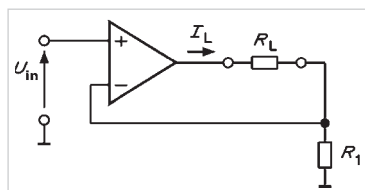


Figuur 7.25

$$I_L = \frac{U_{\text{in}}}{R_1}$$

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 4,7 \text{ V}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$;
 $I_L = ?$

$$I_L = \frac{4,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 4,7 \text{ mA}$$



Figuur 7.26

$$I_L = \frac{U_{\text{in}}}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$R_3 = \frac{R_2^2}{R_1 + R_2}$$

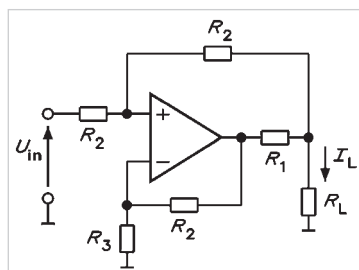
voor $R_1 \ll R_2$ geldt:

$$I_L \approx \frac{U_{\text{in}}}{R_1}; \quad R_3 \approx R_2$$

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 4,7 \text{ V}$; $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $I_L = ?$; $R_3 = ?$

$$I_L = \frac{4,7 \text{ V}}{(1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega) / (1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega)} = 9,4 \text{ mA}$$

$$R_3 = \frac{(1 \text{ k}\Omega)^2}{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 500 \Omega$$



Figuur 7.27

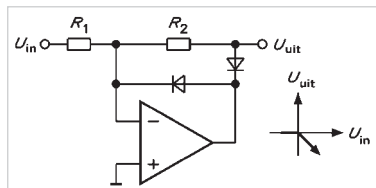
7.3.7 Lineaire enkelzijdige gelijkrichter

$$-U_{\text{uit}} = U_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

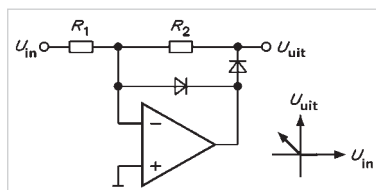
Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 100 \text{ mV}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$;
 $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $U_{\text{uit}} = ?$

$$-U_{\text{uit}} = 100 \text{ mV} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ V}$$

$$-U_{\text{uit}} = U_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



Figuur 7.28

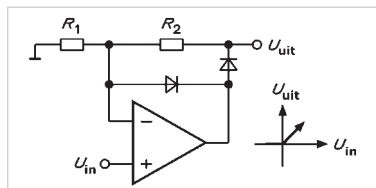


Figuur 7.29

$$U_{\text{uit}} = U_{\text{in}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 100 \text{ mV}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$;
 $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $U_{\text{uit}} = ?$

$$U_{\text{uit}} = 100 \text{ mV} \cdot \left(1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega}\right) = 1,1 \text{ V}$$



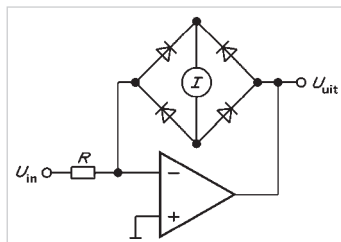
Figuur 7.30

7.3.8 Dubbelzijdige precisie-gelijkrichter

$$I = \frac{U_{\text{in}}}{R}$$

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 100 \text{ mV}$; $R = 1 \text{ k}\Omega$;
 $I = ?$

$$I = \frac{100 \text{ mV}}{1 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA}$$



Figuur 7.31

7.3.9 Logaritmische versterker met diode

$$U_{\text{uit}} = m \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) + I \cdot R_E$$

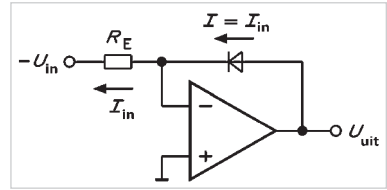
Bij 28,58 °C geldt exact:

$$\frac{kT}{q} = 26 \text{ mV}$$

Bij 29,25 °C geldt exact:

$$\frac{kT}{q} \cdot \ln(10) = 60 \text{ mV}$$

m	schaalfactor (correctiefactor)
k	constante van Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)
q	elementaire lading (lading van het elektron: $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
I_0	geëxtrapoleerde stroom bij $U_0 = 0 \text{ V}$



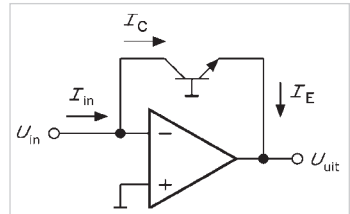
Figuur 7.32

7.3.10 Logaritmische versterker met transistor

$$U_{\text{uit}} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{Esat}}}\right) - \frac{kT}{q} \cdot \ln(\alpha_n)$$

(geldt voor $I_{\text{in}} \gg I_{\text{Esat}}$)

I_{Esat}	emitter-verzadigingsstroom
α_n	stroomtransformatie



Figuur 7.33

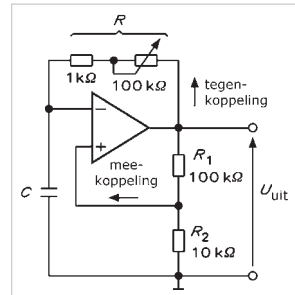
7.4 Opamp-generatoren

7.4.1 Blokgolfgenerator

$$f = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot R_2}{R_1} \right)}$$

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 100 \text{ nF}$;
 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 1 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \right)} = 2,7 \text{ kHz}$$



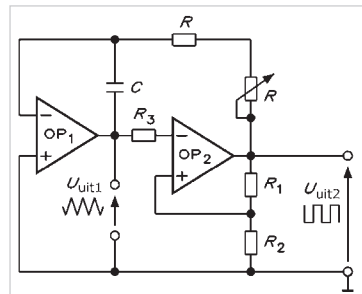
Figuur 7.34

7.4.2 Driehoek/blokgolfgenerator (functiegenerator)

$$f = \frac{1}{4 \cdot R \cdot C} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$;
 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$;
 $f = ?$

$$f = \frac{1}{4 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F}} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 250 \text{ Hz}$$



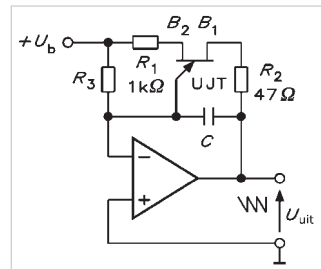
Figuur 7.35

7.4.3 Zaagtandgenerator

$$f = \frac{U_b}{(U_b \cdot \eta + 0,7 \text{ V}) \cdot R \cdot C}$$

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$;
 $\eta = 0,7$; $U_b = 12 \text{ V}$; $f = ?$

$$f = \frac{12 \text{ V}}{(12 \text{ V} \cdot 0,7 + 0,7 \text{ V}) \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F}} = 131,8 \text{ Hz}$$



Figuur 7.36

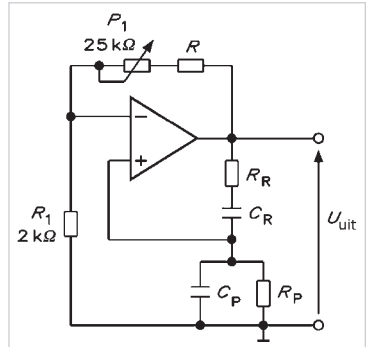
7.4.4 Sinusgenerator met Wien-Robinson-brug

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$R_1 = 2 \cdot n \cdot R; \quad R_2 = n \cdot R$$

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$;
 $C = 100 \text{ nF}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF}} = 159 \text{ Hz}$$



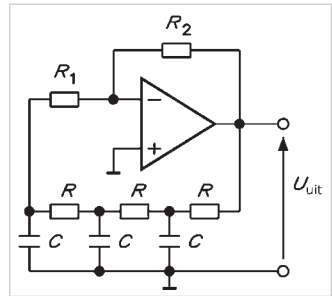
Figuur 7.37

7.4.5 Sinusgenerator met laagdoorlaat-fasedraaier

$$f = \frac{1}{2,5 \cdot R \cdot C}$$

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 100 \text{ nF}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{2,5 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF}} = 400 \text{ Hz}$$



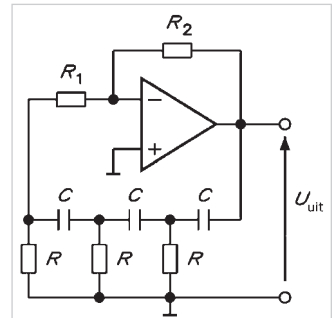
Figuur 7.38

7.4.6 Sinusgenerator met hoogdoorlaat-fasedraaier

$$f = \frac{1}{15,4 \cdot R \cdot C}$$

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 100 \text{ nF}$; $f = ?$

$$f = \frac{1}{15,4 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF}} = 65 \text{ Hz}$$



Figuur 7.39

7.5 Actieve laag- en hoogdoorlaatfilters

Orde	Filtercoëfficiënten		Filtertype
	a ₁	b ₁	
1 ^e orde	1,0000	1,0000	alle typen
2 ^e orde	1,2872	0,4142	KR
	1,3617	0,6180	BE
	1,4142	1,0000	BU
	1,3614	1,3827	CH½
	1,3022	1,5515	CH1
	1,1813	1,7775	CH2
	1,0650	1,9305	CH3

Legenda	
KR	kritisch gedempt (Gauss-)filter
BE	Bessel-filter
BU	Butterworth-filter
CH½	Chebyshev-filter met 0,5 dB rimpel
CH1	Chebyshev-filter met 1 dB rimpel
CH2	Chebyshev-filter met 2 dB rimpel
CH3	Chebyshev-filter met 3 dB rimpel

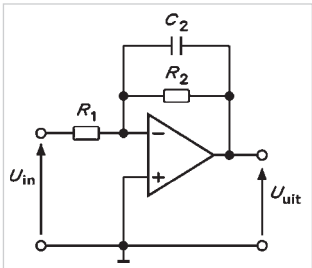
7.5.1 Actief 1^e-orde laagdoorlaatfilter

$$R_2 = \frac{a_1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot C_2}; \quad R_1 = \frac{R_2}{|v_0|}$$

Voorbeeld: $C_2 = 10 \text{ nF}$; $f_g = 1 \text{ kHz}$;
 $R_1 = ?$; $R_2 = ?$

$$R_2 = \frac{1,0000}{2,314 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ nF}} = 15,9 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{15,9 \text{ k}\Omega}{1} = 15,9 \text{ k}\Omega$$



Figuur 7.40

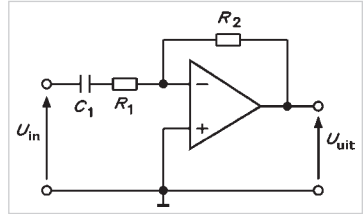
7.5.2 Actief 1^e-orde hoogdoorlaatfilter

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot C_1 \cdot a_1}; \quad R_2 = R_1 \cdot |v_\infty|$$

Voorbeeld: $C_1 = 10 \text{ nF}$; $f_g = 1 \text{ kHz}$;
 $R_1 = ?$; $R_2 = ?$

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ nF} \cdot 1} = 15,9 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 15,9 \text{ k}\Omega \cdot 1 = 15,9 \text{ k}\Omega$$



Figuur 7.41

7.5.3 Actief 2^e-orde laagdoorlaatfilter

$$f_g = \frac{\sqrt{b_1}}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Voor $R = R_1 = R_2$ geldt:

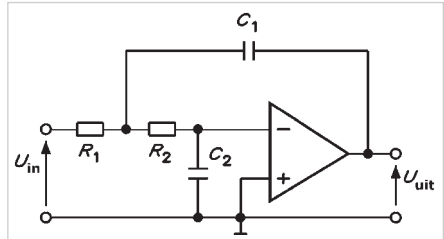
$$C_1 = \frac{a_1}{4 \cdot \pi \cdot f_g \cdot R}$$

$$C_2 = \frac{3 \cdot b_1}{4 \cdot \pi \cdot f_g \cdot a_1 \cdot R}$$

Voor $C = C_1 = C_2$ geldt:

$$R = \frac{\sqrt{b_1}}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot C}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = 2 - \frac{a_1}{\sqrt{b_1}}$$



Figuur 7.42

Voorbeeld: filtertype BE; $R = R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$;
 $f_g = 1 \text{ kHz}$; $C_1 = ?$; $C_2 = ?$

$$C_1 = \frac{1,3617}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 10,8 \text{ nF}$$

$$C_2 = \frac{3 \cdot 0,6180}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 1,3617 \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 10,8 \text{ nF}$$

7.5.4 Filtercoëfficiënten voor een geoptimaliseerde frequentie karakteristiek

Orde	Filtercoëfficiënten				Filtertype
	a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	
1 ^e orde	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	alle typen
2 ^e orde	1,2872	0,4142	0,0000	0,0000	KR
	1,3617	0,6180	0,0000	0,0000	BE
	1,4142	1,0000	0,0000	0,0000	BU
	1,3614	1,3827	0,0000	0,0000	CH½
	1,3022	1,5515	0,0000	0,0000	CH1
	1,1813	1,7775	0,0000	0,0000	CH2
	1,0650	1,9305	0,0000	0,0000	CH3
3 ^e orde	0,5098	0,0000	1,0197	0,2599	KR
	0,7560	0,0000	0,9996	0,4722	BE
	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	BU
	1,8636	0,0000	0,6402	1,1931	CH½
	2,2156	0,0000	0,5442	1,2057	CH1
	2,7994	0,0000	0,4300	1,2036	CH2
	3,3496	0,0000	0,3559	1,1923	CH3
4 ^e orde	0,8700	0,1892	0,8700	0,1982	KR
	1,3397	0,4889	0,7743	0,3890	BE
	1,8478	1,0000	0,7654	1,0000	BU
	2,6282	3,4341	0,3648	1,1509	T½
	2,5904	4,1301	0,3039	1,1697	T1
	2,4025	4,9862	0,2374	1,1896	T2
	2,1853	5,5339	0,1964	1,2009	T3

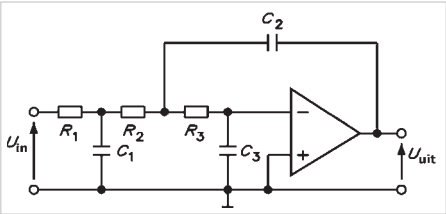
Legenda: zie bladzijde 166.

7.5.5 Actief 3^e-orde laagdoorlaatfilter

$$C_1 = \frac{a_1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot R}$$

$$C_2 = \frac{a_2}{4 \cdot \pi \cdot f_g \cdot R}$$

$$C_3 = \frac{3 \cdot b_2}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot a_2 \cdot R}$$



Figuur 7.43

Voorbeeld: filtertype CH3; $R_1 = R_3 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$; $f_g = 100 \text{ Hz}$;
 $C_1 = ?$; $C_2 = ?$; $C_3 = ?$

$$C_1 = \frac{3,3496}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 533 \text{ nF}$$

$$C_2 = \frac{0,3559}{4 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 28 \text{ nF}$$

$$C_3 = \frac{3 \cdot 1,1923}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 0,3559 \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 1,6 \mu\text{F}$$

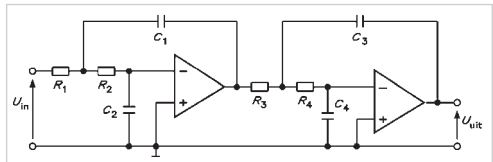
7.5.6 Actief 4^e-orde laagdoorlaatfilter

$$C_1 = \frac{a_1}{4 \cdot \pi \cdot f_g \cdot R}$$

$$C_2 = \frac{3 \cdot b_1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot a_1 \cdot R}$$

$$C_3 = \frac{a_2}{4 \cdot \pi \cdot f_g \cdot R}$$

$$C_4 = \frac{3 \cdot b_2}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot a_2 \cdot R}$$



Figuur 7.44

Voorbeeld: filtertype BE; $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$; $f_g = 100 \text{ Hz}$;
 $C_1 = ?$; $C_2 = ?$; $C_3 = ?$; $C_4 = ?$

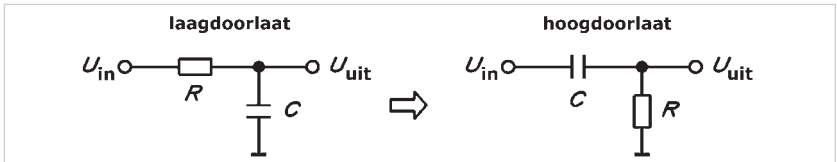
$$C_1 = \frac{1,3397}{4 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 106,6 \text{ nF}$$

$$C_2 = \frac{3 \cdot 0,4889}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 1,3397 \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 174,3 \text{ nF}$$

$$C_3 = \frac{0,7743}{4 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 61,6 \text{ nF}$$

$$C_4 = \frac{3 \cdot 0,3890}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 0,7743 \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 240 \text{ nF}$$

7.5.7 Omrekenen van laagdoorlaat- naar hoogdoorlaatfilter



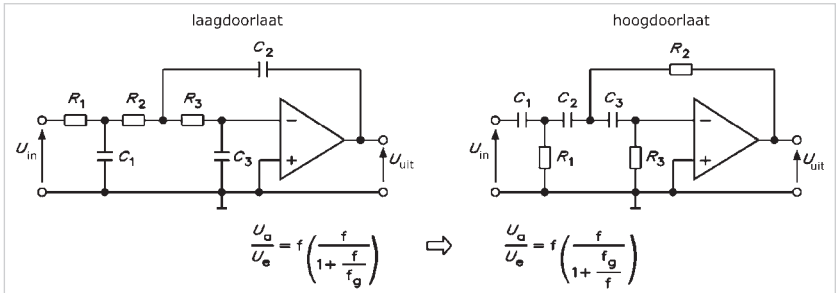
Figuur 7.45

$$\frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \Rightarrow \frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}}$$

$$\frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_g}} \Rightarrow \frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{\omega_g}{j\omega}}$$

$$\left| \frac{U_{uit}}{U_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2}} \Rightarrow \left| \frac{U_{uit}}{U_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_g}{\omega} \right)^2}}$$

Laagdoorlaat	Hoogdoorlaat
$j\omega$	$1/j\omega$
V_0	V_∞
$R^* = 1/C^*$	$C^* = 1/R^*$
$C^* = 1/R^*$	$R^* = 1/C^*$
Genormeerde weerstand: $R^* = R/R_{ref}$; R_{ref} = referentieweerstand.	
Genormeerde capaciteit: $C^* = \omega_{ref} \cdot R_{ref} \cdot C_{ref}$; $\omega_{ref} = 2 \cdot \pi \cdot f_{ref}$ (referentiefrequentie).	
De filtercoëfficiënten a en b van het hoogdoorlaatfilter zijn gelijk aan die van het laagdoorlaatfilter.	



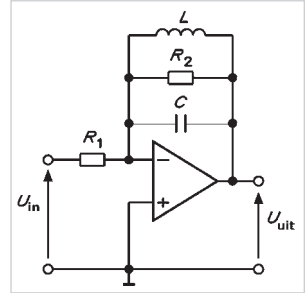
Figuur 7.46

7.5.8 Selectief 2^e-orde banddoorlaatfilter

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}}; \quad Q = R_{\text{res}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$\Delta f = B = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{res}} \cdot C}$$

f_{res} resonantiefrequentie
 Q kwaliteitsfactor
 Δf bandbreedte



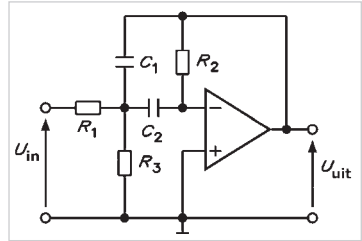
Figuur 7.47

 7.5.9 Selectief 2^e-orde bandsperfilter

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_3}}}$$

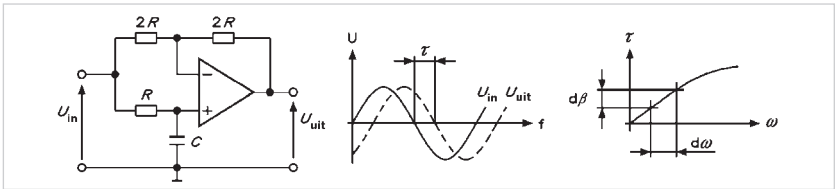
$$v_m = -\frac{R_1}{2 \cdot R_2}; \quad Q = \pi \cdot f_m \cdot R_1 \cdot C$$

$$\Delta f = B = \frac{1}{\pi \cdot R_1 \cdot C}$$



Figuur 7.48

7.5.10 All-pass-filter



Figuur 7.49

$$\beta = -2 \cdot \arctan(2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C)$$

$$\tau = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{2 \cdot R \cdot C}{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2} = \frac{2 / \omega_g}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \quad \text{met } \omega_g = \frac{1}{R \cdot C}$$

β faseverschuiving
 τ groeplooptijd

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 10 \text{ nF}$;
 $f_g = 100 \text{ Hz}$; $\tau = ?$; $\beta = ?$

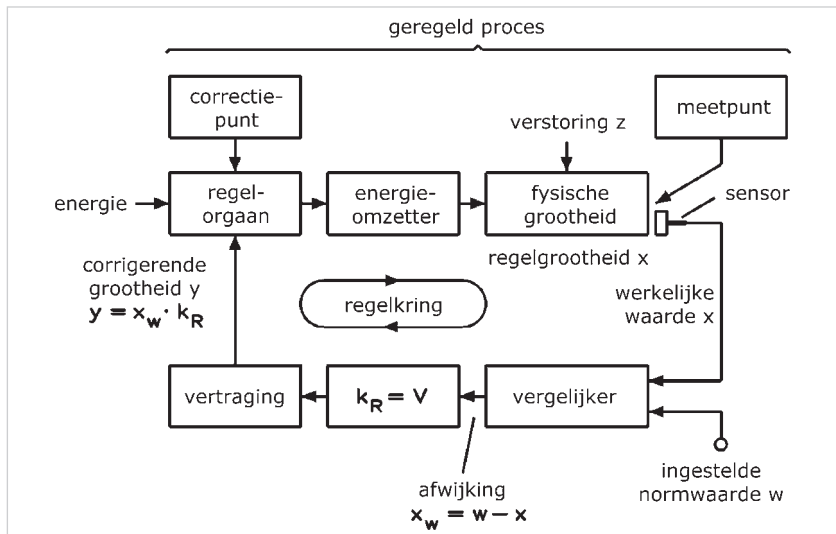
$$\tau = \frac{2 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ nF}}{1 + (2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ nF})^2} = 0,2 \text{ ms}$$

$$\beta = -2 \cdot \arctan(2 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ nF}) = -7,2^\circ$$

7.6 Regeltechniek

- ➡ De te regelen grootheid wordt continu gemeten.
- ➡ De te regelen grootheid wordt met de normwaarde (referentie) vergeleken.
- ➡ De te regelen grootheid wordt bijgesteld door aanpassing van de normwaarde.

