

9 Oefeningen

9.1 Opgaven

Oefening 1

Ontwerp een inverterende versterker met een ideale opamp met de volgende specificaties:

- spanningsversterking: 33
- ingangsweerstand: $10\text{k}\Omega$
- voedingsspanning: +15V en -15V

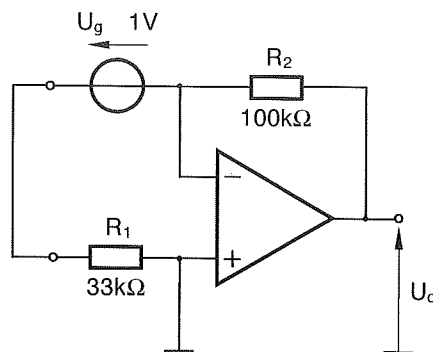
Oefening 2

Er wordt gevraagd om een buffertrap te bouwen met een ideale opamp. De gevraagde specificaties zijn de volgende:

- mag alleen de AC-componente van het ingangssignaal doorlaten
- ingangsweerstand: $50\text{k}\Omega$
- asymmetrische voedingsspanning: +12V

Oefening 3

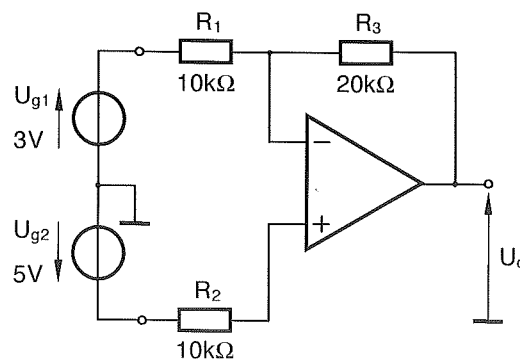
Hoe groot is U_o ?
(opamp ideaal)



Figuur 9.1

Oefening 4

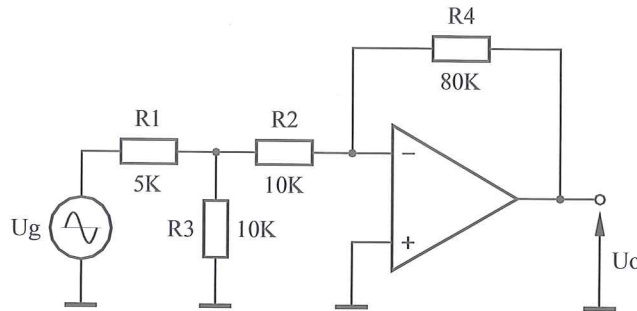
Bepaal de uitgangsspanning van de volgende schakeling. De operationele versterker mag als ideaal beschouwd worden.



Figuur 9.2

Oefening 5

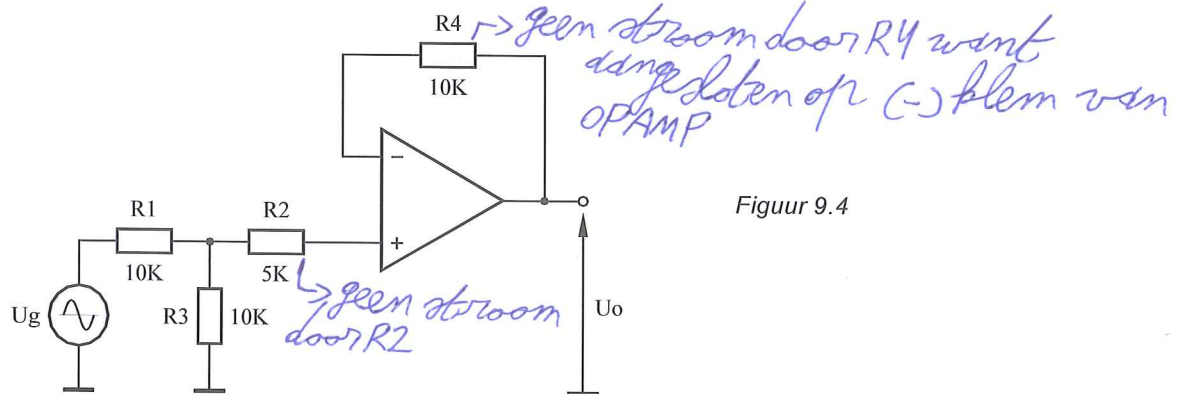
Bereken de spanningsversterking en de ingangsweerstand van de volgende schakeling met ideale opamp.



Figuur 9.3

Oefening 6

Bereken de spanningsversterking en de ingangsweerstand van de volgende schakeling met ideale opamp.



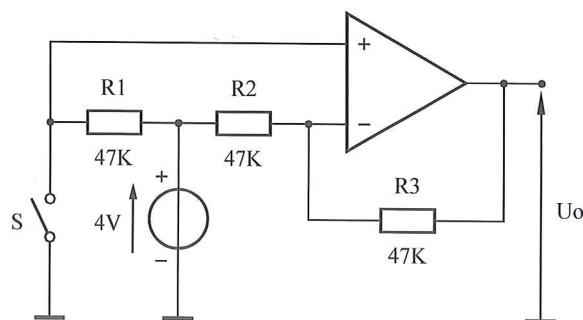
Figuur 9.4

Oefening 7

Bepaal de uitgangsspanning met de schakelaar S open en gesloten.