7.6.1 Regelkring



Figuur 7.50

Een regelkring maakt deel uit van een gesloten systeem (het geregelde proces of regelsysteem) en wordt gekenmerkt door een regelgrootte x en een normwaarde w .

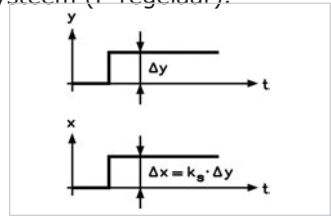
De regelgrootte x is de werkelijke waarde die door de regeling constant gehouden moet worden of volgens een vooringesteld schema beïnvloed moet worden. De normwaarde w wordt extern toegevoerd; de regeling heeft geen invloed op deze waarde – de regelgrootte volgt de normwaarde op de vooringestelde wijze. De regelaar is de elektronische schakeling die via het regelorgaan (actuator) op het te regelen proces inwerkt. De werkelijke waarde van de regelgrootte wordt door de sensor gemeten. De afwijking is het verschil tussen werkelijke waarde en normwaarde. Het correctiebereik is het bereik waarbinnen de corrigerende grootte ingesteld kan worden. De verstoring werkt van buitenaf op het te regelen proces in en beïnvloedt in meer of mindere mate de regelgrootte.

7.6.2 Regelsystemen

Stapresponsie van een proportioneel regelsysteem (P-regelaar). Het regelsysteem volgt de corrigerende grootte onmiddellijk (figuur 7.51).

$$\Delta x = k_S \cdot \Delta y$$

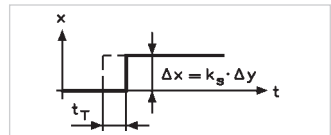
De factor k_S is de overdrachtscoëfficiënt.



Figuur 7.51

Stapresponsie van een proportioneel regelsysteem met een dode tijd t_T . De regelgrootte volgt de corrigerende grootte pas na enige tijd (figuur 7.52).

$$\Delta x = k_S \cdot \Delta y$$

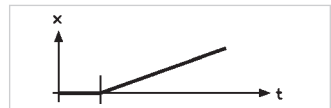


Figuur 7.52

Stapresponsie van een 1^e-orde regelsysteem zonder stationaire eindwaarde (figuur 7.53)

$$\Delta x = k_I \cdot \Delta y \cdot t$$

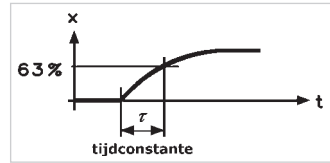
De factor k_I is de overdrachtscoëfficiënt als het verloop van Δy constant is.



Figuur 7.53

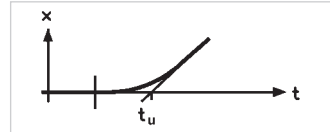
Stapresponsie van een 1^e-orde regelsysteem met stationaire eindwaarde en vertraging (figuur 7.54).

$$\Delta x = k_S \cdot \Delta y \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$



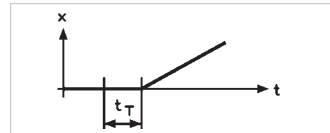
Figuur 7.54

Stapresponsie van een 1^e-orde regelsysteem zonder stationaire eindwaarde maar met vertragingstijd t_u (figuur 7.55).



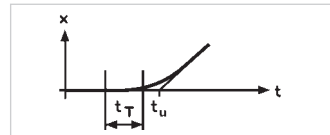
Figuur 7.55

Stapresponsie van een 1^e-orde regelsysteem zonder stationaire eindwaarde maar met dode tijd t_T (figuur 7.56).



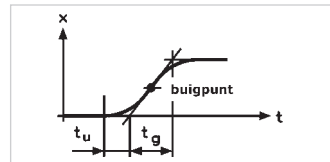
Figuur 7.56

Stapresponsie van een 1^e-orde regelsysteem zonder stationaire eindwaarde maar met dode tijd t_T en vertragingstijd t_u (figuur 7.57).



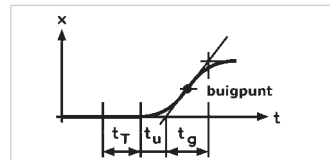
Figuur 7.57

Stapresponsie van een hogere-orde regelsysteem met vertragingstijd t_u en inregeltijd t_g (figuur 7.58).



Figuur 7.58

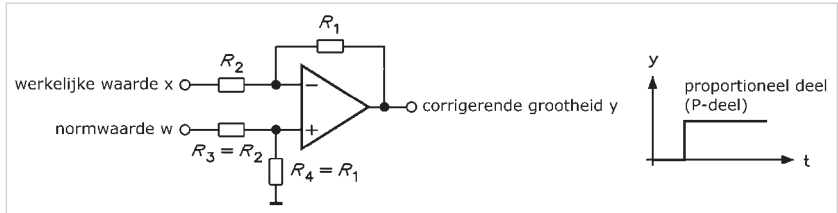
Stapresponsie van een hogere-orde regelsysteem met dode tijd t_T , vertragingstijd t_u en inregeltijd t_g (figuur 7.59).



Figuur 7.59

7.6.3 Proportionele regelaar (P-regelaar)

Bij een P-regelaar werkt de corrigerende grootheid een stapvormige verstoring ogenblikkelijk (en eveneens stapvormig) tegen. De P-regelaar werkt als aftrekschakeling resp. Verschilversterker bij het vergelijken van de werkelijke waarde en de gewenste waarde.



Figuur 7.60

$$y = \frac{R_1}{R_2} \cdot (w - x)$$

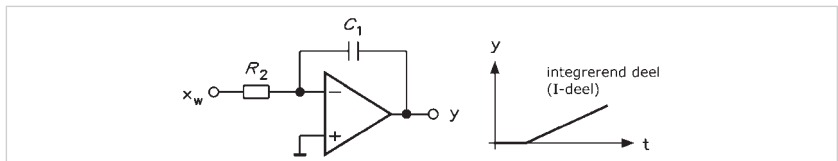
Wanneer de regelgrootheid x verandert met een verschil x_d , dan past de regelaar de corrigerende grootheid ogenblikkelijk aan met een evenredige waarde:

$$y - y_0 = k_P \cdot x_d$$

$$(y_0 \quad \text{beginconditie})$$

7.6.4 Integreerende regelaar (I-regelaar)

Bij een I-regelaar werkt de corrigerende grootheid een stapvormige verstoring evenredig met de tijd tegen.



Figuur 7.61

$$-y = \frac{1}{R_2 \cdot C_1} \int_0^t x_w \cdot dt$$

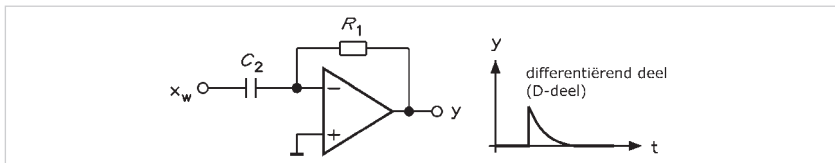
De veranderingssnelheid van de corrigerende grootheid $\Delta y/\Delta t$ is evenredig met het regelverschil x_d . De verandering van de corrigerende grootheid is gelijk aan de integraal over de tijd van x_d :

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = k_I \cdot x_d; \quad y - y_0 = k_I \cdot \int x_d \cdot dt$$

(y_0 = beginconditie)

7.6.5 Differentiërende regelaar (D-regelaar)

Bij een D-regelaar werkt de corrigerende grootheid een stapvormige verstoring onmiddellijk stapvormig tegen, om vervolgens weer naar nul af te nemen.



Figuur 7.62

$$-y = R_1 \cdot C_2 \cdot \frac{dx_w}{dt}$$

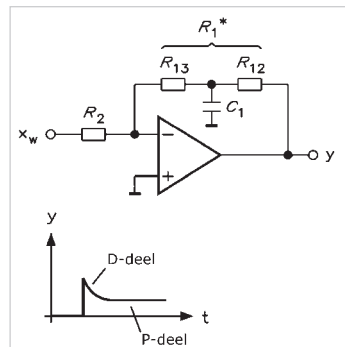
7.6.6 Proportionele differentiërende regelaar (PD-regelaar)

Bij een PD-regelaar werkt de corrigerende grootheid een stapvormige verstoring onmiddellijk tegen met het D-gedeelte van de responsie, om zich vervolgens op een stationaire eindwaarde in te regelen (P-deel).

$$k_P = \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \quad k_D = k_P \cdot T_D$$

$$T_D = C_1 \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

k_P evenredigheidscoëfficiënt
 k_D differentiatiecoëfficiënt
 T_D differentiatietijd



Figuur 7.63

Bij het P-deel van de corrigerende grootheid wordt nog een deel opgeteld dat correspondeert met de veranderingssnelheid dx_d/dt van de regelgrootheid. De differentiatietijd T_D is de tijd die een P-regelaar nodig zou hebben om dezelfde verandering van de corrigerende grootheid te bewerkstelligen die een PD-regelaar meteen bewerkstelligt.

$$y - y_0 = k_P \cdot x_d + k_D \cdot \left(\frac{\Delta x_d}{\Delta t} \right)$$

y_0 beginconditie

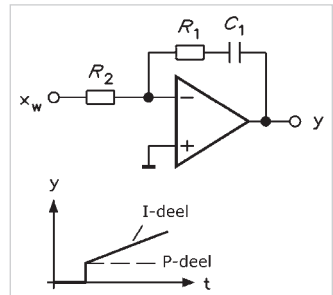
7.6.7 Proportionele integrerende regelaar (PI-regelaar)

Bij een PI-regelaar werkt de corrigerende grootheid een stapvormige verstoring onmiddellijk stapvormig tegen met het P-deel van de responsie; deze gaat vervolgens over in het I-gedeelte van de responsie.

$$T_I = R_1 \cdot C_1 = \frac{k_P}{k_I}; \quad k_P = \frac{R_1}{R_2}$$

$$k_I = \frac{1}{R_2 \cdot C_1} = \frac{k_P}{T_I}$$

T_I integratietijd
 k_P evenredigheidscoëfficiënt
 k_I integratiecoëfficiënt



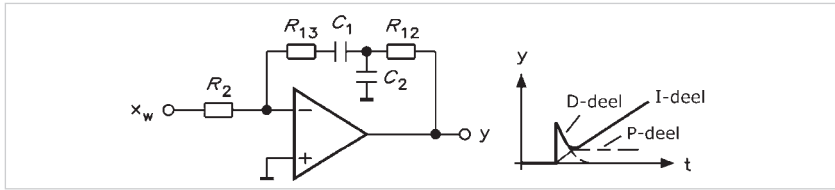
Figuur 7.64

Een verandering van de regelgrootheid heeft een evenredige (proportionele) verandering van de corrigerende grootheid tot gevolg; daar sluit een verandering van de corrigerende grootheid op aan die evenredig is met de veranderingssnelheid van de regelgrootheid.

$$y - y_0 = x_d \cdot (k_P + k_I \cdot t) \quad (y_0 = \text{beginconditie})$$

7.6.8 Proportionele integrerende differentiërende regelaar (PID-regelaar)

Bij de PID-regelaar werkt de corrigerende grootheid een stapvormige verstoring direct stapvormig tegen (D- deel); vervolgens valt deze terug naar de waarde van het P-deel en gaat dan over in het I-deel.



Figuur 7.65

$$k_p = \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \quad T_D = C_1 \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad T_I = R_1 \cdot R_2$$

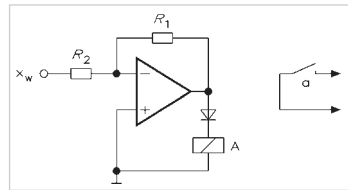
De verandering van de corrigerende grootheid bestaat uit de combinatie van P-, I- en D-deel.

$$y - y_0 = k_p \cdot x_d + \frac{k_p}{T_I} \cdot x_d \cdot \Delta t + T_D \cdot \left(\frac{\Delta x_d}{\Delta t} \right)$$

y_0 beginconditie

7.6.9 Tweepuntsregelaar

Bij een tweepuntsregelaar kan de corrigerende grootheid twee toestanden aannemen: aan en uit. Vanwege het niet-continue gedrag is deze regelaar uitsluitend geschikt voor regelsystemen waar de verandering van de regelgrootheid met vertraging plaatsvindt.

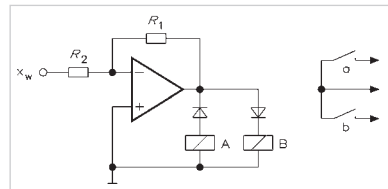


Figuur 7.66

$$x_w = \frac{R_1}{R_2}$$

7.6.10 Driepuntsregelaar

Bij een driepuntsregelaar kan de corrigerende grootheid drie toestanden aannemen: toestand I, uit en toestand II. Deze regelaar is geschikt voor systemen waar de verandering van de regelgrootheid vertraagd plaatsvindt.



Figuur 7.67

$$x_w = \frac{R_1}{R_2}$$

8 Vermogenselektronica

8.1 Vierlagendiode

8.1.1 Zaagtandgenerator met vierlagendiode

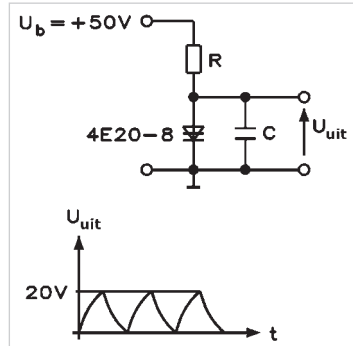
$$t = R \cdot C \cdot \ln \frac{U_b}{U_b - U_S}$$

U_S schakelspanning

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$;
 $U_S = 20 \text{ V}$; $U_b = 50 \text{ V}$;
 $t = ?$; $f = ?$

$$t = 10 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F} \cdot \ln \frac{50 \text{ V}}{50 \text{ V} - 20 \text{ V}} = 5,1 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{5,1 \text{ ms}} = 195 \text{ Hz}$$



Figuur 8.1

8.1.2 Zaagtandgeneratoren met UJT en FET

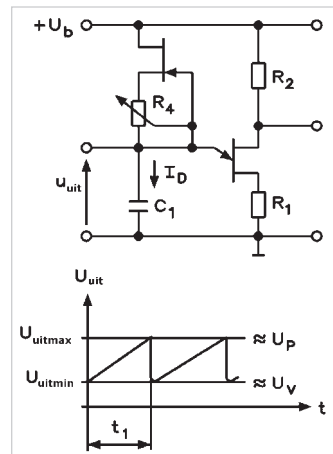
$$-U_{GS} = I_D \cdot R_S; \quad I_L = I_D = \frac{-U_{GS}}{R_S}$$

$$r_i = \frac{1}{Y_{22}} \cdot (1 + S \cdot R_S)$$

Voorbeeld: BF245B; $S = 2 \text{ mS}$;
 $Y_{22} = 25 \mu\text{S}$; $U_b = 40 \text{ V}$;
 $U_{GS} = -0,1 \text{ V}$; $I_D = 1 \text{ mA}$;
 $r_i = ?$

$$R_S = \frac{-U_{GS}}{I_D} = \frac{0,1 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 100 \Omega$$

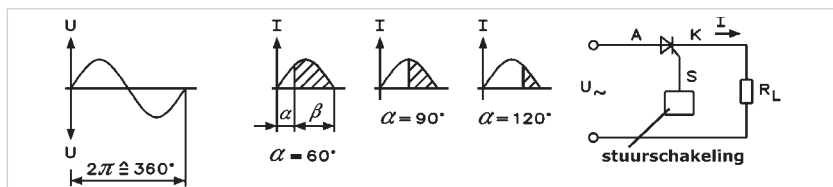
$$r_i = \frac{1}{25 \mu\text{S}} \cdot (1 + 3 \text{ mS} \cdot 100 \Omega) = 52 \text{ k}\Omega$$



Figuur 8.2

8.2 Thyristor en triac

8.2.1 Fase-aansnijding met thyristor



Figuur 8.3

$$I_{\text{gem}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_a^{\pi} \sin x \, dx = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{\alpha}{4 \cdot \pi} + \frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot \sin 2\alpha}; \quad K = \frac{I_{\text{eff}}}{I_M}$$

I_{gem} gemiddelde waarde (rekenkundig) van de stroom

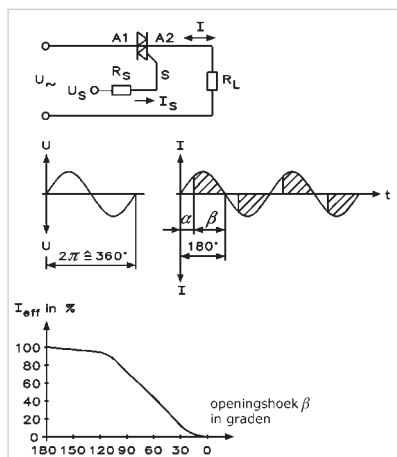
I_{eff} effectieve waarde van de stroom

K vormfactor

8.2.2 Fase-aansnijding met triac

Openingshoek in °	Effectieve waarde in %
180	100
120	89,6
90	70,7
60	44,6
30	17
0	0

β openingshoek in °
 I_{eff} effectieve waarde in %



Figuur 8.4

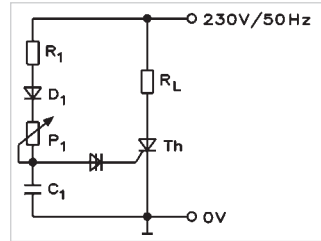
8.2.3 Thyristor plus diac

$$t_o = R \cdot C \cdot \ln \frac{U_b}{U_b - U_{BR}}$$

U_{BR} doorslagspanning van de diac

Voorbeeld: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$;
 $U_{BR} = 3 \text{ V}$; $U_b = 12 \text{ V}$;
 $t_o = ?$

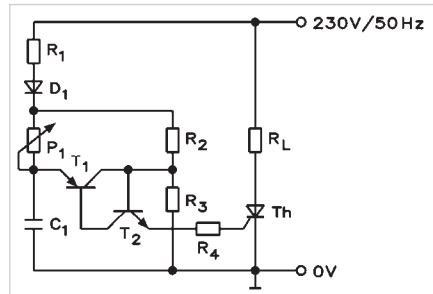
$$t_o = 10 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F} \cdot \ln \frac{12 \text{ V}}{12 \text{ V} - 3 \text{ V}} = 2,88 \text{ ms}$$



Figuur 8.5

8.2.4 Thyristor plus complementaire transistoren

$$\eta = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$



Figuur 8.6

8.2.5 Thyristor plus gelijkstroomontsteking

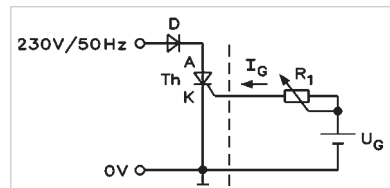
$$I_G = \frac{U_G}{R_1}$$

voor $U_{AK} = 10 \text{ V}$ is $I_G = 2 \text{ mA}$

voor $U_{AK} = 1 \text{ V}$ is $I_G = 5 \text{ mA}$

Voorbeeld: $U_G = 5 \text{ V}$; $I_G = 3 \text{ mA}$;
 $R_1 = ?$

$$R_1 = \frac{5 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 1,67 \text{ k}\Omega$$



Figuur 8.7

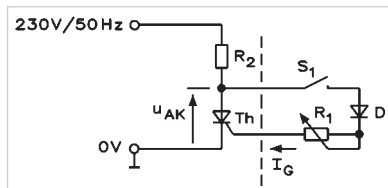
8.2.6 Thyristor plus wisselstroomontsteking

Niet ontstoken:

$$U_K = U_{AK}$$

Ontstoken:

$$I_G = \frac{U_{AK}}{R_1}$$



Figuur 8.8

Voorbeeld: $u_K = 10 \text{ V}$; $I_G = 2 \text{ mA}$; $R_1 = ?$

$$R_1 = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega$$

8.2.7 Rate-effect

Het *rate-effect* is het verschijnsel dat een thyristor of triac wordt ontstoken ten gevolge van een te grote stijgsnelheid van de anodespanning u_{AK} resp. U_{A2A1} . De kritische spanningssteilheid die voor het rate-effect verantwoordelijk is, wordt in de databladen meestal aangegeven als " du/dt " in $\text{V}/\mu\text{s}$.

De steilste spanningstoename van een sinusvormige wisselspanning doet zich voor tijdens de nuldoorgang en bedraagt:

$$\frac{du}{dt} = 6 \cdot U_{\max} \cdot f$$

Bij een wisselspanning van $400 \text{ V}_{\text{eff}}$ bedraagt de grootste steilheid zo:

$$\frac{du}{dt} = 6 \cdot 400 \text{ V} \cdot 1,414 \cdot 50 \text{ Hz} = 0,17 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Een thyristor of triac die de lichtnet-wisselspanning moet schakelen, moet dus tenminste deze kritische spanningssteilheid hebben. Wanneer een thyristor echter bijvoorbeeld wordt ingezet om een sinusvormige wisselspanning van 1 kV bij 1 kHz te schakelen, dan bedraagt de minimumwaarde voor du/dt :

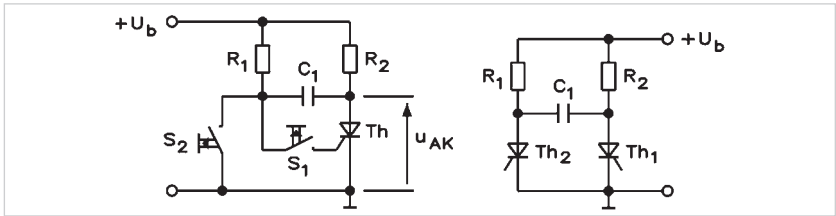
$$\frac{du}{dt} = 6 \cdot 1000 \text{ V} \cdot 1,414 \cdot 1 \text{ kHz} = 8,5 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Voor gangbare thyristoren en triacs bedraagt de spanningssteilheid:

$$\frac{du}{dt} = 5 \dots 2000 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Bij het dimensioneren van vermogensschakelingen met thyristoren of triacs moet men er beslist op letten dat bij de gekozen typen de maximale werkspanning alsmede de kritische spanningssteilheid groot genoeg zijn om ontsteking ten gevolge van doorslag (*breakover*) of het rate-effect te voorkomen.

8.2.8 Ontsteken en doven met gelijkstroom



Figuur 8.9

$$C_1 > \frac{I_L \cdot t_q}{U_b}$$

I_L belastingsstroom
 t_q hersteltijd

8.2.9 Thyristor met snubber-netwerk

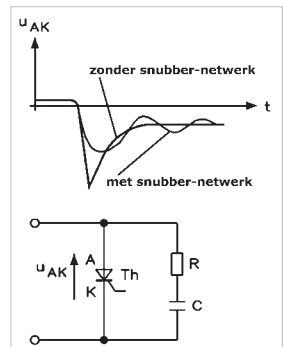
$$U_{AK} \approx -\frac{U}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

$$f \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}; \quad U_{AK\max} \approx -I_L \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

L zelfinductie van de belasting

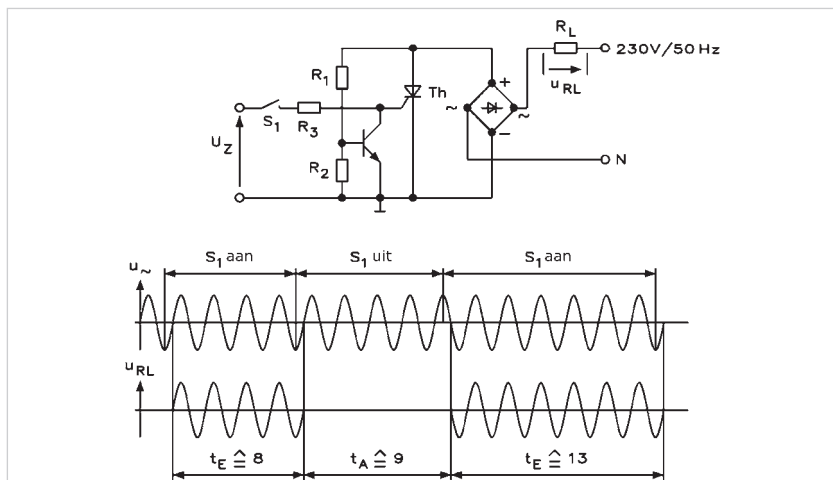
Voorbeeld: $U = 230 \text{ V}/50 \text{ Hz}$

$R = 27 \Omega/1 \text{ W}$ en $C = 0,1 \mu\text{F}/400 \text{ V}$



Figuur 8.10

8.2.10 Periodesturing (burst)



Figuur 8.11

$$P_{\text{eff}} = P \cdot \frac{t_{\text{aan}}}{t_{\text{aan}} + t_{\text{uit}}}$$

Voorbeeld: $P = 1 \text{ kW}$;
 $t_{\text{aan}} = 1 \text{ s}$;
 $t_{\text{uit}} = 0,5 \text{ s}$;
 $P_{\text{eff}} = ?$

$$P_{\text{eff}} = 1 \text{ kW} \cdot \frac{1 \text{ s}}{1 \text{ s} + 0,5 \text{ s}} = 666 \text{ W}$$

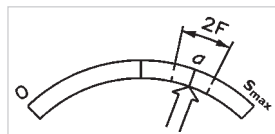
9 Meettechniek

9.1 Nauwkeurigheid van meetinstrumenten

$$F = \pm \frac{K \cdot S_{\max}}{100}$$

$$p = \pm \frac{F \cdot 100}{a} = \pm \frac{K \cdot S_{\max}}{a} \quad [\%]$$

$S_{\max}$ volle-schaal-waarde
 a afgelezen (aangewezen) waarde
 F fout, afwijking
 K nauwkeurigheidsklasse
 p fout in % van a



Figuur 9.1

Nauwkeurigheidsklassen (in % van de volle-schaal-waarde $S_{\max}$):

0,1; 0,2; 0,5 precisie- of laboratoriuminstrumenten
 1,0; 1,5 industriële instrumenten
 2,5; 5 hobby-instrumenten

Voorbeeld: $K = 1,5$; $S_{\max} = 500 \text{ mA}$; $a = 80 \text{ mA}$; $F = ?$

$$F = \pm \frac{1,5 \cdot 500 \text{ mA}}{100} = \pm 7,5 \text{ mA}; \quad p = \pm \frac{7,5 \text{ mA} \cdot 100}{80 \text{ mA}} = \pm 9,4\%$$

Foutcorrectie

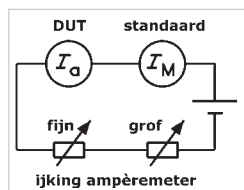
$$C = -F; \quad M = a + C$$

C correctie
 M gecorrigeerde meetwaarde

Voorbeeld: $a = 35 \text{ mV}$; $F = -1,8 \text{ mV}$;
 $C = ?$; $M = ?$

$$C = -F = -(-1,8 \text{ mV}) = 1,8 \text{ mV}$$

$$M = 35 \text{ mV} + 1,8 \text{ mV} = 36,8 \text{ mV}$$



Figuur 9.2*

* DUT = Device Under Test = (hier) te ijken meetinstrument.

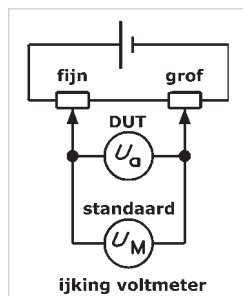
Justering (ijking)

$$F = a - M; \quad C = M - a$$

Voorbeeld: $a = 4,82 \text{ mA}$; $M = 5 \text{ mA}$; $F = ?$; $C = ?$

$$F = 4,82 \text{ mA} - 5 \text{ mA} = -0,18 \text{ mA}$$

$$C = 5 \text{ mA} - 4,82 \text{ mA} = 0,18 \text{ mA}$$

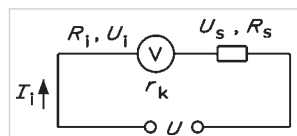


Figuur 9.3*

9.1.1 Uitbreiding van het meetbereik (spanning)

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = r_k \cdot U_i; \quad r_k = \frac{1}{I_i}$$

$$R_{\text{tot}} = r_k \cdot U = \frac{U}{I_i} = R_i + R_s; \quad n = \frac{U}{U_i}$$



Figuur 9.4

$$U = U_i + U_s; \quad R_s = r_k \cdot U_s = \frac{U}{I_i}; \quad R_s = R_{\text{tot}} - R_i = R_i \cdot (n - 1)$$

R_i inwendige weerstand van het meetinstrument

U_i volle-schaal-spanning

I_i volle-schaal-stroom

r_k gevoeligheid van het instrument in Ω/V

R_s serieweerstand (voorschakelweerstand)

U totale spanning (= gewenst meetbereik)

R_{tot} totale weerstand

n vermenigvuldigingsfactor

Voorbeeld: $U_i = 80 \text{ mV}$; $I_i = 2 \text{ mA}$; $U = 3 \text{ V}$;

$R_i = ?$; $R_{\text{tot}} = ?$; $R_s = ?$; $r_k = ?$

$$R_i = \frac{80 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 40 \Omega; \quad R_{\text{tot}} = \frac{3 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_s = 1,5 \text{ k}\Omega - 40 \Omega = 1460 \Omega; \quad r_k = \frac{1}{2 \text{ mA}} = 500 \frac{\Omega}{\text{V}}$$

9.1.2 Uitbreiding van het meetbereik (stroom)

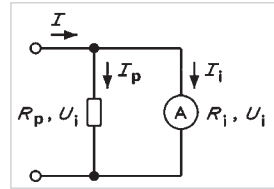
$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = r_k \cdot U_i; \quad r_k = \frac{1}{I_i}$$

$$R_{\text{tot}} = \frac{R_i \cdot R_p}{R_i + R_p} = \frac{U_i}{I}$$

$$I = I_i + I_p; \quad n = \frac{U}{U_i}$$

$$R_p = \frac{U_i}{I_p} = \frac{U_i}{I - I_i} = \frac{R_i \cdot R_{\text{tot}}}{R_i - R_{\text{tot}}} = \frac{R_i}{n - 1}$$

R_p	parallelweerstand (shuntweerstand)
I_p	stroom door parallelweerstand
I	totale stroom (= gewenst meetbereik)
R_{tot}	totale weerstand
n	vermenigvuldigingsfactor



Figuur 9.6

Voorbeeld: $U_i = 60 \text{ mV}$; $I_i = 1 \text{ mA}$; $I = 500 \text{ mA}$; $I_p = ?$; $R_p = ?$

$$I_p = 500 \text{ mA} - 1 \text{ mA} = 499 \text{ mA}; \quad R_p = \frac{60 \text{ mV}}{499 \text{ mA}} = 0,12 \Omega$$

9.1.3 Karakteristieken van golfvormen

De momentane waarde is de waarde van een golfvorm (periodiek variërende grootheid) op een bepaald tijdstip:

u	momentane waarde van de spanning
i	momentane waarde van de stroom

De top- of piekwaarde is de grootste waarde die de momentane waarde van een golfvorm kan aannemen:

$\hat{u}, u_{\text{max}}$	topwaarde van de spanning
$\hat{i}, i_{\text{max}}$	topwaarde van de stroom

De effectieve waarde van een periodiek signaal is gelijk aan de wortel uit het kwadratisch gemiddelde over één periode:

U, U_{eff} gemiddelde waarde van de spanning

I, I_{eff} gemiddelde waarde van de stroom

De gelijkrichtwaarde is het rekenkundig gemiddelde van de absolute waarde van een periodieke golfvorm over één periode:

$|\bar{u}|$ gelijkrichtwaarde van de spanning

$|\bar{i}|$ gelijkrichtwaarde van de stroom

De piekfactor (*crest factor*) van een periodieke golfvorm is de verhouding van topwaarde (piekwaarde) en effectieve waarde:

$$cf = \frac{\hat{u}}{U} = \frac{\hat{i}}{I}$$

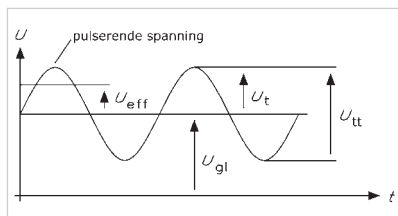
De vormfactor van een periodieke golfvorm is de verhouding van effectieve waarde en gelijkrichtwaarde:

$$F = \frac{U}{|\bar{u}|} = \frac{I}{|\bar{i}|} \quad (F \geq 1)$$

golfvorm	topwaarde $\hat{u}$	gelijkrichtwaarde $ \bar{u} $	eff. waarde U	piekfactor cf	vormfactor F
piek- en vormfactor	$\hat{u} = cf \cdot U$ $\hat{u} = cf \cdot F \cdot \bar{u} $	$ \bar{u} = U / F$ $ \bar{u} = \frac{\hat{u}}{cf \cdot F}$	$U = \hat{u} / cf$ $U = \bar{u} \cdot F$	$cf = \frac{\text{topwaarde}}{\text{eff. waarde}}$ $cf = \frac{\hat{u}}{U}$	$F = \frac{\text{eff. waarde}}{\text{gelijkv. waarde}}$ $F = \frac{U}{ \bar{u} }$
sinus 	$\hat{u} = \frac{\pi}{2} \cdot \bar{u} $ $\hat{u} = 1,571 \cdot \bar{u} $ $\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U$ $\hat{u} = 1,414 \cdot U$	$ \bar{u} = \frac{2 \cdot \hat{u}}{\pi}$ $ \bar{u} = 0,637 \cdot \hat{u}$ $ \bar{u} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U$ $ \bar{u} = 0,9 \cdot U$	$U = \hat{u} / \sqrt{2}$ $U = 0,707 \cdot \hat{u}$ $U = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \bar{u} $ $U = 1,111 \cdot \bar{u} $	$cf = \sqrt{2} = 1,414$ $\frac{1}{cf} = 0,707$ $cf \cdot F = \frac{\pi}{2} = 1,571$	$F = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,111$ $\frac{1}{F} = 0,900$
blok 	$\hat{u} = \bar{u} $ $\hat{u} = U$	$ \bar{u} = \hat{u}$ $ \bar{u} = U$	$U = \hat{u}$ $U = \bar{u} $	$cf = 1,000$ $\frac{1}{cf} = 1,000$ $cf \cdot F = 1,000$	$F = 1,000$ $\frac{1}{F} = 1,000$
driehoek 	$\hat{u} = 2 \cdot \bar{u} $ $\hat{u} = \sqrt{3} \cdot U$ $\hat{u} = 1,732 \cdot U$	$ \bar{u} = 0,5 \cdot \hat{u}$ $ \bar{u} = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{2}$ $ \bar{u} = 0,866 \cdot U$	$U = \hat{u} / \sqrt{3}$ $U = 0,577 \cdot \hat{u}$ $U = \frac{2 \cdot \bar{u} }{\sqrt{3}}$ $U = 1,155 \cdot \bar{u} $	$cf = \sqrt{3} = 1,732$ $\frac{1}{cf} = 0,577$ $cf \cdot F = 2,000$	$F = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155$ $\frac{1}{F} = 0,866$

Figuur 9.6 Relatie tussen de karakteristieken van golfvormen.

Onderlinge afhankelijkheid van meetwaarden		
Golfvorm	Correctiefactor	Effectieve waarde ÷ topwaarde
sinus	1	0,707
blokgolf	1,41	1,0
driehoek	0,82	0,577
parabooltop	0,64	0,45
halve ellips	1,16	0,82
halve cirkel	1,16	0,82



Figuur 9.7

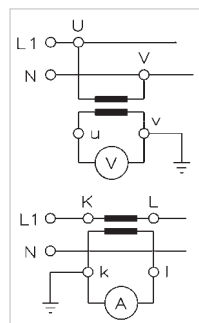
$$U_{\text{eff}} = \sqrt{U_{\text{gl}}^2 + \frac{U_{\text{t}}^2}{2}}$$

9.2 Spanning- en stroommeting met meetomzetters

$$k_U = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{N_1}{N_2}; \quad F_U = \frac{U_{2N} \cdot k_U - U_{1N}}{U_{1N}} \cdot 100\%$$

$$k_I = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{N_2}{N_1}; \quad F_I = \frac{I_{2N} \cdot k_I - I_{1N}}{I_{1N}}$$

k_U spannings-transformatieverhouding
 k_I stroom-transformatieverhouding
 F_U spanningstransformatiefout
 F_I stroomtransformatiefout



Figuur 9.8

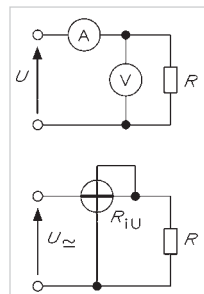
9.3 Vermogensmeting: schijnbaar en effectief vermogen

9.3.1 Stroomfoutmethode: $R_{iU} \gg R$

$$S = U \cdot I - \frac{U^2}{R_{iU}}; \quad P = U \cdot I - \frac{U^2}{R_{iU}}$$

S schijnbaar vermogen in VA
 R_{iU} inwendige weerstand voltmeter
 P_{meet} gemeten vermogen in W
 P effectief vermogen in W

$$\text{Correctieformule: } P = P_{\text{meet}} - \frac{U^2}{R_{iU}}$$



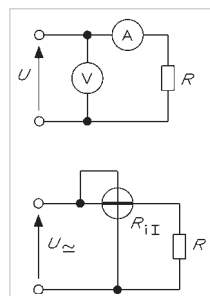
Figuur 9.9

9.3.2 Spanningsfoutmethode: $R_{iI} \ll R$

$$S = U \cdot I - I^2 \cdot R_{iI}; \quad P = U \cdot I - I^2 \cdot R_{iI}$$

S schijnbaar vermogen in VA
 R_{iI} inwendige weerstand ampèremeter
 P_{meet} gemeten vermogen in W
 P effectief vermogen in W

Correctieformule: $P = P_{\text{meet}} - I^2 \cdot R_{iI}$



Figuur 9.10

9.3.3 Vermogensmeting: blind vermogen

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; \quad Q = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Q blind vermogen in VAr

9.3.4 Weerstandsmeting

Stroom- en spanningsfoutmethode

In figuur 9.12a:

$$R_X = \frac{U - U_A}{I} = \frac{U - I \cdot R_A}{I}$$

De voltmeter geeft een te grote spanning aan;
het teveel is gelijk aan

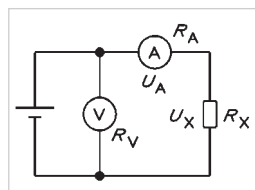
$$U_A = I \cdot R_A$$

In figuur 9.12b:

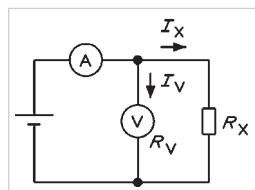
$$R_X = \frac{U}{I - I_V} = \frac{U}{I - U/R_V}$$

De ampèremeter geeft een te grote stroom aan;
het teveel is gelijk aan

$$I_V = \frac{U}{R_V}$$

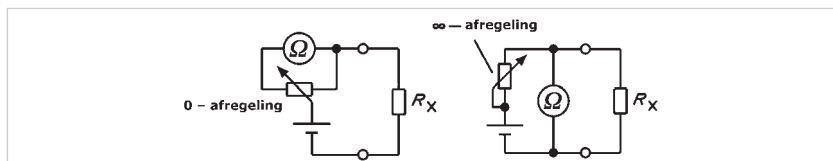


Figuur 9.11a



Figuur 9.11b

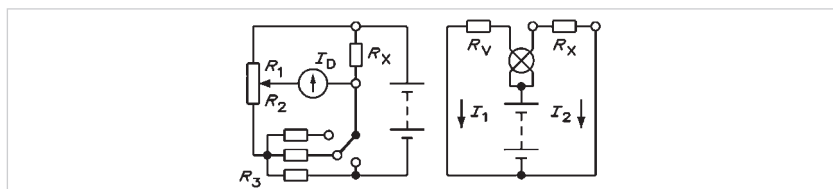
9.3.5 Weerstandsmeter met uitlezing in ohm



Figuur 9.12

Figuur 9.12, linker schema:
schakeling voor hoogohmige weerstanden.

Figuur 9.12, rechter schema:
schakeling voor laagohmige weerstanden.



Figuur 9.13

Figuur 9.13, linker schema:
ohmmeter volgens Wheatstone

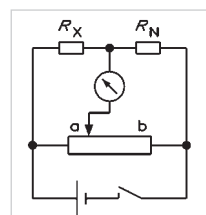
$$R_X = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

Figuur 9.13, rechter schema:
ohmmeter met kruisspoelmeter

9.3.6 Brugschakeling met sleepcontact

$$R_X = R_N \cdot \frac{a}{b}$$

R_X onbekende weerstand
 R_N vergelijkweerstand
 a, b deellengtes weerstandsdraad



Figuur 9.14

Voorbeeld: $a = 257 \text{ mm}$; $a + b = 1000 \text{ mm}$;
 $R_N = 1 \text{ k}\Omega$; $R_X = ?$

$$R_X = 1 \text{ k}\Omega \cdot \frac{257 \text{ mm}}{1000 \text{ mm} - 257 \text{ mm}} = 345,9 \Omega$$

9.3.7 Meten aan spanningsdelers

Onbelaste spanningsdeler:

$$U_1 = I \cdot R_1; \quad U_2 = I \cdot R_2$$

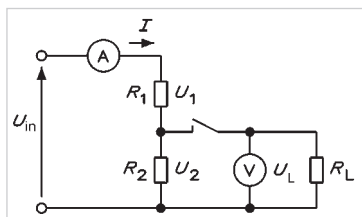
Belaste spanningsdeler:

$$U_1 = \frac{U_{\text{in}} \cdot R_1}{R_1 + (R_2 \parallel R_L)}$$

$$U_2 = U_L = \frac{U_{\text{in}} \cdot R_2 \parallel R_L}{R_1 + (R_2 \parallel R_L)}$$

Voorbeeld: $U_{\text{in}} = 12 \text{ V}$; $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_L = 1 \text{ k}\Omega$; $U_L = ?$

$$R_2 \parallel R_L = \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 500 \Omega; \quad U_L = 12 \text{ V} \cdot \frac{500 \Omega}{1 \text{ k}\Omega + 500 \Omega} = 4 \text{ V}$$



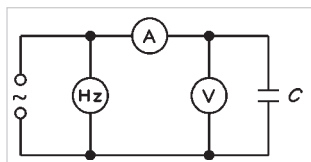
Figuur 9.15

9.4 Capaciteitsmeting

9.4.1 Meting van wisselspanning en -stroom

$$C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C}$$



Figuur 9.16

Voorbeeld: $U = 12 \text{ V}/50 \text{ Hz}$; $I = 30 \text{ mA}$; $C = ?$

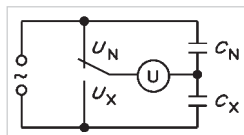
$$C = \frac{30 \text{ mA}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 12 \text{ V}} = 8 \mu\text{F}$$

9.4.2 Spanningsvergelijking

$$C_X = \frac{C_N \cdot U_N}{U_X}$$

Voorbeeld: $U_N = 28,6 \text{ V}$; $U_X = 15,8 \text{ V}$;
 $C_N = 0,5 \mu\text{F}$; $C_X = ?$

$$C_X = \frac{0,5 \mu\text{F} \cdot 28,6 \text{ V}}{15,8 \text{ V}} = 0,9 \mu\text{F}$$



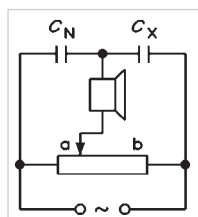
Figuur 9.17

9.4.3 Brugschakeling (signaalminimum)

$$C_X = \frac{C_N \cdot a}{b}$$

Voorbeeld: $C_N = 25 \text{ nF}$; $a = 45 \text{ mm}$; $b = 55 \text{ mm}$;
 $C_X = ?$

$$C_X = \frac{25 \text{ nF} \cdot 45 \text{ mm}}{55 \text{ mm}} = 20,45 \text{ nF}$$

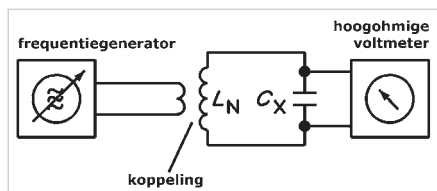


Figuur 9.18

9.4.4 Resonantiemethode

$$C_X = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L_N}$$

Voorbeeld: $L_N = 2 \text{ mH}$;
 $f = 184 \text{ kHz}$; $C_X = ?$



Figuur 9.19

$$C_X = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 184 \text{ kHz})^2 \cdot 2 \text{ mH}} = 374 \text{ pF}$$