De operationele versterker mag ideaal verondersteld worden.

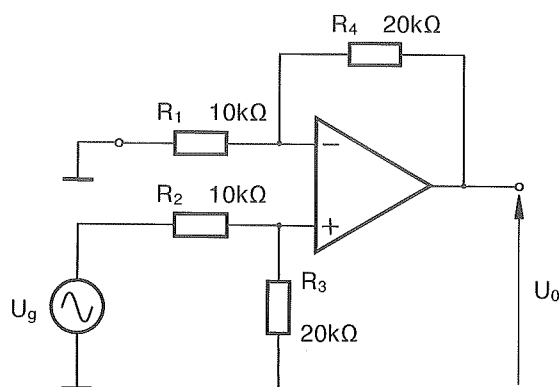
Voor welke toepassing zou men deze schakeling kunnen gebruiken?



Figuur 9.5

Oefening 8

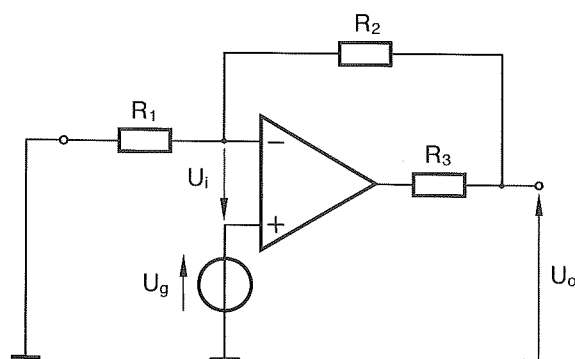
Wat is de spanningsversterking en de in- en uitgangsweerstand van deze versterker met ideale opamp?



Figuur 9.6

Oefening 9

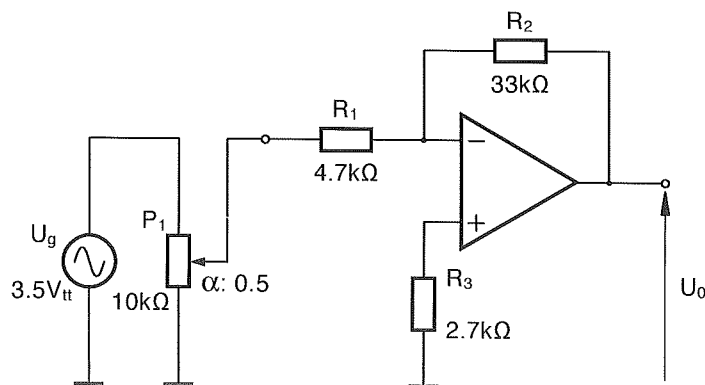
Bereken theoretisch de spanningsversterking en de uitgangsweerstand van de volgende versterker met ideale opamp.



Figuur 9.7

Oefening 10

Hoe groot is het uitgangssignaal van deze schakeling?
De operationele versterker heeft ideale eigenschappen.



Figuur 9.8

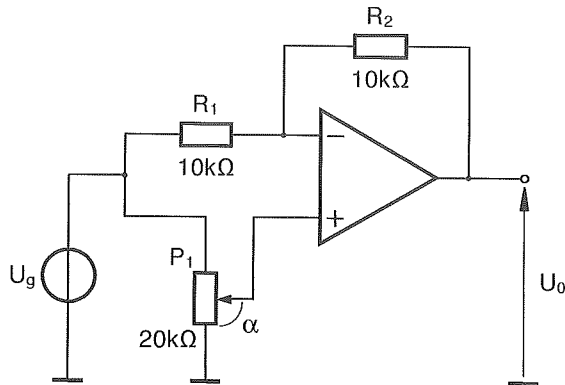
Oefening 11

Bereken en schets het verloop van de spanningsversterking A_{uf} i.f.v. de potentiometerstand α .

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Loper onderaan: $\rightarrow \alpha = 0$

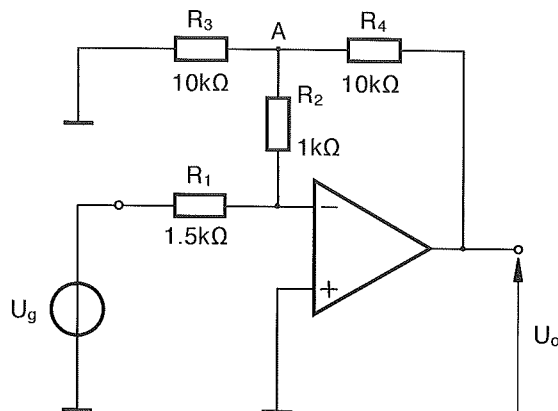
Loper bovenaan: $\rightarrow \alpha = 1$