9.5 Meting van zelfinducties

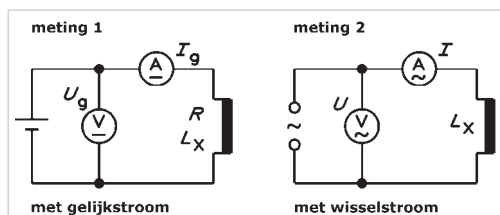
9.5.1 Meting van wisselspanning en -stroom

Effectieve weerstand:

$$R = \frac{U_-}{I_-}$$

Schijnbare weerstand:

$$Z = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}}$$



Figuur 9.20

Voorbeeld: $U_{\sim} = 10 \text{ V}/50 \text{ Hz}$; $I_{\sim} = 80 \text{ mA}$; $U_- = 10 \text{ V}$; $I_- = 250 \text{ mA}$; $L = ?$

$$R = \frac{10 \text{ V}}{250 \text{ mA}} = 40 \Omega; \quad Z = \frac{10 \text{ V}}{80 \text{ mA}} = 125 \Omega$$

$$X_L = \sqrt{(125 \Omega)^2 - (40 \Omega)^2} = 118,4 \Omega$$

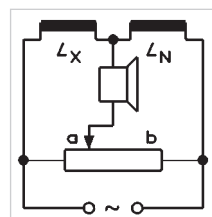
$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{118,4 \Omega}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz}} = 377 \text{ mH}$$

9.5.2 Brugschakeling (signaalminimum)

$$L_X = \frac{L_N \cdot a}{b}$$

Voorbeeld: $L_N = 50 \text{ mH}$; $a = 45 \text{ mm}$; $b = 55 \text{ mm}$;
 $L_X = ?$

$$L_X = \frac{50 \text{ mH} \cdot 45 \text{ mm}}{55 \text{ mm}} = 40,9 \text{ mH}$$

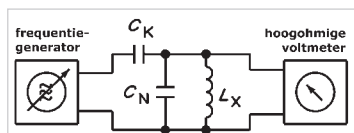


Figuur 9.21

9.5.3 Resonantiemethode

$$L_X = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot C_N}$$

Voorbeeld: $C_N = 5 \text{ nF}$;
 $f = 7,5 \text{ kHz}$; $L_X = ?$



Figuur 9.23

$$L_X = \frac{1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 7,5 \text{ kHz})^2 \cdot 5 \text{ nF}} = 90 \text{ mH}$$

9.6 Meting van het elektrische vermogen

Voor het elektrische vermogen gelden de volgende basisvergelijkingen:

$$P = U \cdot I; \quad P = I^2 \cdot R$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

De basisvergelijkingen kunnen als volgt worden herschreven:

$$I = \frac{P}{U} = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

$$U = \frac{P}{I} = \sqrt{P \cdot R}$$

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{U^2}{P}$$

Correcte-spanning-meting (figuur 9.25a):

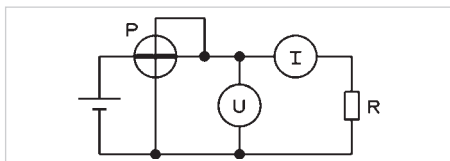
De voltmeter toont de correcte spanning $U_V (= U_{RL})$ over de verbruiker; de ampèremeter wijst daarentegen de som I_A aan van de stroom I_{RL} door de verbruiker en de stroom I_V door de voltmeter:

$$P_{in} = U_V \cdot (I_V + I_{RL}) \rightarrow P_{uit} = P_{in} - U_V \cdot I_V$$

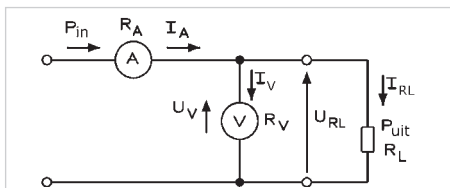
Correcte-stroom-meting (figuur 9.25b):

De ampèremeter toont de correcte stroom $I_A (= I_{RL})$ door de verbruiker; de voltmeter wijst daarentegen de som U_V aan van de spanningsval U_{RL} over de verbruiker en de spanningsval U_A over de ampèremeter:

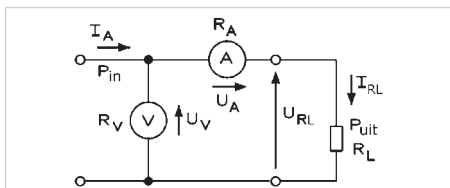
$$P_{in} = I_A \cdot (U_A + U_{RL}) \rightarrow P_{uit} = P_{in} - U_A \cdot I_A$$



Figuur 9.23



Figuur 9.24a: correcte spanning

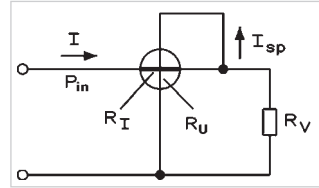


Figuur 9.24b: correcte stroom

$$\alpha = k \cdot I_F \cdot I_{sp} = k \cdot I_F \cdot \frac{U}{R_{sp}} =$$

$$= \frac{k}{R_{sp}} \cdot U \cdot I = K \cdot P$$

$$\alpha \propto P^*$$



Figuur 9.25

k, K karakteristieke constante van de elektrodynamische meter
 α wijzeruitslag

Correcte-spanning-meting (figuur 9.26a):

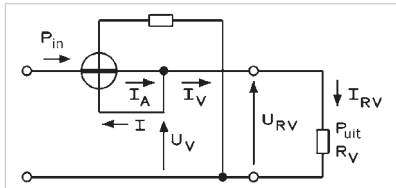
$$\alpha = k \cdot (P_{in} - P_I)$$

P_I 'eigenverbruik'

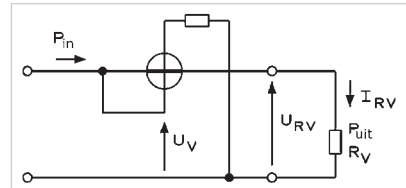
Correcte-stroom-meting (figuur 9.26b):

$$\alpha = k \cdot (P_{in} - P_U)$$

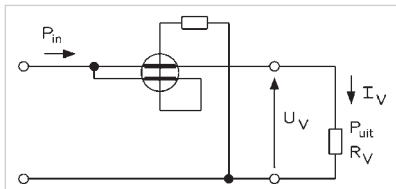
P_U 'eigenverbruik'



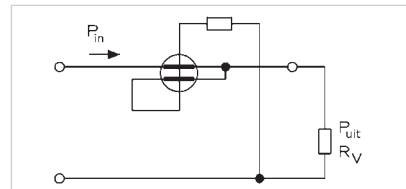
Figuur 9.26a: correcte spanning



Figuur 9.26b: correcte stroom



Figuur 9.27a: bronmeting



Figuur 9.27b: verbruikersmeting

* Het symbool $\propto$ betekent 'evenredig met'.

Door de bron geleverd vermogen (figuur 9.27a):

$$P_{\text{in}} = P_{\text{uit}} + P_U + P_I$$

$$\alpha = k \cdot (P_{\text{uit}} + P_I) + k \cdot P_U; \quad \alpha = k \cdot (P_{\text{uit}} + P_I + P_U)$$

Door de gebruiker opgenomen vermogen (figuur 9.27b):

$$P_{\text{in}} = P_{\text{uit}} + P_I - P_U$$

$$\alpha = k \cdot (P_{\text{in}} - P_I) - k \cdot P_U; \quad \alpha = k \cdot (P_{\text{in}} - P_I - P_U)$$

9.7 Meetbruggen voor wisselspanning

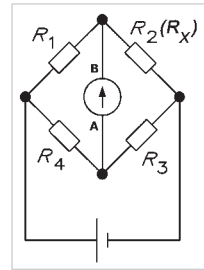
9.7.1 Brug van Wheatstone

Bij evenwicht ($U_{AB} = 0$, $I_{AB} = 0$) geldt:

$$R_X = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_4}$$

Voorbeeld: $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 750 \text{ }\Omega$; $R_X = ?$

$$R_X = \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega}{750 \text{ }\Omega} = 1,33 \text{ k}\Omega$$



Figuur 9.28

9.7.2 Brug van Thomson

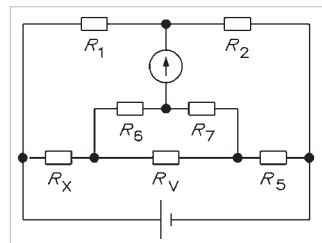
Als voldaan is aan de voorwaarde

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_6}{R_7}$$

en de brug in evenwicht is, dan geldt:

$$R_X = \frac{R_1 \cdot R_5}{R_2}$$

- R_X onbekende weerstand
- R_5 variabele weerstand
- R_V overgangswaarde, weerstand aansluitdraden
(mag bij deze opstelling worden verwaarloosd)



Figuur 9.30

Voorbeeld: $R_1 = R_2 = R_6 = R_7 = 100 \text{ }\Omega$; $R_5 = 10 \text{ }\Omega$; $R_X = ?$

$$R_X = \frac{100 \Omega \cdot 10 \Omega}{100 \Omega} = 10 \Omega$$

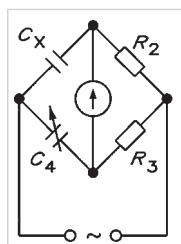
9.7.3 Eenvoudige capaciteitsmeetbrug

Bij evenwicht geldt:

$$C_X = \frac{R_3 \cdot C_4}{R_2}$$

Voorbeeld: $R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$; $C_4 = 100 \text{ nF}$; $C_X = ?$

$$C_X = \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF}}{1 \text{ k}\Omega} = 100 \text{ nF}$$



Figuur 9.31

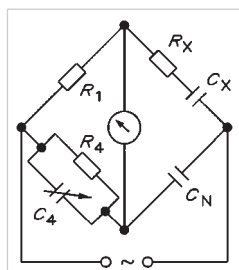
9.7.4 Capaciteitsmeetbrug van Schering

Bij evenwicht geldt:

$$R_X = R_1 \cdot \frac{C_4}{C_N}; \quad C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_1}$$

$$\tan \delta_X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_4 \cdot C_4$$

δ verlieshoek
 $\tan \delta$ verliesfactor



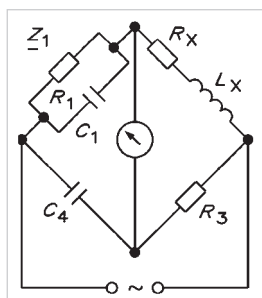
Figuur 9.32

9.7.5 Zelfinductiemetbrug van Maxwell

Bij evenwicht geldt:

$$R_X = \frac{R_3 \cdot C_4}{C_1} \cdot \left(1 - \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_1 \cdot C_1)^2} \right)$$

$$L_X = \frac{R_1 \cdot R_3 \cdot C_4}{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_1 \cdot C_1)^2}$$



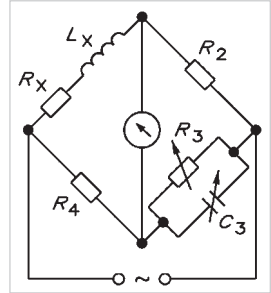
Figuur 9.33

9.7.6 Zelfinductiemeetbrug van Maxwell-Wien

Bij evenwicht geldt:

$$R_X = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3}$$

$$L_X = R_2 \cdot R_4 \cdot C_3$$



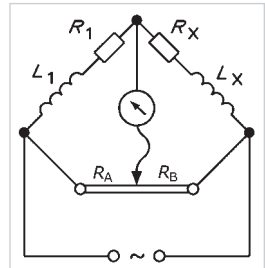
Figuur 9.34

9.7.7 Zelfinductiemeetbrug van Maxwell-Wien (frequentie-onafhankelijk)

Bij evenwicht geldt:

$$R_X = R_1 \cdot \frac{R_B}{R_A}$$

$$L_X = L_1 \cdot \frac{R_B}{R_A}$$



Figuur 9.35

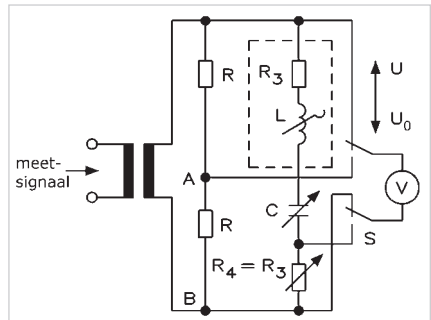
9.7.8 Meting van de vervormingsfactor (eenpoort-techniek)

Eerste meting:

schakelaar in stand 'U' levert de effectieve waarde van het totale signaal.

Tweede meting:

schakelaar in stand 'U₀' levert de effectieve waarde van alle boven-tonen (harmonischen) in het signaal.



Figuur 9.36

$$k = \sqrt{\frac{U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + \dots}{U_{1f}^2 + U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + \dots}}; \quad k = \sqrt{\frac{I_{2f}^2 + I_{3f}^2 + \dots}{I_{1f}^2 + I_{2f}^2 + I_{3f}^2 + \dots}}$$

Voor de vervormingsfactor k geldt:

$$k = \frac{2 \cdot U_0}{U}$$

9.8 Meten met de oscilloscoop

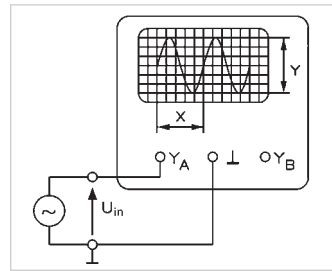
9.8.1 Spanningsmeting

$$U_{tt} = Y \cdot a$$

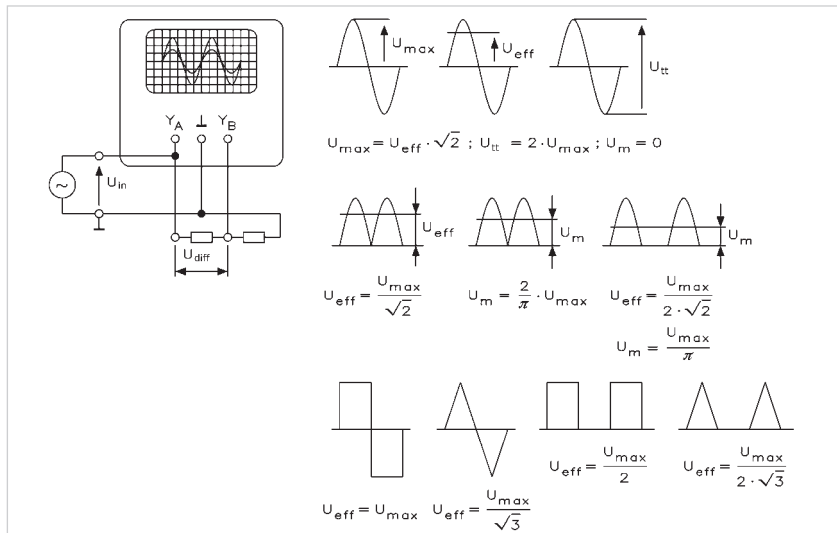
Y verticale afbuiging in div of cm
 a afbuigfactor in V/div of V/cm

Voorbeeld: $Y = 6 \text{ div}$; $a = 1 \text{ V/div}$; $U_{tt} = ?$

$$U_{tt} = 6 \text{ div} \cdot \frac{1 \text{ V}}{\text{div}} = 6 \text{ V}$$



Figuur 9.37



Figuur 9.38

9.8.2 Vergelijking van frequenties met de oscilloscoop

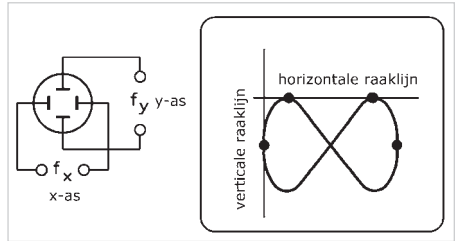
$$f_X = f_Y \cdot \frac{v}{h}$$

f_X frequentie op de X-platen

f_Y frequentie op de Y-platen

h aantal raakpunten aan de horizontale raaklijn

v aantal raakpunten aan de verticale raaklijn

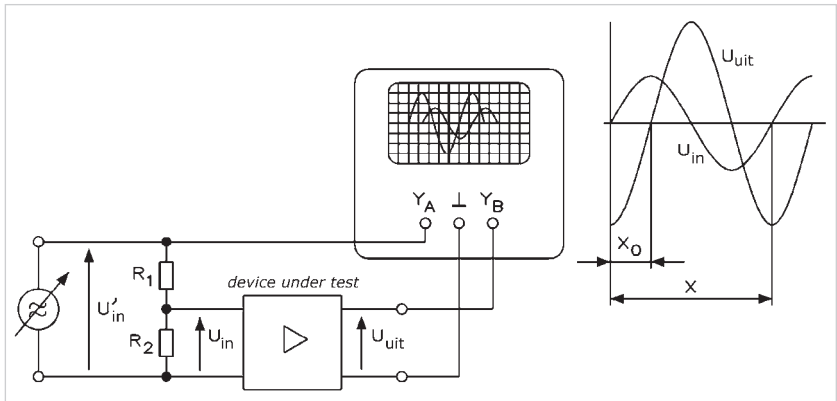


Figuur 9.39

9.8.3 Faseverschilmeting met de oscilloscoop

$$\varphi = \frac{X_0 \cdot 360^\circ}{X}$$

φ faseverschil (fasehoek) tussen U_{in} en U_{uit}

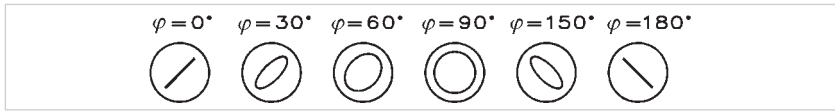


Figuur 9.40

Voorbeeld: $X = 6 \text{ div}$; $X_0 = 0,8 \text{ div}$; $\varphi = ?$

$$\varphi = \frac{0,8 \text{ div} \cdot 360^\circ}{6 \text{ div}} = 48^\circ$$

9.8.4 Faseverschilmeting met de oscilloscoop (Lissajous-figuur)



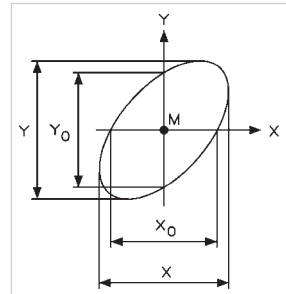
Figuur 9.41

$$\sin \varphi = \frac{X_0}{X} = \frac{Y_0}{Y}$$

φ faseverschil (fasehoek) tussen f_1 en f_2

Voorbeeld: $X_0 = 3 \text{ div}$; $X = 4 \text{ div}$; $\varphi = ?$

$$\sin \varphi = \frac{3 \text{ div}}{4 \text{ div}} = 0,75 \rightarrow \varphi = 48,6^\circ$$



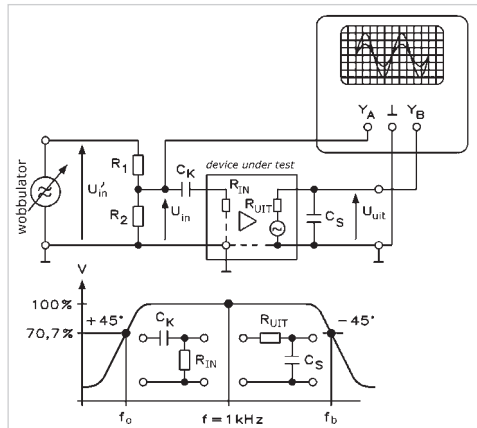
Figuur 9.42

9.8.5 Meting van de bandbreedte

$$\Delta f = f_b - f_o$$

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{IN} \cdot C_K}$$

$$f_b = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{UIT} \cdot C_S}$$



Figuur 9.45

Bij f_o geldt:

$$U_{uit} = U_{in} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot R_{IN} \cdot C_K} \right)^2}}$$

Voorbeeld: $U_{in} = 1 \text{ V}$; $R_{IN} = 3,3 \text{ k}\Omega$; $C_K = 1 \mu\text{F}$; $f_0 = ?$; $U_{uit} = ?$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,3 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F}} = 48 \text{ Hz}$$

$$U_{uit} = 1 \text{ V} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 48 \text{ Hz} \cdot 3,3 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F}} \right)^2}} = 0,7 \text{ V}$$

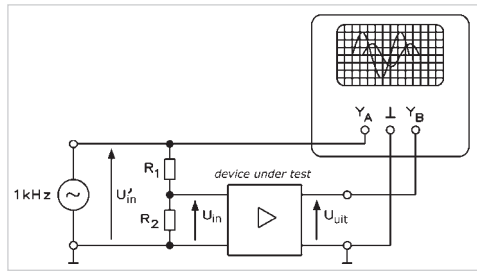
9.8.6 Meting van versterkingsfactoren

$$V = \frac{U_{uit}}{U_{in}}$$

Voorbeeld: $U_{in} = 100 \text{ mV}$;
 $U_{uit} = 2,5 \text{ V}$;
 $V = ?$

$$V = \frac{2,5 \text{ V}}{100 \text{ mV}} = 25$$

$$V_{dB} = 20 \cdot \log \frac{2,5 \text{ V}}{100 \text{ mV}} = 27,95 \text{ dB}$$

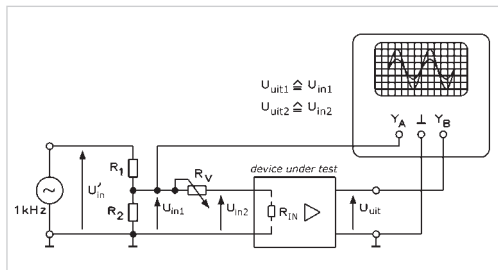


Figuur 9.44

9.8.7 Meting van de ingangsweerstand

$$R_{IN} = R_V \cdot \frac{U_{uit2}}{U_{uit1} - U_{uit2}}$$

Voorbeeld: $U_{uit1} = 1 \text{ V}$;
 $U_{uit2} = 0,9 \text{ V}$;
 $R_V = 3,3 \text{ k}\Omega$;
 $R_{IN} = ?$



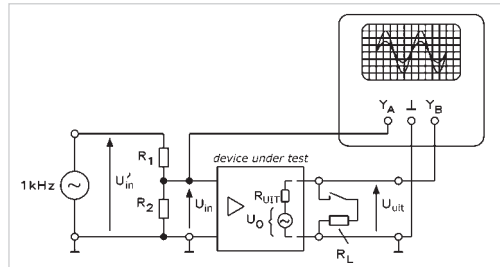
Figuur 9.45

$$R_{IN} = 3,3 \text{ k}\Omega \cdot \frac{0,9 \text{ V}}{1 \text{ V} - 0,9 \text{ V}} = 29,7 \text{ k}\Omega$$

9.8.8 Meting van de uitgangsweerstand

$$R_{UIT} = R_L \cdot \left(\frac{U_0}{U_{uit}} - 1 \right)$$

Voorbeeld: $U_0 = 1 \text{ V}$;
 $U_{uit} = 0,9 \text{ V}$;
 $R_L = 600 \Omega$;
 $R_{UIT} = ?$



Figuur 9.46

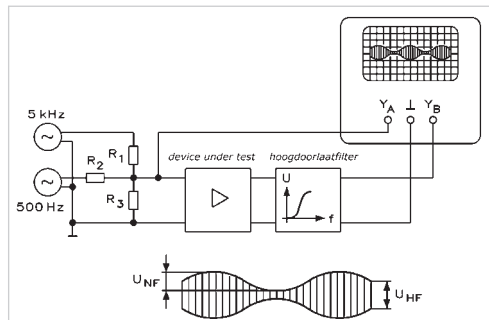
$$R_{UIT} = 600 \Omega \cdot \left(\frac{1 \text{ V}}{0,9 \text{ V}} - 1 \right) = 66,7 \Omega$$

9.8.9 Meting van de intermodulatiegraad

$$m = \frac{U_{NF}}{U_{HF}} \cdot 100\%$$

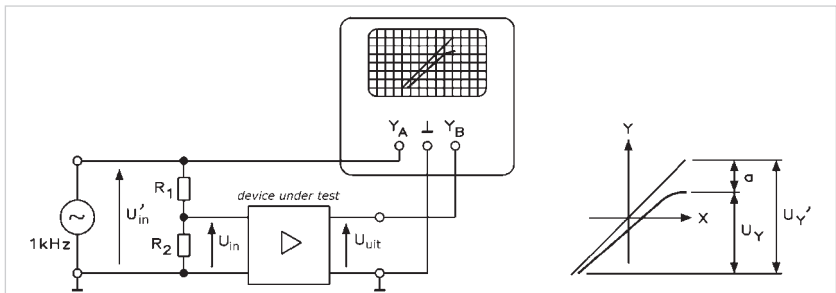
Voorbeeld: $U_{NF} = 0,2 \text{ V}$;
 $U_{HF} = 1 \text{ V}$;
 $m = ?$

$$m = \frac{0,2 \text{ V}}{1 \text{ V}} \cdot 100\% = 20\%$$



Figuur 9.47

9.8.10 Meting van de lineariteitsfout

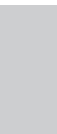


Figuur 9.48

$$F = \frac{a}{U_Y + a} \cdot 100\%$$

Voorbeeld: $U_Y = 1 \text{ V}$; $a = 100 \text{ mV}$; $F = ?$

$$F = \frac{100 \text{ mV}}{1 \text{ V} + 100 \text{ mV}} \cdot 100\% = 9,09\%$$



10 Digitale techniek

10.1 Betekenis van binaire signaalwaarden

	waarde 0	waarde 1
schakelaar	open	gesloten
signaal	0	1
potentiaal	laag (L, low)	hoog (H, high)
waarheidswaarde	onwaar	waar

10.1.1 Talstelsels

decimaal	duaal / binair	octaal	hexadecimaal
0	0	0	0
1	1	1	1
2	10	2	2
3	11	3	3
4	100	4	4
5	101	5	5
6	110	6	6
7	111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F

10.1.2 Decimaal talstelsel

$$\begin{array}{rcllcl} 359_D & 1^e \text{ positie} & \equiv 9 \cdot 10^0 & = 9 \cdot 1 & = 9 \\ & 2^e \text{ positie} & \equiv 5 \cdot 10^1 & = 5 \cdot 10 & = 50 \\ & 3^e \text{ positie} & \equiv 3 \cdot 10^2 & = 3 \cdot 100 & = 300 \\ & \text{som} & & & = \underline{\underline{359_D}} \end{array}$$

10.1.3 Binair talstelsel

1011 _B	1 ^e positie	$\equiv 1 \cdot 2^0$	$= 1 \cdot 1$	$= 1$
	2 ^e positie	$\equiv 1 \cdot 2^1$	$= 1 \cdot 2$	$= 2$
	3 ^e positie	$\equiv 0 \cdot 2^2$	$= 0 \cdot 4$	$= 0$
	4 ^e positie	$\equiv 1 \cdot 2^3$	$= 1 \cdot 8$	$= 8$
	som			$= 11_D$

10.1.4 Octaal talstelsel

473 _O	1 ^e positie	$\equiv 3 \cdot 8^0$	$= 3 \cdot 1$	$= 3$
	2 ^e positie	$\equiv 7 \cdot 8^1$	$= 7 \cdot 8$	$= 56$
	3 ^e positie	$\equiv 4 \cdot 8^2$	$= 4 \cdot 64$	$= 256$
	som			$= 315_D$

10.1.5 Hexadecimaal talstelsel

73 _H	1 ^e positie	$\equiv 3 \cdot 16^0$	$= 3 \cdot 1$	$= 3$
	2 ^e positie	$\equiv 7 \cdot 16^1$	$= 7 \cdot 16$	$= 112$
	som			$= 115_D$

10.1.6 Omrekening decimaal → binair25_D → binair?

25 : 2	=	12	rest 1	
12 : 2	=	6	rest 0	
6 : 2	=	3	rest 0	
3 : 2	=	1	rest 1	
1 : 2	=	0	rest 1	↑ 11001 _B

Controle: $11001_B = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 25_D$ 10.1.7 Omrekening decimaal → octaal100_D → octaal?

100 : 8	=	12	rest 4	
12 : 8	=	1	rest 4	
1 : 8	=	0	rest 1	↑ 144 _O

$$\text{Controle: } 144_{\text{O}} = 1 \cdot 8^2 + 4 \cdot 8^1 + 4 \cdot 8^0 = 100_{\text{D}}$$

10.1.8 Omrekening decimaal → hexadecimaal

$500_{\text{D}} \rightarrow \text{hexadecimaal?}$

$$\begin{array}{rclcl} 500 : 16 & = & 31 & \text{rest } 4 \\ 31 : 16 & = & 1 & \text{rest } F \\ 1 : 16 & = & 0 & \text{rest } 1 \end{array} \quad \uparrow \quad 1F4_{\text{H}}$$

$$\text{Controle: } 1F4_{\text{H}} = 1 \cdot 16^2 + 15 \cdot 16^1 + 4 \cdot 16^0 = 500_{\text{D}}$$

10.1.9 Omrekening binair → octaal

$110101_{\text{B}} \rightarrow \text{octaal?}$

$$\begin{array}{cc} 110 & 101 \\ 6 & 5 \end{array} \quad 110101_{\text{B}} \equiv 65_{\text{O}}$$

10.1.10 Omrekening binair → hexadecimaal

$110101_{\text{B}} \rightarrow \text{hexadecimaal?}$

$$\begin{array}{cc} 11 & 0101 \\ 3 & 5 \end{array} \quad 110101_{\text{B}} \equiv 35_{\text{H}}$$

10.2 Bits en bytes

- ⇒ Een bit (binary digit) kan twee verschillende toestanden aannemen.

$$2^0$$

- ⇒ Een tetrade of nibble (4-bit formaat) kan 16 verschillende toestanden aannemen.

$$2^3 \quad 2^2 \quad 2^1 \quad 2^0$$

Een byte (8-bit formaat) kan 256 toestanden aannemen.

$$2^7 \quad 2^6 \quad 2^5 \quad 2^4 \quad 2^3 \quad 2^2 \quad 2^1 \quad 2^0$$

- ➡ Een word (woord, 16-bit formaat) bestaat uit twee bytes en kan 65.536 (= 64 kilobyte) verschillende toestanden aannemen.



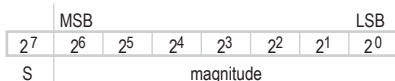
- ➡ Een dword (double, 32-bit formaat) bestaat uit vier bytes en kan 4.294.967.296 (= 4 gigabyte) verschillende toestanden aannemen.



- ➡ Een fword (far, 48-bit formaat) bestaat uit zes bytes en kan $\approx 2,8$ terabyte verschillende toestanden aannemen.
- ➡ Een qword (quad, 64-bit formaat) bestaat uit acht bytes.
- ➡ Een tword (ten, 80-byte-formaat) bestaat uit tien bytes.

10.2.1 Integer (binair getal met teken)

8-bit integer



MSB Most Significant Bit (meest significante, hoogstwaardige bit)
 LSB Least Significant Bit (minst significante, minstwaardige bit)
 S tekenbit (sign); 0 = positief, 1 = negatief

Bereik: -128 ... +127

16-bit integer



Bereik: -32.768 ... +32.767

32-bit integer



Bereik: $-2 \cdot 10^9 \dots +2 \cdot 10^9$

10.3 Logische basisfuncties

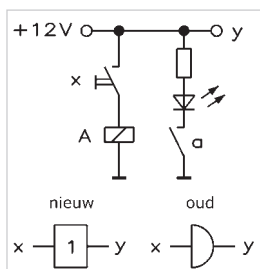
10.3.1 Identiteit

Schakelfunctie:

$$y = x$$

Functietabel:

x	y
0	0
1	1



Figuur 10.1

10.3.2 Negatie, (NIET, NOT)

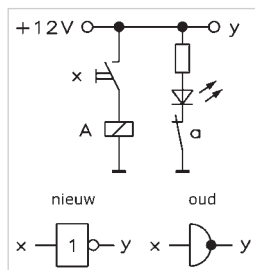
Schakelfunctie:

$$y = \bar{x}$$

(spreek uit: y is x-niet)

Functietabel:

x	y
0	1
1	0



Figuur 10.2

10.3.3 Conjunctie (EN, AND)

Schakelfunctie:

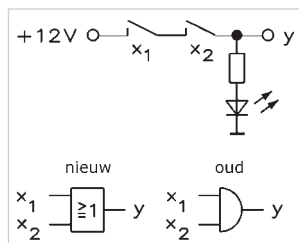
$$y = x_1 \wedge x_2 \quad \text{of} \quad y = x_1 \cdot x_2$$

(spreek uit: y is x_1 en x_2)

Functietabel:

x1	x2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

← aan voorwaarde voldaan



Figuur 10.3

10.3.4 Disjunctie (OF, OR)

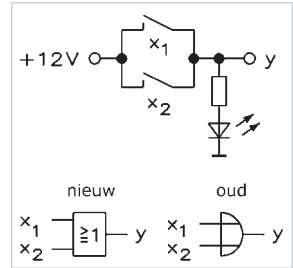
Schakelfunctie:

$$y = x_1 \vee x_2 \quad \text{of} \quad y = x_1 + x_2$$

(spreek uit: y is x_1 of x_2)

Functietabel:

x_1	x_2	y	
0	0	0	
0	1	1	← aan voorwaarde voldaan
1	0	1	← aan voorwaarde voldaan
1	1	1	← aan voorwaarde voldaan



Figuur 10.4

10.4 Afgeleide schakelfuncties

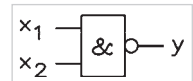
10.4.1 NAND (NIET-EN, NOT-AND)

Schakelfunctie:

$$y = \overline{x_1 \wedge x_2} \quad \text{of} \quad y = \overline{x_1 \cdot x_2}$$

Functietabel:

x_1	x_2	y	
0	0	1	← aan voorwaarde voldaan
0	1	1	← aan voorwaarde voldaan
1	0	1	← aan voorwaarde voldaan
1	1	0	



Figuur 10.5

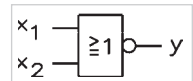
10.4.2 NOR (NIET-OF, NOT-OR)

Schakelfunctie:

$$y = \overline{x_1 \vee x_2} \quad \text{of} \quad y = \overline{x_1 + x_2}$$

Functietabel:

x_1	x_2	y	
0	0	1	← aan voorwaarde voldaan
0	1	0	
1	0	0	
1	1	0	

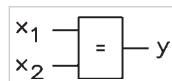


Figuur 10.6

10.4.3 Equivalentie (exclusief-NOF, EXNOR)

Schakelfunctie:

$$y = \overline{x_1} \wedge \overline{x_2} \vee x_1 \wedge x_2 \quad \text{of} \quad y = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} + x_1 \cdot x_2$$



Figuur 10.7

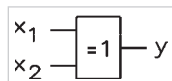
Functietabel:

x ₁	x ₂	y	
0	0	1	← aan voorwaarde voldaan
0	1	0	
1	0	0	
1	1	1	← aan voorwaarde voldaan

10.4.4 Antivalentie (exclusief-OF, EXOR)

Schakelfunctie:

$$y = \overline{x_1} \wedge x_2 \vee x_1 \wedge \overline{x_2} \quad \text{of} \quad y = \overline{x_1} \cdot x_2 + x_1 \cdot \overline{x_2}$$



Figuur 10.8

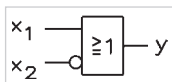
Functietabel:

x ₁	x ₂	y	
0	0	0	
0	1	1	← aan voorwaarde voldaan
1	0	1	← aan voorwaarde voldaan
1	1	0	

10.4.5 Implicatie

Schakelfunctie:

$$y = x_1 \vee \overline{x_2} \quad \text{of} \quad y = x_1 + \overline{x_2}$$



Figuur 10.9

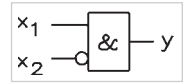
Functietabel:

x ₁	x ₂	y	
0	0	1	← aan voorwaarde voldaan
0	1	0	
1	0	1	← aan voorwaarde voldaan
1	1	1	← aan voorwaarde voldaan

10.4.6 Inhibitie

Schakelfunctie:

$$y = x_1 \wedge \overline{x_2} \quad \text{of} \quad y = x_1 \cdot \overline{x_2}$$



Figuur 10.10

Functietabel:

x_1	x_2	y	
0	0	0	
0	1	0	
1	0	1	← aan voorwaarde voldaan
1	1	0	

10.4.7 Basisregels van de schakelalgebra

Constante waarden

$$\overline{0} = 1$$

$$\overline{1} = 0$$

EN-operatie (conjunctie)

$$0 \wedge 0 = 0$$

$$1 \wedge 0 = 0$$

$$0 \wedge 1 = 0$$

$$1 \wedge 1 = 1$$

OF-operatie (disjunctie)

$$0 \vee 0 = 0$$

$$1 \vee 0 = 1$$

$$0 \vee 1 = 1$$

$$1 \vee 1 = 1$$

Functies met één variabele

dubbele negatie

$$\overline{\overline{x}} = x$$

EN-operatie (conjunctie)

$$0 \wedge x = 0$$

$$x \wedge \overline{x} = x$$

$$1 \wedge x = x$$

$$x \wedge \overline{\overline{x}} = 0$$

OF-operatie (disjunctie)

$$0 \vee x = x$$

$$x \vee \overline{x} = x$$

$$1 \vee x = 1$$

$$x \vee \overline{\overline{x}} = 1$$

Functies met meerdere variabelen

commutatieve wetten

$$x_1 \wedge x_2 = x_2 \wedge x_1$$

$$x_1 \vee x_2 = x_2 \vee x_1$$

associatieve wetten

$$x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 = x_1 \wedge (x_2 \wedge x_3) = (x_1 \wedge x_2) \wedge x_3$$

$$x_1 \vee x_2 \vee x_3 = x_1 \vee (x_2 \vee x_3) = (x_1 \vee x_2) \vee x_3$$

distributieve wetten

$$x_1 \wedge (x_2 \vee x_3) = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_1 \wedge x_3)$$

$$x_1 \vee (x_2 \wedge x_3) = (x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee x_3)$$

absorptiewetten

$$x_1 \vee x_1 \wedge x_2 = x_1$$

$$x_1 \wedge (x_1 \vee x_2) = x_1$$

$$x_1 \wedge (x_1 \vee x_2) = x_1 \wedge x_2$$

$$x_1 \vee x_1 \wedge x_2 = x_1 \vee x_2$$

wetten van De Morgan

$$\overline{x_1 \wedge x_2} = \overline{x_1} \vee \overline{x_2}$$

$$\overline{x_1 \vee x_2} = \overline{x_1} \wedge \overline{x_2}$$

Volgorde van bewerkingen

Wanneer geen haakje worden gebruikt, geldt voor logische bewerkingen deze volgorde: 1) negatie; 2) conjunctie; 3) disjunctie

10.4.8 Minimaliseren met Karnaugh-diagrammen

Karnaugh-diagram met twee variabelen

Significantie	$b = 2^1$	$a = 2^0$	
0	0	0	$a'b'$
1	0	1	$a'b$
2	1	0	ab'
3	1	1	ab

	a	a'
	ab	$a'b$
	ab'	$a'b'$

Figuur 10.11

Voorbeeld: $x = ab + a'b$

Uitkomst: $x = b'$

	a	a
b	ab	$a'b$
b'	ab'	$a'b'$

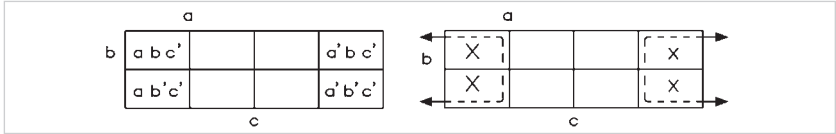
Figuur 10.12

Karnaugh-diagram met drie variabelen

Significantie	$c = 2^2$	$b = 2^1$	$a = 2^0$	
0	0	0	0	$a'b'c'$
1	0	0	1	$a'b'c$
2	0	1	0	$a'b'c'$
3	0	1	1	$a'b'c$
4	1	0	0	$ab'c'$
5	1	0	1	$ab'c$
6	1	1	0	abc'
7	1	1	1	abc

	a	a	a	a
b	$ab'c'$	$ab'c$	$a'b'c'$	$a'b'c$
b'	$ab'c'$	$ab'c$	$a'b'c'$	$a'b'c$
	c'	c	c'	c

Figuur 10.13



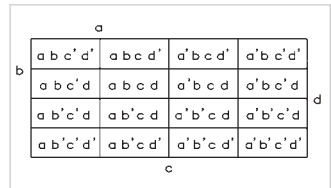
Figuur 10.14

Voorbeeld: $x = abc' + a'bc' +$
 $+ ab'c' + a'b'c'$

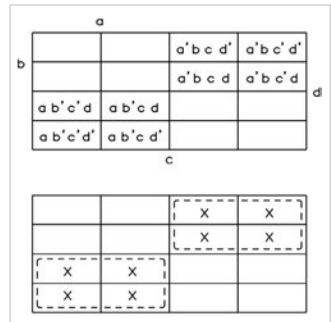
Uitkomst: $x = c'$

Karnaugh-diagram met vier variabelen

Significantie	$d = 2^3$	$c = 2^2$	$b = 2^1$	$a = 2^0$	
0	0	0	0	0	$a'b'c'd'$
1	0	0	0	1	$a'b'c'd$
2	0	0	1	0	$a'b c'd'$
3	0	0	1	1	$a'b c'd$
4	0	1	0	0	$a'b'c d'$
5	0	1	0	1	$a'b'c d$
6	0	1	1	0	$a'b c d'$
7	0	1	1	1	$a'b c d$
8	1	0	0	0	$a'b'c'd$
9	1	0	0	1	$a'b'c'd$
10	1	0	1	0	$a'b'c'd$
11	1	0	1	1	$a'b'c'd$
12	1	1	0	0	$a'b'c'd$
13	1	1	0	1	$a'b'c'd$
14	1	1	1	0	$a'b'c'd$
15	1	1	1	1	$a'b'c'd$



Figuur 10.15



Figuur 10.16

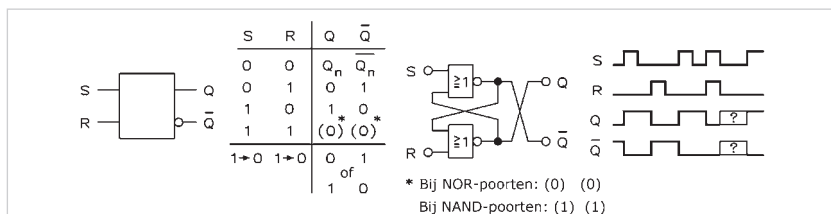
Voorbeeld: $x = a'bcd' + a'bc'd' + a'bcd +$
 $+ a'bc'd + ab'c'd' +$
 $+ ab'cd + ab'c'd' + ab'cd'$

Uitkomst: $x = a'b + ab'$

10.5 Flipflops (bistabiele multivibratoren)

10.5.1 Niveaugestuurde RS-flipflop

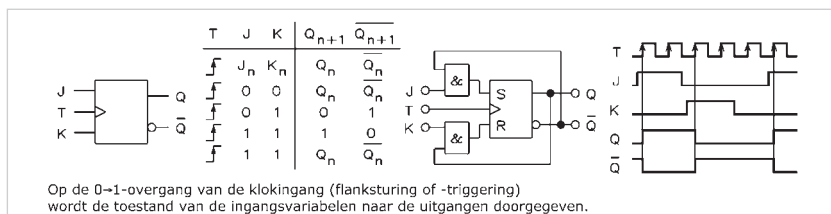
(Niet-klokgestuurde flipflop met statische ingangen die op spanningsniveaus reageren.)



Figuur 10.17

10.5.2 Flankgestuurde JK-flipflop

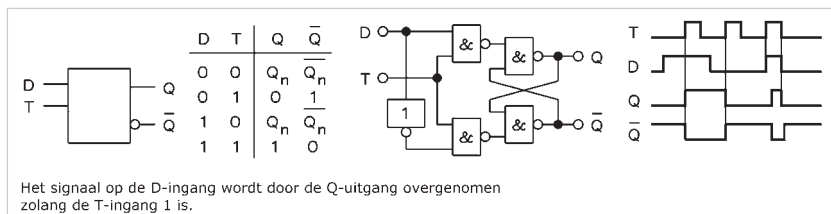
(Klokgestuurde JK-flipflop met dynamische klokingang die op een positieve flank reageert.)



Figuur 10.18

10.5.3 Niveaugestuurde D-flipflop

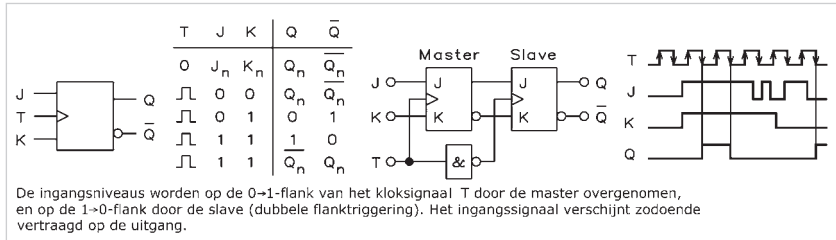
(Niveaugestuurde D-flipflop (latch) met statische klokingang die de ingangstoestand overneemt (transparant is) zolang de klokingang positief is.)



Figuur 10.19

10.5.4 Flankgestuurde JK-master-slave-flipflop

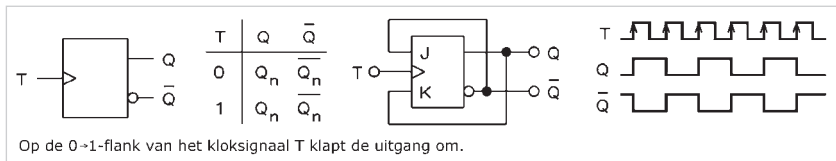
(Twee klokgestuurde JK-flipflops met dynamische klokingangen. De master-flipflop reageert op een positieve en de slave-flipflop op een negatieve flank van het kloksignaal.)



Figuur 10.20

10.5.5 Flankgestuurde T-flipflop

(Klokgestuurde JK-flipflop ('toggle-flipflop') met teruggekoppelde uitgangen en een dynamische klokingang die op een positieve flank reageert.)



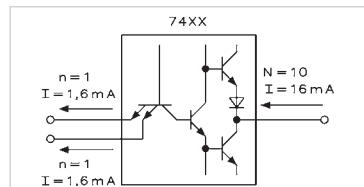
Figuur 10.21

16.6 Belastbaarheid van TTL-componenten

De uitgangsbelaastbaarheid (fan-in, fan-out) geeft aan van hoeveel eenheidsbelastingen (N) de TTL-component bij L-niveau (0-sigtaal) een stroom kan opnemen resp. aan hoeveel eenheidsbelastingen (n) de TTL-component bij H-niveau (1-sigtaal) een stroom kan leveren.

Bij standaard TTL-IC's uit de 74xx-reeks ('familie') is $N = 10$ (16 mA) en is $n = 1$ (1,6 mA).

TTL-driver	TTL-belasting					
	std	ALS	AS	F	LS	S
std	10	20	8	20	20	8
ALS	10	20	10	20	20	10
AS	10	50	10	50	50	10
F	12	25	10	25	25	10
LS	5	20	8	50	50	10
S	12	50	10	50	50	10



Figuur 10.22

std	standaard-TTL	74xx
ALS	Advanced-Low-Power-Schottky-TTL	74ALSxx
AS	Advanced-Schottky-TTL	74ASxx
F	Fast-Schottky-TTL	74Fxx
LS	Low-Power-Schottky-TTL	74LSxx
S	Schottky-TTL	74Sxx

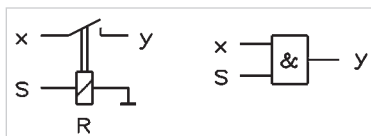
			std	ALS	AS	F	LS	S	
voedingsspanning	U_b	min	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	V
		typ	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
		max	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	
ingangsspanning	U_{IL}	max	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	V
		U_{IH}	min	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
ingangsstroom	I_{IL}	max	-1,6	-0,2	-1,0	-1,2	-0,36	-2,0	mA
		I_{IH}	min	40	20	20	40	20	
uitgangsspanning	U_{OL}	max ¹	0,4	0,35	0,35	0,35	0,5	0,5	V
		U_{OH}	min	2,4	3,2	3,2	3,4	2,7	
uitgangsstroom ²	I_{OL}	max	16	8 ³	20	20	8 ³	20	mA
vermogensopname/poort	P	typ	10	1	22	4	2	20	mW
looptijd/poort	tp	typ	10	4	1,5	2	9	3	ns

¹ Bij I_{OL} max.
² Bij U_{OL} max.
³ Bij gebufferde uitgangen 40 mA.

10.7 Digitale schakelaars

10.7.1 Aan/uit-schakelaar (normally open – in rust open)

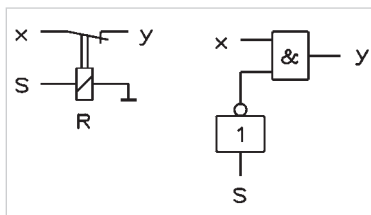
$$y = x \wedge S$$



Figuur 10.23

10.7.2 Aan/uit-schakelaar (normally closed – in rust gesloten)

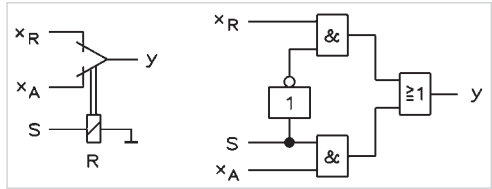
$$y = x \wedge \bar{S}$$



Figuur 10.24

10.7.3 Wisselschakelaar (omschakelaar)

$$y = x_R \wedge \bar{S} \vee x_A \wedge S$$



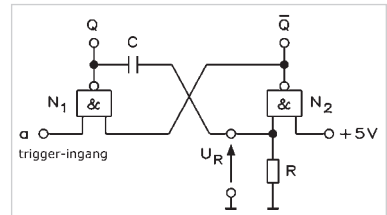
Figuur 10.25

10.8 Monostabiele multivibratoren

10.8.1 TTL-monoflop met NAND-poorten

$$t_m = R \cdot C \cdot k$$

- k correctiefactor;
 $k = 0,8 \dots 1,3$,
 afhankelijk van R
 R $220 \, \Omega \dots 1 \, \text{k}\Omega$
 C $1 \, \text{nF} \dots 100 \, \mu\text{F}$

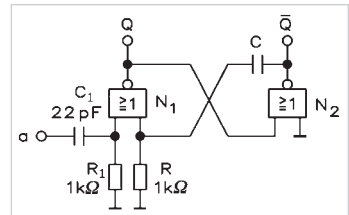


Figuur 10.26

10.8.2 TTL-monoflop met NOR-poorten

$$t_m = R \cdot C \cdot k$$

- k correctiefactor;
 $k = 0,8 \dots 1,3$,
 afhankelijk van R
 R $220 \, \Omega \dots 1 \, \text{k}\Omega$
 C $1 \, \text{nF} \dots 100 \, \mu\text{F}$

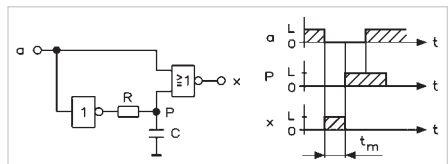


Figuur 10.27

10.8.3 TTL-monoflop met NOR- en NOT-poorten

$$t_m = R \cdot C \cdot k$$

- k correctiefactor;
 $k = 0,8 \dots 1,3$,
 afhankelijk van R
 R $220 \, \Omega \dots 1 \, \text{k}\Omega$
 C $1 \, \text{nF} \dots 100 \, \mu\text{F}$

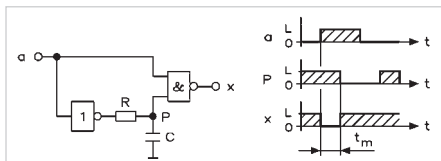


Figuur 10.28

10.8.4 TTL-monoflop met NAND- en NOT-poorten

$$t_m = R \cdot C \cdot k$$

k correctiefactor;
 $k = 0,8 \dots 1,3$,
 afhankelijk van R
 R $220 \, \Omega \dots 1 \, \text{k}\Omega$
 C $1 \, \text{nF} \dots 100 \, \mu\text{F}$

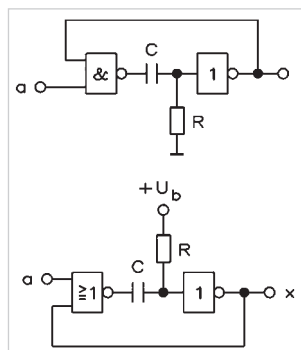


Figuur 10.29

10.8.5 TTL-monoflop met terugkoppeling

$$t_m = R \cdot C$$

R $220 \, \Omega \dots 1 \, \text{k}\Omega$
 C $1 \, \text{nF} \dots 100 \, \mu\text{F}$



Figuur 10.30

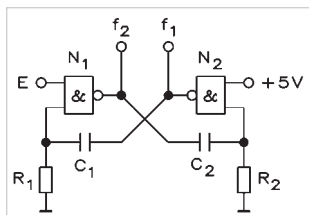
10.9 Astabiele multivibratoren

10.9.1 Blok golfgenerator met NAND-poorten

Als $R_1 = R_2 = R$ en $C_1 = C_2 = C$, dan is:

$$f = \frac{1}{R \cdot C}$$

R $220 \, \Omega \dots 1 \, \text{k}\Omega$
 C $1 \, \text{nF} \dots 100 \, \mu\text{F}$



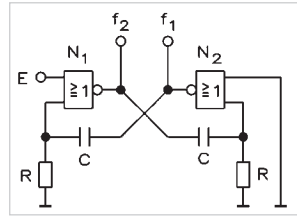
Figuur 10.31

10.9.2 Blokvolfgenerator met NOR-poorten

Als $R_1 = R_2 = R$ en $C_1 = C_2 = C$, dan is:

$$f = \frac{1}{R \cdot C}$$

$$\begin{array}{ll} R & 220 \, \Omega \dots 1 \, \text{k}\Omega \\ C & 1 \, \text{nF} \dots 100 \, \mu\text{F} \end{array}$$



Figuur 10.32

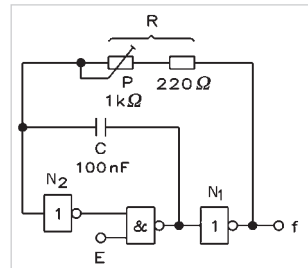
10.9.3 Teruggekoppelde blokvolfgenerator

$$f = \frac{1}{R \cdot C}$$

Voorbeeld: $f_{\min} = ?$; $f_{\max} = ?$

$$f_{\min} = \frac{1}{(1 \, \text{k}\Omega + 220 \, \Omega) \cdot 100 \, \text{nF}} = 8,2 \, \text{kHz}$$

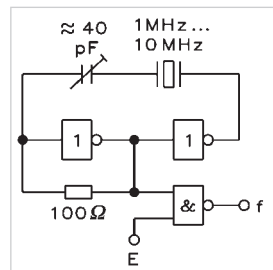
$$f_{\max} = \frac{1}{220 \, \Omega \cdot 100 \, \text{nF}} = 45,45 \, \text{kHz}$$



Figuur 10.33

10.9.4 Teruggekoppelde blokvolfgenerator met kristal

De frequentie van de blokvolfgenerator wordt door het kristal bepaald.



Figuur 10.34

10.9.5 Blokvolggenerator met TTL-Schmitt-trigger

$$t_1 = R \cdot C \cdot \ln \frac{U_{Q1} - U_{\text{Huit}}}{U_{Q1} - U_{\text{Hin}}}$$

$$t_2 = R \cdot C \cdot \ln \frac{U_{Q0} - U_{\text{Hin}}}{U_{Q0} - U_{\text{Huit}}}$$

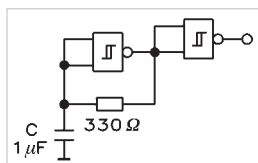
$$f = \frac{1}{t_1 + t_2}$$

Voorbeeld: $R = 330 \, \Omega$; $C = 1 \, \mu\text{F}$; $U_{Q1} = 3,3 \, \text{V}$; $U_{Q0} = 0,2 \, \text{V}$;
 $U_{\text{Hin}} = 1,7 \, \text{V}$; $U_{\text{Huit}} = 0,9 \, \text{V}$; $f = ?$

$$t_1 = 330 \, \Omega \cdot 1 \, \mu\text{F} \cdot \ln \frac{3,3 \, \text{V} - 0,9 \, \text{V}}{3,3 \, \text{V} - 1,7 \, \text{V}} = 133,8 \, \mu\text{s}$$

$$t_2 = 330 \, \Omega \cdot 1 \, \mu\text{F} \cdot \ln \frac{0,2 \, \text{V} - 1,7 \, \text{V}}{0,2 \, \text{V} - 0,9 \, \text{V}} = 251,5 \, \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{133,8 \, \mu\text{s} + 251,5 \, \mu\text{s}} = 2,59 \, \text{kHz}$$

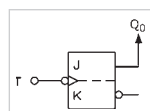


Figuur 10.35

10.10 Asynchrone frequentiedelers/tellers

10.10.1 Frequentiedeler/teller 1:2

	Tijd	Q_0
0	t_n	0
1	t_{n+1}	1
0	t_{n+2}	0
1	t_{n+3}	1



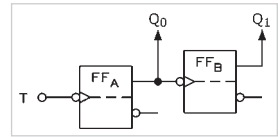
Figuur 10.36

Voor standaard-TTL-IC's geldt:

$$f_{\text{max}} \approx \frac{1}{n \cdot t_{\text{FF}}} = \frac{1}{1 \cdot 10 \, \text{ns}} = 100 \, \text{MHz}$$

10.10.2 Frequentiedeler/teller 1:4

	Tijd	Q ₀	Q ₁
0	t _n	0	0
1	t _{n+1}	1	0
2	t _{n+2}	0	1
3	t _{n+3}	1	1
0	t _{n+4}	0	0



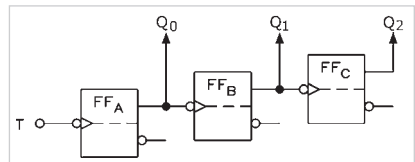
Figuur 10.37

Voor standaard-TTL-IC's geldt:

$$f_{\max} \approx \frac{1}{n \cdot t_{FF}} = \frac{1}{2 \cdot 10 \text{ ns}} = 50 \text{ MHz}$$

10.10.3 Frequentiedeler/teller 1:8

	Tijd	Q ₀	Q ₁	Q ₂
0	t _n	0	0	0
1	t _{n+1}	1	0	0
...	...	...	...	...
7	t _{n+7}	1	1	1
0	t _{n+8}	0	0	0



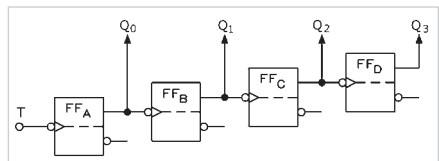
Figuur 10.38

Voor standaard-TTL-IC's geldt:

$$f_{\max} \approx \frac{1}{n \cdot t_{FF}} = \frac{1}{3 \cdot 10 \text{ ns}} = 33 \text{ MHz}$$

10.10.4 Frequentiedeler/teller 1:16

	Tijd	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
0	t _n	0	0	0	0
1	t _{n+1}	1	0	0	0
...	...	...	...	...	...
15	t _{n+15}	1	1	1	1
0	t _{n+16}	0	0	0	0



Figuur 10.39

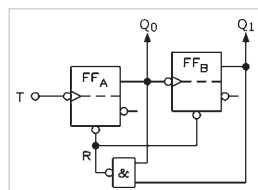
Voor standaard-TTL-IC's geldt:

$$f_{\max} \approx \frac{1}{n \cdot t_{FF}} = \frac{1}{4 \cdot 10 \text{ ns}} = 25 \text{ MHz}$$

10.10.5 Frequentiedeler/teller 1:3

	Tijd	Q ₀	Q ₁
0	t _n	0	0
1	t _{n+1}	1	0
2	t _{n+2}	0	1
0	t _{n+3}	1*	1*
		0	0
1	t _{n+4}	1	0

* NAND-conditie waar (≈ 5 ns)



Figuur 10.40

Voor standaard-TTL-IC's geldt:

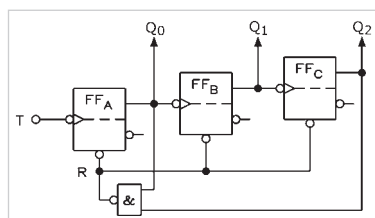
$$f_{\max} = \frac{1}{n \cdot t_{FF} + T_{\text{puls}} + t_p} = \frac{1}{2 \cdot 10 \text{ ns} + 5 \text{ ns} + 3 \text{ ns}} = 35,7 \text{ MHz}$$

T_{puls} breedte klokpuls
 t_p looptijdvertraging NAND-poort

10.10.6 Frequentiedeler/teller 1:5

	Tijd	Q ₀	Q ₁	Q ₂
0	t _n	0	0	0
1	t _{n+1}	1	0	0
...	...	...	...	...
4	t _{n+4}	0	0	1
0	t _{n+5}	1*	0	1*
		0	0	0
1	t _{n+6}	1	0	0

* NAND-conditie waar (≈ 5 ns)



Figuur 10.41

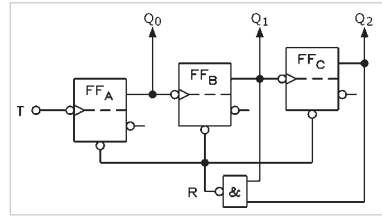
Voor standaard-TTL-IC's geldt:

$$f_{\max} \approx \frac{1}{n \cdot t_{FF} + T_{\text{puls}} + t_p} = \frac{1}{3 \cdot 10 \text{ ns} + 5 \text{ ns} + 3 \text{ ns}} = 26 \text{ MHz}$$

10.10.7 Frequentiedeler/teller 1:6

	Tijd	Q ₀	Q ₁	Q ₂
0	t _n	0	0	0
1	t _{n+1}	1	0	0
...	...	...	...	...
5	t _{n+5}	1	0	1
0	t _{n+6}	0	1*	1*
1	t _{n+7}	1	0	0

* NAND-conditie waar (≈ 5 ns)



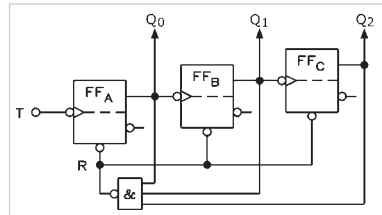
Figuur 10.42

Voor $f_{\max}$ zie paragraaf 10.10.6.

10.10.8 Frequentiedeler/teller 1:7

	Tijd	Q ₀	Q ₁	Q ₂
0	t _n	0	0	0
1	t _{n+1}	1	0	0
...	...	...	...	...
6	t _{n+6}	0	1	1
0	t _{n+7}	1*	1*	1*
1	t _{n+8}	1	0	0

* NAND-conditie waar (≈ 5 ns)



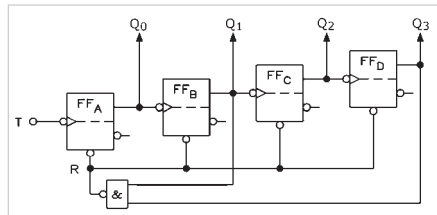
Figuur 10.43

Voor $f_{\max}$ zie paragraaf 10.10.6.

10.10.9 Frequentiedeler/teller 1:10

	Tijd	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
0	t _n	0	0	0	0
1	t _{n+1}	1	0	0	0
...	...	...	...	...	...
8	t _{n+8}	0	0	0	1
9	t _{n+9}	1	0	0	1
0	t _{n+10}	0	1*	0	1*
1	t _{n+11}	1	0	0	0

* NAND-conditie waar (≈ 5 ns)



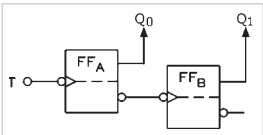
Figuur 10.44

Voor standaard-TTL-IC's geldt:

$$f_{\max} \approx \frac{1}{n \cdot t_{FF} + T_{\text{puls}} + t_p} = \frac{1}{4 \cdot 10 \text{ ns} + 5 \text{ ns} + 3 \text{ ns}} = 21 \text{ MHz}$$

10.10.10 2-bit omlaagteller

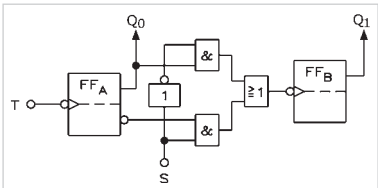
	Tijd	Q ₀	Q ₁
0	t _n	0	0
3	t _{n+1}	1	1
2	t _{n+2}	0	1
1	t _{n+3}	1	0
0	t _{n+4}	0	0
3	t _{n+5}	1	1



Figuur 10.45

10.10.11 2-bit omhoog-/omlaagteller

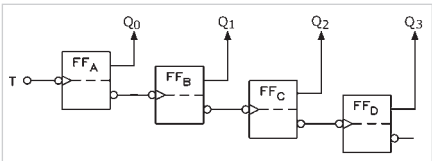
S = 0 omhoog tellen
S = 1 omlaag tellen



Figuur 10.46

10.10.12 4-bit omlaagteller

	Tijd	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
0	t _n	0	0	0	0
15	t _{n+1}	1	1	1	1
...	...	...	...	...	...
2	t _{n+14}	0	1	0	0
1	t _{n+15}	1	0	0	0
0	t _{n+16}	0	0	0	0
15	t _{n+17}	1	1	1	1

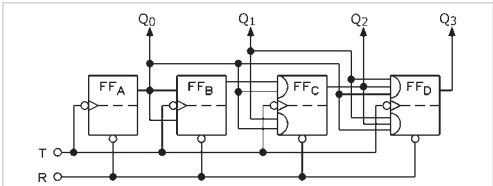


Figuur 10.47

10.11 Synchronische omhoogtellers

10.11.1 Synchronische 4-bit teller met paralleloverdracht

$$f_{\max} \approx \frac{1}{T_{FF}}$$



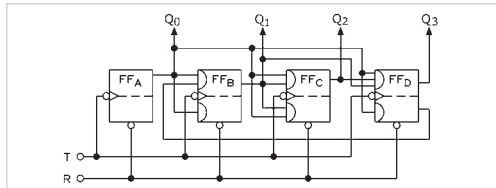
Figuur 10.48

	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
...	...	...	...	...
14	0	1	1	1
15	1	1	1	1
0	0	0	0	0

J _A = 1	K _A = 1
J _B = A	K _B = A
J _C = AB	K _C = AB
J _D = ABC	K _D = ABC

10.11.2 Synchrone BCD-teller met paralleeloverdracht

$$f_{\max} \approx \frac{1}{T_{FF}}$$



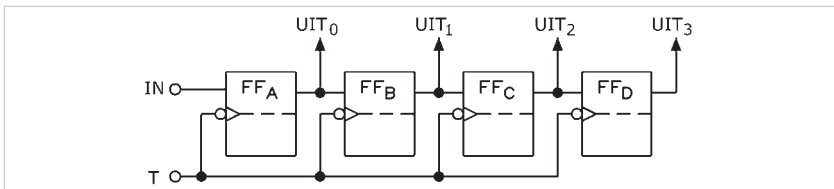
Figuur 10.49

	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
...	...	...	...	...
7	1	1	1	0
8	0	0	0	1
9	1	0	0	1
0	0	0	0	0

J _A = 1	K _A = 1
J _B = AD	K _B = A
J _C = AB	K _C = AB
J _D = ABC	K _D = A

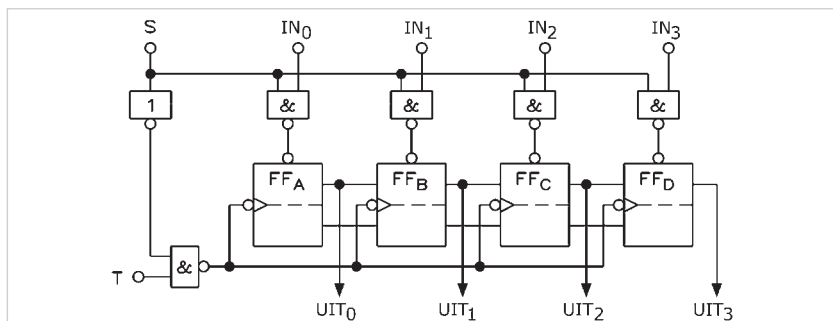
10.12 Schuifregisters

10.12.1 Serieel in, parallel uit



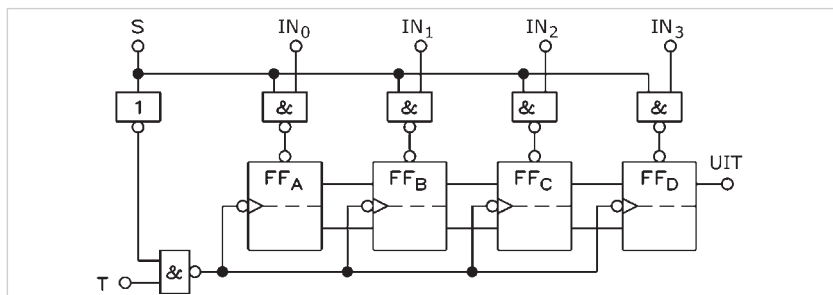
Figuur 10.50

10.12.2 Parallel in, parallel uit



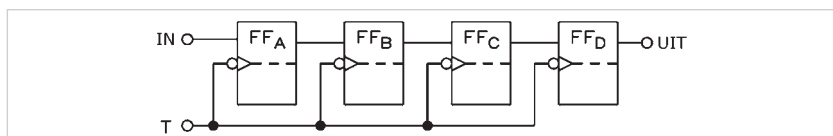
Figuur 10.51

10.12.3 Parallel in, serieel uit



Figuur 10.52

10.12.4 Serieel in, serieel uit



Figuur 10.53

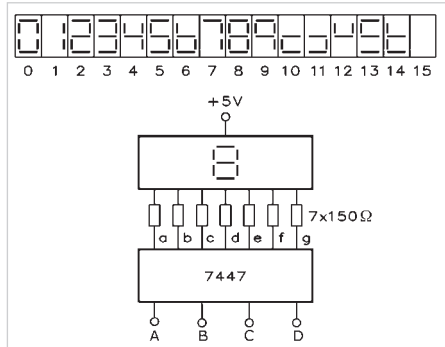
10.13 7-segment decoder/driver

$$R = \frac{U_b - U_F}{I}$$

U_b voedingsspanning
 U_F doorlaatspanning

Voorbeeld: $U_b = 5 \text{ V}$; $U_F = 2 \text{ V}$;
 $I = 20 \text{ mA}$; $R = ?$

$$R = \frac{5 \text{ V} - 2 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 150 \Omega$$

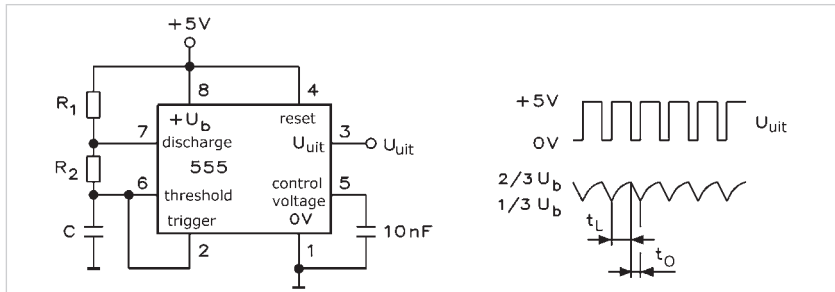


Figuur 10.54

10.14 Schakelingen met het timer-IC 555

De 555 wordt getriggerd (uitgang actief) zodra de spanning op de trigger-ingang onder $1/3$ van de voedingsspanning komt; de uitgang wordt weer inactief wanneer de spanning op de threshold-ingang boven $2/3$ van de voedingsspanning komt.

10.14.1 Blokvolggenerator met de 555



Figuur 10.55

$$\text{laadtijd: } t_L = 0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C$$

$$\text{ontlaadtijd: } t_O = 0,7 \cdot R_2 \cdot C$$

$$\text{periodeluur: } T = 0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C + 0,7 \cdot R_2 \cdot C = 0,7 \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C$$

$$f = \frac{1}{0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C}$$

Voorbeeld: $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$; $t_L = ?$; $t_O = ?$; $T = ?$;
 $df = ?$; $\delta = ?$; $PPV = ?$; $f = ?$

$$t_L = 0,7 \cdot (10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega) \cdot 0,1 \text{ }\mu\text{F} = 1,4 \text{ ms}$$

$$t_O = 0,7 \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 0,1 \text{ }\mu\text{F} = 0,7 \text{ ms}$$

$$T = t_L + t_O = 1,4 \text{ ms} + 0,7 \text{ ms} = 2,1 \text{ ms}$$

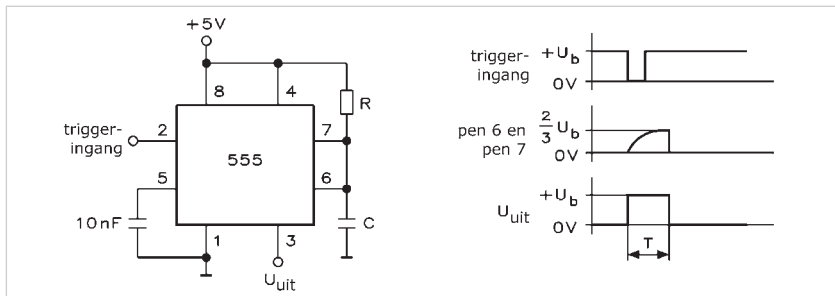
$$\text{duty factor: } df = \frac{T}{t_L} = \frac{2,1 \text{ ms}}{1,4 \text{ ms}} = 1,5$$

$$\text{duty cycle: } \delta = \frac{t_L}{T} \cdot 100\% = \frac{1,4 \text{ ms}}{2,1 \text{ ms}} \cdot 100\% = 66,6\%$$

$$\text{puls/pauze-verhouding: } PPV = \frac{t_L}{t_O} = \frac{1,4 \text{ ms}}{0,7 \text{ ms}} = 2$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,1 \text{ ms}} = 476 \text{ Hz}$$

10.14.2 Monoflop met de 555



Figuur 10.56

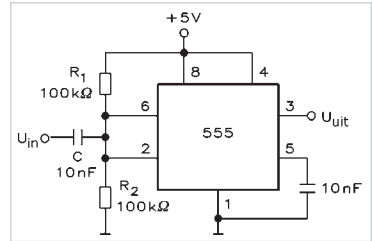
$$t_{\text{mono}} = 1,1 \cdot R \cdot C$$

Voorbeeld: $R = 33 \text{ k}\Omega$; $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$; $t_{\text{mono}} = ?$

$$t_{\text{mono}} = 1,1 \cdot 33 \text{ k}\Omega \cdot 0,1 \text{ }\mu\text{F} = 3,63 \text{ ms}$$

10.14.3 Schmitt-trigger met de 555

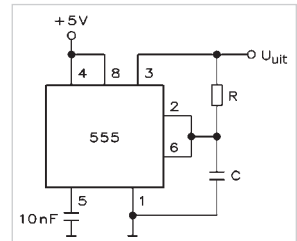
- ➡ uitschakeldrempel ('threshold'): overschrijden van $2/3 \cdot U_b$
- ➡ inschakeldrempel ('trigger'): onderschrijden van $1/3 \cdot U_b$



Figuur 10.57

10.14.4 Symmetrische blokgolf met de 555

$$f = \frac{1}{0,7 \cdot R \cdot C}$$

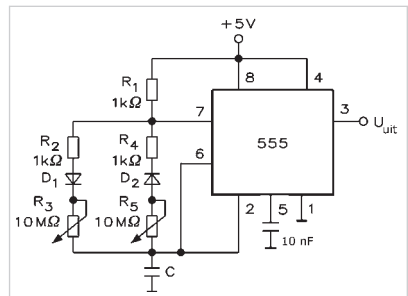


Figuur 10.58

10.14.5 Blokgolfgenerator met instelbare duty cycle

$$t_L = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot C \cdot \ln(2/3 \cdot U_b - 0,6 \text{ V})$$

$$t_O = (R_4 + R_5) \cdot C \cdot \ln(1/3 \cdot U_b - 0,6 \text{ V})$$



Figuur 10.59

10.15 Digitaal rekenen

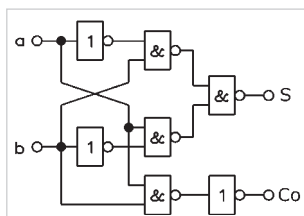
10.15.1 Halve opteller

b	a	S	Co
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

S som
Co carry out (overdracht)

$$\begin{array}{r}
 0 \\
 +0 \\
 \hline
 0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1 \\
 +0 \\
 \hline
 1
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 0 \\
 +1 \\
 \hline
 1
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1 \\
 +1 \\
 \hline
 10
 \end{array}$$

carry out
som



Figuur 10.60

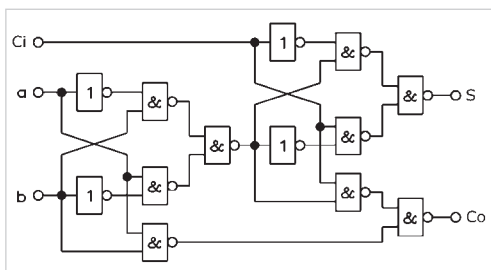
10.15.2 Volle opteller

Ci	b	a	S	Co
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

S som
Ci carry in
Co carry out

$$\begin{array}{r}
 0 \\
 +0 \\
 \hline
 0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1 \\
 +0 \\
 \hline
 1
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 0 \\
 +0 \\
 \hline
 0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1 \\
 +0 \\
 \hline
 10
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 0 \\
 +1 \\
 \hline
 1
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1 \\
 +1 \\
 \hline
 10
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 0 \\
 +1 \\
 \hline
 10
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 1 \\
 +1 \\
 \hline
 11
 \end{array}$$

carry out
som



Figuur 10.61

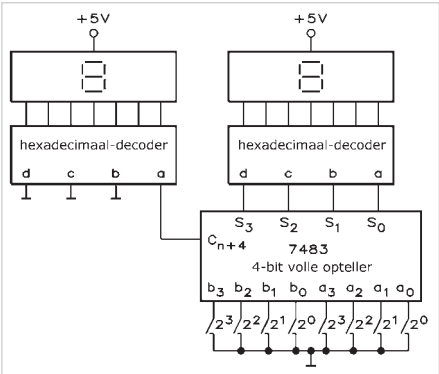
10.15.3 Opteller voor binaire ode

Invoer	Uitvoer	
3 + 3	6	ET
5 + 6	B	PT
A + C	16	ET / PT

ET tetrade (0 ... 9)
PT pseudo-tetrade
 (A ... F)

Voorbeeld: 8 + C = ?

8	≡		1	0	0	0
C	≡	+	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0
			1			4



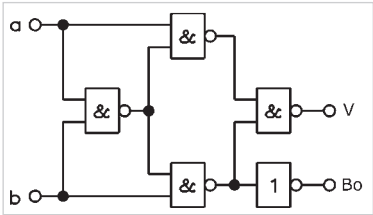
Figuur 10.62

10.15.4 Halve aftrekker

b	a	V	Bo
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	1
1	1	0	0

V verschil
Bo borrow out (lenen)

0	1	0	1
-0	-0	-1	-1
0	1	11	0
		borrow out	verschil



Figuur 10.63

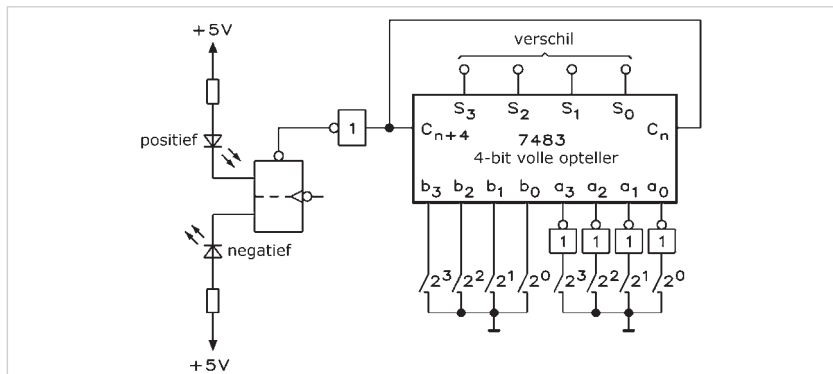
10.15.5 Volle aftrekker

Bi	b	a	V	Bo
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	1
0	1	1	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	1	1
-0	-0	-0	-0	-1	-1	-1	-1
0	1	11	0	11	0	10	11
				borrow out			verschil

V verschil
Bi borrow in
Bo borrow out

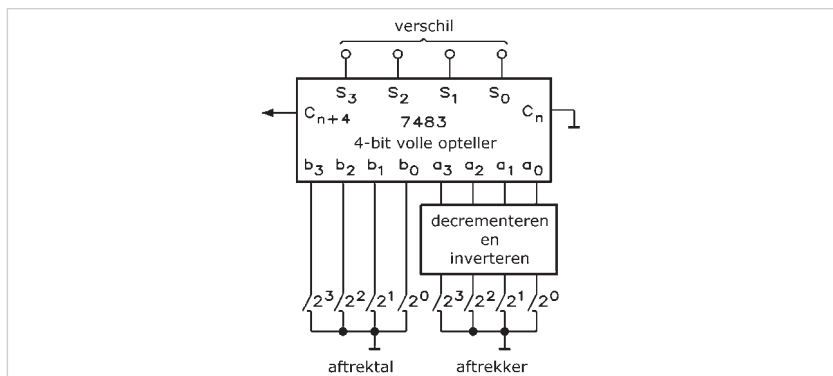
10.15.6 Aftrekken door middel van 2^{n-1} -complement



Figuur 10.64

$$\begin{array}{r}
 7 \hat{=} 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 -5 \hat{=} 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \hline
 2
 \end{array}
 \rightarrow
 \begin{array}{r}
 7 \hat{=} 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 +10 \hat{=} 1 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 \hline
 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \hline
 0 \ 0 \ 1 \ 0 \hat{=} 2
 \end{array}$$

10.15.7 Aftrekken door middel van 2^n -complement

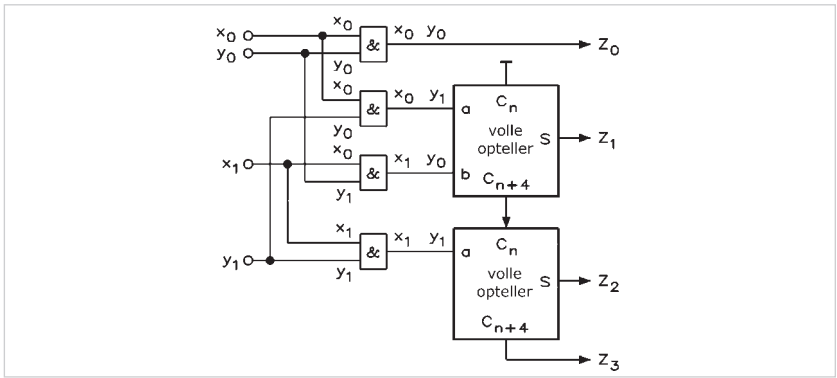


Figuur 10.65

$$\begin{array}{r}
 7 \hat{=} 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 -5 \hat{=} 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \hline
 2
 \end{array}
 \rightarrow
 \begin{array}{r}
 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 1 \ 0 \ 1 \ 1 \\
 \hline
 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \hat{=} 2
 \end{array}$$

10.15.8 Vermenigvuldiger

Een statische 2-bit maal 2-bit vermenigvuldiger bestaat uit vier AND-poorten en twee volle optellers.



Figuur 10.66

	x1	x0		y1	y0			z3	z2	z1	z0
(0)	0	0	×	(0)	0	=	(0)	0	0	0	0
(0)	0	0	×	(1)	0	=	(0)	0	0	0	0
(0)	0	0	×	(2)	1	=	(0)	0	0	0	0
(0)	0	0	×	(3)	1	=	(0)	0	0	0	0
(1)	0	1	×	(0)	0	=	(0)	0	0	0	0
(1)	0	1	×	(1)	0	=	(1)	0	0	0	1
(1)	0	1	×	(2)	1	=	(2)	0	0	1	0
(1)	0	1	×	(3)	1	=	(3)	0	0	1	1
(2)	1	0	×	(0)	0	=	(0)	0	0	0	0
(2)	1	0	×	(1)	0	=	(2)	0	0	1	0
(2)	1	0	×	(2)	1	=	(4)	0	1	0	0
(2)	1	0	×	(3)	1	=	(6)	0	1	1	0
(3)	1	1	×	(0)	0	=	(0)	0	0	0	0
(3)	1	1	×	(1)	0	=	(3)	0	0	1	1
(3)	1	1	×	(2)	1	=	(6)	0	1	1	0
(3)	1	1	×	(3)	1	=	(9)	1	0	0	1

10.15.9 Vermenigvuldigingsalgoritme

Het vermenigvuldigingsalgoritme komt overeen met de regels voor vermenigvuldigen op papier.

Voorbeeld: vermenigvuldiging van de binaire getallen 1011 (vermenigvuldigend) en 1101 (vermenigvuldiger).

Dit komt overeen met decimaal $11 \times 13 = 143$.

De vermenigvuldiging kan op twee manieren worden uitgevoerd: van hoog naar laag en van laag naar hoog.

hoog → laag

$$\begin{array}{r}
 1\ 0\ 1\ 1 \times 1\ 1\ 0\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 1 \\
 1\ 0\ 1\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0 \\
 1\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1 \cong 143
 \end{array}$$

laag → hoog

$$\begin{array}{r}
 1\ 0\ 1\ 1 \times 1\ 1\ 0\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0 \\
 1\ 0\ 1\ 1 \\
 1\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1 \cong 143
 \end{array}$$

10.15.10 Delingsalgoritme

Het delingsalgoritme komt overeen met de regels voor delen op papier.

Voorbeeld 1: deling van de binaire getallen 1011 (deeltal) en 11 (deler). Dit komt overeen met decimaal $11 : 3 = 3$ rest 2.

$$\begin{array}{r}
 1\ 0\ 1\ 1 : 1\ 1 = 1\ 1 \cong 3 \\
 \hline
 -\ 1\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 1 \\
 \hline
 -\ 1\ 1 \\
 \hline
 1\ 0 \rightarrow \text{rest } 10 \cong 2
 \end{array}$$

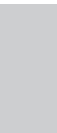
Voorbeeld 2: deling van de binaire getallen 1011 : 1100, overeenkomend met de decimale deling $11 : 12 = 0,9166\dots$

$$\begin{array}{r}
 1\ 0\ 1\ 1 : 1\ 1\ 0\ 0 = 0,1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ \dots \\
 \hline
 -\ 1\ 1\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 0 \\
 \hline
 -\ 1\ 1\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 -\ 1\ 1\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 -\ 1\ 1\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 -\ 1\ 1\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 -\ 1\ 1\ 0\ 0 \\
 \hline
 \dots
 \end{array}$$

Interpretatie van de uitkomst:

$$\begin{aligned}
 0,1110101\dots &= 1 \times \frac{1}{2} + 1 \times \frac{1}{8} + 1 \times \frac{1}{16} + 0 \times \frac{1}{32} + 1 \times \frac{1}{64} + \dots = \\
 &= 0,5 + 0,25 + 0,125 + 0,03125 + \dots \\
 &= 0,9140625\dots \approx 0,9166\dots
 \end{aligned}$$

(Hoe meer binaire cijfers achter de komma worden 'meegenomen', des te beter correspondeert de binaire uitkomst met de decimale uitkomst.)



Index

I			
7-segment decoder/driver	231		
A			
aanpassing	80		
aanpassingsfactor	81		
absorptiewetten	216		
accu	30		
actief			
1 ^e -orde hoogdoorlaatfilter	167		
1 ^e -orde laagdoorlaatfilter	166		
2 ^e -orde laagdoorlaatfilter	167		
3 ^e -orde laagdoorlaatfilter	168		
4 ^e -orde laagdoorlaatfilter	169		
admittantie	52, 54, 57, 58		
afbuigfactor	200		
afknijpspanning	137, 138		
afsluitweerstand	66, 73		
af trekken	236		
af trekschakeling	154		
afvlak-			
condensator	98, 99		
factor	102		
afvlakking			
LC-	100		
RC-	99		
akoestiek	85		
akoestische impedantie	87		
all-pass-filter	172		
ampèremeter (meetbereik)	24		
ampère-uur-rendement	30		
AND	212		
antivalentie	214		
arbeid	31, 32		
arbeidsfactor	50		
associatieve wetten	215		
astabiele multivibrator	120, 222, 223		
B			
bandbreedte	58, 74, 75, 85, 171, 202		
banddoorlaatfilter			
2 ^e -orde	171		
LC-	74		
bandsperfilter			
2 ^e -orde	171		
LC-	75		
bel	60		
belastingslijn (transistor)	115		
bessel-filter	166		
binair talstelsel	208		
<i>binary digit</i>	209		
bistabiele multivibrator	121		
bit	209		
blind vermogen	50, 190		
blindspanning			
capacitief	51, 56		
inductief	53, 56		
blindstroom			
capacitief	52, 57		
inductief	54, 57		
blokgolf	70		
-generator	139, 164, 222		
-generator met 555	231		
Boltzmann, constante van	85, 163		
bootstrap			
-schakeling	129		
-schakeling, tweetraps	130		
-wisselspanningsversterker	160		
bronspanning	27, 28		
brug			
van Thomson	197		
van Wheatstone	24, 197		
van Wien	71		
bruggelijkrichter	95		
brugschakeling	24		
met sleepcontact	24, 191		
zelfinductie	194		
brugweerstand	24		
Butterworth-filter	166		
byte	209		
C			
capacitantie	51, 52, 55, 56		
capaciteit	33, 51		
cilindrische condensator	35		
coaxkabel	36		
geleider boven massavlak	36		
kogelcondensator	35		
plaatcondensator	34		
capaciteitsdiode	103		
capaciteitsmeetbrug	198		
van Schering	198		
capaciteitsmeting	192, 193		
brugschakeling	193		
resonantiemethode	193		
capacitieve			
blindspanning	56		
koppeling	127		
cascodeschakeling	132		
centrale frequentie	74, 75		
Chebychev-filter	166		
cilinderspoel			
eenlaags	46		
meerlaags	46		
cilindrische condensator	35		
cirkelfrequentie	49, 51, 53, 64, 80		
CL-kring	75		
coaxiale kabel	36		
zelfinductie	45		
Colpitts-oscillator			
I	124		
II	124		

commutatieve wetten	215	doorlaat	
comparator (analoog)	156	-bereik	73
compensatie	174	-richting, diode	91
-thermistor	144	-weerstand, diode	91
complementaire		double	210
Darlingtonschakeling	128	draad	
transistoren	181	-diameter	18
compressibiliteit	86	-doorsnede	18
condensator		draaicondensator	37, 63
parallelschakeling	37	D-regelaar	176
serieschakeling	37	drempelwaardeschakelaar	121
temperatuurcoëfficiënt	38	driehoek	
variabel	37	-blok golfgenerator	164
conductantie	17	-schakeling	26
conjunctie	212, 215	-stertransformatie	26
constante		driepuntsregelaar	178
-spanningsbron	133, 160	driftcompensatie	159
-stroombron	139, 161	dubbele negatie	215
constante van Boltzmann	85	duo-netwerk	
continu regelbare versterking	158	hoogdoorlaat	76
coulomb	18	laagdoorlaat	73, 76
crest factor	188	duty	
D		cycle	70
Darlingtonschakeling	128	factor	70
decibel	60	dword	210
decimaal talstelsel	207	dynamische	
Delon-schakeling	100	capaciteit	126
demping	58	diodeweerstand	92
effectieve	62	zelfinductie	126
karakteristieke	63	E	
dempings		ECO-oscillator	125
-constante	80	eenheidsbelasting	219
-factor	59, 60	eenlaags spoel (zelfinductie)	46
-factor, in bel	60	effectief vermogen	50, 189
D-flipflop	218	effectieve	
diac	181	demping	62
diëlektrische		spanning	51, 53
constante	34	stroom	52, 54
verplaatsing	34	waarde	50, 187
differentiaalweerstand (zenerdiode)	102	waarde, blok golf	70
differentiator	71, 155	weerstand	53
differentiële		elasticiteitsmodulus	86
doorlaatweerstand	92	elektrisch veld	33
spierweerstand	92	elektrische	
differentiërende regelaar	176	fluxdichtheid	34
diode		lading	18
dissipatie	91	veldsterkte	33
gelijkstroomweerstand	91	elektrochemisch equivalent	30
maximale dissipatie	91	elementaire lading	147, 163
schakelaar	93	emittercondensator	118
spanningsbegrenzing	93	energie	
sperspanning	97	stroomvoerende spoel	43
stroombelastbaarheid	96	in condensator	34
temperatuurgedrag	92	enkelzijdige voeding	132
wisselstroomweerstand	92	EN	212
disjunctie	213, 215	-operatie	215
dissipatie		equivalente	
-constante	144	spanningsbron	29
diode	91	stroombron	29
distributed wetten	216	equivalentie	214
dode tijd	173	exclusief	
donkerstroom	147	-NOF	214
		-OF	214

EXNOR	214	-snelheid, in lucht	87
EXOR	214	-vermogen	88
F		gemeenschappelijke	
fan		-basisschakeling	111, 116
-in	219	-collectorschakeling	111, 117
-out	219	-drainschakeling	138
far	210	-drainschakeling (MOSFET)	142
farad	33	-emitterschakeling	107, 108, 110, 115, 128
Faraday, wet van	30	-gateschakeling	139
fase		-gateschakeling (MOSFET)	142
-aansnijding, thyristor	180	-sourceschakeling	137
-aansnijding, triac	180	-sourceschakeling (MOSFET)	141
-brug	72	gevoeligheid	
-draaier	72	luidspreker	89
-hoek	51, 52, 53, 54, 56, 64, 201	meetinstrument	186
-verschilmeting	201	golflengte	50
-verschuiving	51, 52, 53, 54, 56, 64, 172	golflengte	
FET	137	geluidsgolven	85
filter		licht	147
-coëfficiënten	168	golfweerstand	66, 79
-factor	72, 75	coaxiale kabel	82
flipflop	121	tweedraads geleider	82, 83
floating point-getal	211	Greinacher-schakeling	100
foon	88	grensfrequentie	58, 64, 66, 73
fotocel		groeplooptijd	172
gasgevuld	149	grondgolf	83
vacuüm	149	gyrator	158
foto		H	
-diode	148	Hall	
-multiplierbuis	150	-constante	145
-stroom	147	-generator	144
-transistor	148	-spanning	145
-voltaïsche cel	148	halve	
Fourier-reeks	77	-aftrekker	235
blokgolf	77, 79	-opteller	234
driehoeksspanning	77	harmonische	83
dubbelfasige gelijkrichting	78	Hartley	
trapeziumspanning	78	-oscillator	123
willekeurige periodieke golfvorm	77	-tegenfase-oscillator	124
zaagtandspanning	78	henry	42
foutcorrectie	185	hersteltijd	183
frequentie	49	hexadecimaal talstelsel	208
-deler, asynchroon	224	hoeveelheid elektriciteit	18
-vergelijking	201	hoogdoorlaat	
functiegenerator	164	-duo-netwerk	76
fword	210	-fasedraaier	165
G		-filter, actief	166
gasgevlude fotocel	149	-filter, LC	67
Gauss-filter	166	-filter, RC	65
geleiding	17, 52, 54, 57	-filter, RL	65
gelijkrichter		H-parameters	107
driefasig dubbelzijdig	96	hysteresis	156
driefasig enkelzijdig	95	I	
eenfasig dubbelzijdig	95	identiteit	212
eenfasig enkelzijdig	94	IEEE-formaat	211
tweefasig enkelzijdig	94	ijking	186
gelijkrichtwaarde	188	ijzer	
geluids		-doorsnede	68
-druk	87	-verliezen	69
-drukkniveau	88	-vulfactor	68
-intensiteit	88	impedantie	66
-snelheid	85, 86	-transformator	153

INDEX

implicatie	214	kristaloscillator	
indringdiepte	84	hoge frequenties	126
inductantie	53, 54, 56	lage frequentie	125
inductie	42	zeer hoge frequenties	126
-spanning	68	kritisch gedempt filter	166
inductieve		kruisspoelmeter	191
blindspanning	53, 56	kwaliteitsfactor	55, 58, 126, 171
blindstroom	54		
koppeling	126	L	
schijnweerstand	53, 54	laad	
verhitting	84	-spanning	30
ingangs		-stroom	30
-condensator	118	laagdoorlaat	
-weerstand	66, 203	-duo-netwerk	73, 76
inhibitie	215	-fasedraaier	165
inregeltijd	174	-filter, actief	166
instrumentatieversterker	155	-filter, LC	66
integer	210	-filter, RC	64
integrator	71, 155	-filter, RL	65
integrerende regelaar	175	lading (condensator)	33
intermodulatiegraad	204	latch	218
inverterende versterker	153	LC	
inwendige weerstand	27, 28	-afvlakking	100
meetinstrument	186	-banddoorlaatfilter	74
I-regelaar	175	-bandsperfilter	75
		-hoogdoorlaatfilter	67
J		-kring	72, 73
JK		-laagdoorlaatfilter	66
-flipflop	218	-oscillator	123, 124, 125
-master-slave-flipflop	219	-vertragslijn	73
joule	32	LDR	147
justering	186	<i>Least Significant Bit</i>	210
		LED	151
K		leiding	
kantelfrequentie	58, 64, 66, 73	niet-verliesvrij	79
karakteristieke demping	63	verliesvrij	79
Karnaugh-diagram	216	lichtgevende diode	151
Kirchhoff		lichtgevoelige weerstand	147
eerste wet	25	licht	
tweede wet	25	-snelheid	50, 147
klasse		-stroom	148
-A versterker	130	-troom-gevoeligheid	148
-AB versterker	131, 132	<i>Light Emitting Diode</i>	151
-B versterker	131	lineaire enkelzijdige gelijkrichter	162
kleinsignaalversterking (transistor)	115	lineariteitsfout	205
klemspanning	27	lintkabel	82
knooppuntenwet	25	logaritme	60
kogelcondensator	35	logaritmische versterker	
koperverliezen	69	met diode	163
koppel		met transistor	163
-condensator	118	long real	211
-factor	44, 45	loodaccu	30
koppeling		looptijd	73
magnetisch	44	LSB	210
spoelen	43	lucht	
kortsluit		-druk	87
-spanning	69	-spleet	40
-stroom	27	luidheidsniveau	88
-vastheid	69	luidspreker	
koude weerstand	19	gevoeligheid	89
kracht in magnetisch veld	41	reikwijdte	90
kristal	223	-impedantie	89
		-scheidingsfilter	88, 89

M

maas	25
-wet	25
<i>Magnetic Dependent Resistor</i>	145
magnetisch gevoelige weerstand	145
magnetische	
(bron)spanning	38
flux	39
geleiding	40, 43
inductie	39, 68
kring	40
veldsterkte	39
weerstand	40
magnetomotantie	38
magnetomotorische kracht	38
MDR	145
meerlaags spoel (zelfinductie)	46
meet	
-bereik, uitbreiding	186, 187
-instrument	23
-instrument, nauwkeurigheid	185
-omzetter	189
-thermistor	144
Meißner-oscillator	123
mho	17
middenfrequentie	74, 75
momentane waarde	50, 187
monoflop (555)	232
monostabiele multivibrator	121, 140, 221, 222
MOSFET	141
<i>Most Significant Bit</i>	210
MSB	210
multivibrator	
astabiel	120
bistabiel	121
monostabiel	121

N

NAND	213
nauwkeurigheidsklasse	185
negatie	212
<i>Negative Temperature Coefficient</i>	143
neper	61
nettransformator	68
nibble	209
niet	212
niet-inverterende versterker	153
NIET	
-EN	213
-OF	213
nikkel-ijzer-accu	30
niveau (relatief)	61
N-kanaal-FET	137
NOR	213
not	212
NOT	
-AND	213
-OR	213
NPN-transistor	105
NTC	19, 143
-weerstand	143
nuldoorgangsdetector	
inverterend	156
niet-inverterend	156

O

octaal talstelsel	208
OF	213
-operatie	215
Ohm, wet van	17
omhoog-/omlaagteller	228
omlaagteller	228
omrekenen	
binair naar hexadecimaal	209
binair naar octaal	209
decimaal naar binair	208
decimaal naar hexadecimaal	209
decimaal naar octaal	208
filtercoëfficiënten	170
onbelaste spanning	27
ontlaad	
-spanning	30
-stroom	30
opamp	153
openingshoek	180
operationele versterker	153
opteller voor dual-code	235
optelschakeling	154
optocoupler	152
OR	213
ordinaal	211
oscillator	122
Colpitts- (I)	124
Colpitts- (II)	124
ECO-	125
Hartley-	123
LC-	124, 125
Meißner-	123
tegenfase-Hartley-	124
Wienbrug-	122
oscilloscoop	200
overdrachts	
-coëfficiënt	173
-factor	60, 61, 89
overnamefrequentie	89
overspraakdemping	62
oversturingsfactor	119

P

parallel	
-capaciteit	64
-kring	58, 59, 74, 75
-resonantiefrequentie	125
-weerstand	24, 187
parallelschakeling	
condensatoren	37
elementen	28
spoelen	44
weerstand	20, 22
pascal	87
PD-regelaar	176
Peltier-element	146
periode	
-duur	49, 70
-tijd	70
permeabiliteit	39, 84
permeantie	40, 43

permittiviteit	34, 82	ruis	85
relatieve	34	-gegal	85
vacuüm	34	-spanning	85
PID-regelaar	177	-temperatuur	85
piek		-vermogen	85
-factor	188		
-waarde	187	S	
pi-netwerk	66, 67	schakelaar	
PI-regelaar	177	normally closed	220
P-kanaal-FET	137	normally open	220
plaatcondensator	34	schakelspanning, vierlagendiode	179
PNP-transistor	105	schakeltransistor	119
poolpaar	49	scheidingsfilter	
<i>Positive Temperature Coefficient</i>	144	passief, 12 dB/octaaf	89
precisie-gelijkrichter, dubbelzijdig	162	passief, 6 dB/octaaf	88
P-regelaar	173, 175	schijnbaar vermogen	50, 189
proportionele regelaar	175	schijnweerstand	51, 53, 58
PTC	19, 144	capacitief	51, 52
-weerstand	144	inductief	53, 54
Q		Schmitt-trigger	121, 224
quad	210	555	233
qword	210	inverterend	157
		niet-inverterend	158
R		schuifregister	229
rate-effect	182	serie	
RC		-capaciteit	64
-afvlakking	99	-kring	57, 74, 75
-hoogdoorlaat-fasedraaier	122	-resonantiefrequentie	125
-hoogdoorlaatfilter	65	-verliesweerstand	59
-laagdoorlaat-fasedraaier	122	-weerstand	80
-laagdoorlaatfilter	64	-weerstand, belastbaarheid	102
reactantie	51, 56, 58	-zelfinductie	79
reactieffactor	50	serieschakeling	
reflectie	62, 81	condensatoren	37
-coëfficiënt	81	elementen	27
-demping	62, 81	spoelen	43
regelaar		weerstand	20, 21
differentiërend	176	short real	211
-driepunts-	178	shunt	
-integrerend	175	-capaciteit	79
PD-	176	-geleiding	80
PI-	177	-weerstand	24, 187
PID-	177	siemens	17
proportioneel	175	sign	210
tweepunts-	178	sinusgenerator	122, 165
regelkring	173	skin-effect	84
regelsysteem		sleepcontact	191
eerste-orde	173	snubber-netwerk	183
proportioneel	173	solenoïde	46
reikwijdte, luidspreker	90	sommeervesterker	154
relatief niveau	61	soortelijke	
reluctantie	40	elektrische geleiding	18
rendement	32	elektrische weerstand	18
resonantie	57, 58	warmte	87
-frequentie	58, 171	spannings	
-frequentie, variabel	63	-aanpassing	27
-methode	194	-afhankelijke weerstand	145
rimpelspanning	98, 99	-begrenzing	93
RL		-bron, parallelschakeling	28
-hoogdoorlaatfilter	65	-bron, serieschakeling	28
-laagdoorlaatfilter	65	-deler, belast	23
RS-flipflop	218	-deler, onbelast	22
		-dempingsfactor	59
		-foutmethode	190

-overdrachtsfactor	60	thermistor	143
-tegenkoppeling	129	thyristor	180, 181, 182
-terugwerking	107	gelijkstroomontsteking	181
-val	20	wisselstroomontsteking	182
-verdubbeling	100	tijdconstante	71, 174
-verhouding	72	condensator	48
-vermenigvuldiging	101	spoel	47
sper		timer-IC 555	231
-bereik	73	toerental	49
-spanning, diode	97	top-top-waarde	50
-weerstand, diode	91	topwaarde	50, 187
sperlaag-FET	137	toroïde	47
spoel		transformator	68
parallelschakeling	44	-verliezen	69
serieschakeling	43	transistor	
staande golf-verhouding	82	kleinsignaalversterking	115
stabilisatie		-belastinglijn	115
-factor	102	-bipolair	105
-schakeling	101	-dissipatie	113
stapresponsie	173	-dynamische versterking	105
stationaire eindwaarde	173	-gelijkstroomversterking	105
steilheid	137	ingangswaerstand, dynamisch	106
ster		ingangswaerstand, statisch	106
-driehoektransformatie	26	instelling werkpunt	113
-schakeling	26	-schakelaar	119
stopbereik	73	statische versterking	105
stroom	17	uitgangswaerstand, dynamisch	106
-aanpassing	27	uitgangswaerstand, statisch	106
-belastbaarheid, diode	96	verliesvermogen	113
-dempingsfactor	59	vierpool-parameters	107
-dichtheid	18	wisselstroomversterking	106
-foutmethode	189	transmissieweg	63
-kring	25	triac	180, 182
-overdrachtsfactor	60	tunneldiode	104
-spanningomzetter	159	tweepuntsregelaar	178
-tegenkoppeling	117, 118, 128	tword	210
-versterker, inverterend	159		
susceptantie	57, 58	U	
susceptantie		uitgangs	
capacitief	52, 54	-admittantie	107
inductief	54	-belastbaarheid	219
symmetrische		-condensator	118
blokgolf (met 555)	233	-weerstand	204
voeding	131	uitzettingcoëfficiënt	87
		uni-junctie-transistor	134, 135
T		V	
T		vacuüm-fotocel	149
-flipflop	219	VDR	145
-netwerk	66, 67, 73	veldeffect-transistor	137
talstelsel	207	veldlijn	39
tekenbit	210	verarmings-MOSFET	141
teller		vereffeningsstroom	28
asynchroon	224, 225	vergelijkwaerstand	24
synchroon	228	vergrotingsfactor	84
-constante	33	verliesfactor	198
temperatuur		condensator	54
-coëfficiënt	18, 19, 22, 21	spoel	55
-coëfficiënt, condensator	38	verlies	
-coëfficiënt, diode	92	-hoek	55, 198
temporary real	211	-vermogen	32
ten	210	-vermogen, diode	91
terugstromingsdemping	81	vermenigvuldiger	237
tetrade	209	statisch	237
thermische weerstand	134		

vermenigvuldigings		-rendement	32
-algoritme	237, 238	-weerstand	134
-factor	23, 24	watt	31
vermenigvuldigings	237	wattloos vermogen	50
vermogen	31	wattuur-rendement	30
maximaal	27	wederzijdse inductie	43, 44
vermogens		weerstand	17
-aanpassing	27	inwendig	27
-dempingsfactor	59	van draad	18
-meting	189, 195, 197	weerstand	
-meting, met teller	33	-draad	24
-overdrachtsfactor	60	-meting	191
verrijkings-MOSFET	141	werkpunt (transistor)	113
verschilversterker	133, 154	wet	
versterker		van Faraday	30
klasse-A	130	van Kirchhoff, eerste	25
klasse-AB	131, 132	van Kirchhoff, tweede	25
klasse-B	131	van Ohm	17
versterking	63	wetten van De Morgan	216
versterkingsfactor	61, 203	Wheatstone, brug van	191
verticale afbuiging	200	Wienbrug-oscillator	122
vertragslijn, LC	73	Wien, brug van	71
vertragingstijd	174	Wien-Robinson-brug	165
vervorming, in dB	83	wikkelrichting	44
vervormingsfactor	83, 117, 118, 200	wisselschakelaar	221
verzaadigingsspanning	119	wisselspanningsversterker	159
vierlagendiode	179	FET	140
vierpool	62	word	210
Villard-schakeling	100		
volgorde van bewerkingen	216	Z	
volle		zaagtandgenerator	135, 164, 179
af trekker	235	zelfinductie	42, 43, 53
opteller	234	coaxiale kabel	45
volle-schaal-waarde	185	eenlaags spoel	46
<i>Voltage Dependent Resistor</i>	145	geleider boven massavlak	45
voltmeter, meetbereik	23	meerlaags spoel	46
voorschakelweerstand	23, 186	meting	194
voortplantingssnelheid	80	spoel	43
vormfactor	188	tweeaderige kabel	46
		zelfinductiemeetbrug	
W		frequentie-onafhankelijk	199
waarheidswaarde	207	van Maxwell	198
warne weerstand	19	van Maxwell-Wien	199
warmte		zelfinductiespanning	42
-capaciteit	32	zenerdiode	101
-ontwikkeling	32	differentiaalweerstand	102

$$H = \frac{\Theta}{I} = \frac{I \cdot N}{l} \quad F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f^2(t) dt} \quad f = \frac{1}{T} \quad [f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$$

Herbert Bernstein

$$I = \oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \eta = \frac{P}{P_{ges}} = \frac{R_{in} \cdot I^2}{(R_i + R_{in}) \cdot I^2} = \frac{R_{in}}{R_i \cdot \left(1 + \frac{R_{in}}{R_i}\right)} = \frac{\frac{R_{in}}{R_i}}{1 + \frac{R_{in}}{R_i}}$$

Elektronica-zakboek

Alle belangrijke elektronicaformules onder handbereik

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{F \cdot s}{I \cdot t}$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$W = P \cdot t = \frac{U^2 \cdot t}{R} = I^2 \cdot R \cdot t$$

Dit boek is een naslagwerk met praktijkgeoriënteerde formules en tabellen – en geen leerboek met uitvoerige uitleg. De schrijver heeft ook voor gecompliceerde vraagstukken handzame verklaringen, benaderingsformules en rekenvoorbeelden ontwikkeld zonder daarbij zijn toevlucht tot simplificaties te nemen.

De logische indeling in 10 hoofdstukken vergemakkelijkt het opzoeken en vinden van de gewenste thema's. In elk hoofdstuk treft u steeds de vereiste wis- en natuurkundige formules aan alsmede de belangrijkste tabellen.

- **Gelijkstroomkringen** (inclusief de beginselen van de elektrotechniek)
- **Wisselstroomkringen**
- **Dioden** (berekeningen, toepassingen en gelijkrichtschakelingen)
- **Bipolaire transistoren**
- **Veldeffecttransistoren** (met schemavoorbeelden en berekeningen)
- **Speciale componenten** (zoals PTC, NTC, VDR)
- **Operationele versterkers en hun basisschakelingen**
- **Vermogenselektronica**
- **Meettechniek** (nauwkeurigheid, correcties, analoge en digitale meetapparaten)
- **Digitale technieken en binaire signaalwaarden**

De verzameling formules omvat alle belangrijke details voor ingenieurs en technici in de elektrotechniek en elektronica die zich met onderzoek, ontwikkeling en service bezig houden; daarnaast is het echter ook bedoeld als naslagwerk voor leerlingen, studenten en onderwijzers aan technische universiteiten en in het beroepsonderwijs – en zeker ook voor de serieuze hobbyist.

ISBN 978-90-5381-281-5



9 789053 812815

/Elektor International Media B.V.

Postbus 11

6114 ZG Susteren

www.elektor.nl