Figuur 9.9

Oefening 12

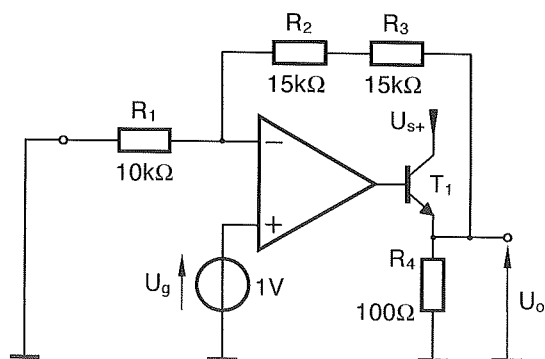
Bereken van onderstaand schema de uitgangsspanning U_o i.f.v. U_g . De eigenschappen van de componenten mogen hierbij ideaal worden verondersteld.



Figuur 9.10

Oefening 13

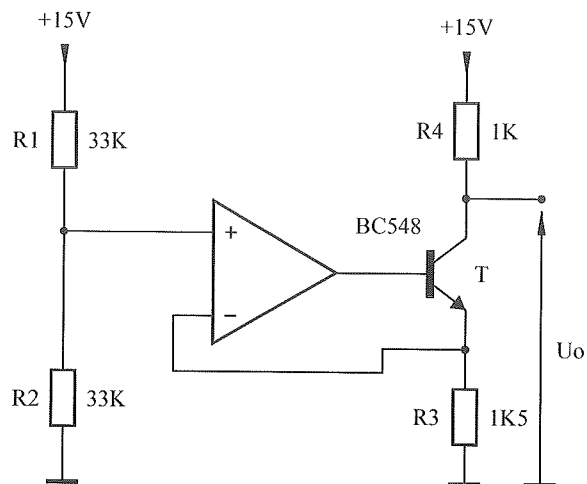
U_o bij ideale componenten?



Figuur 9.11

Oefening 14

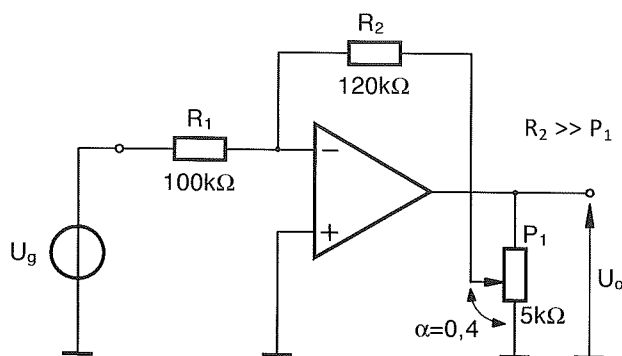
Bepaal de uitgangsspanning U_o van de volgende schakeling met ideale opamp.



Figuur 9.12

Oefening 15

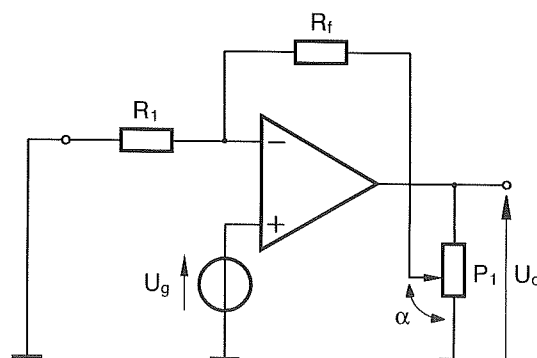
Bereken van onderstaand schema de spanningsversterking A_{uf} met $\alpha = 0.4$. Hierbij is α de stand van de looper van potentiometer P_1 . De eigenschappen van de componenten mogen hierbij ideaal worden verondersteld. We veronderstellen $R_2 \gg P_1$.



Figuur 9.13

Oefening 16

Bereken en schets het verloop van de versterking A_{uf} i.f.v. α indien $R_f = R_1$ en ideale componenten. We nemen ook aan dat $P_1 \ll R_f$.

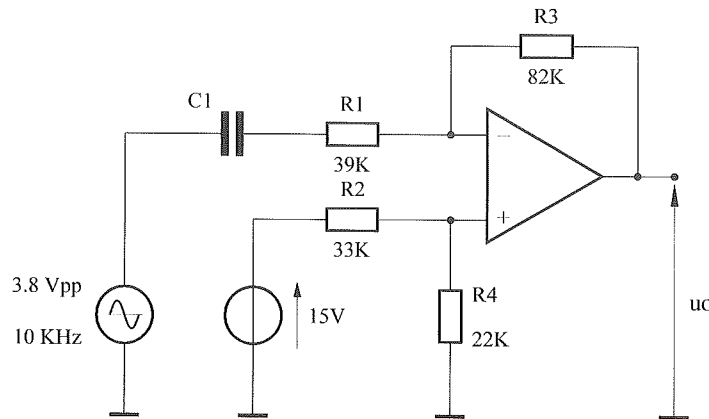


Figuur 9.14

Oefening 17

Bereken en schets het verloop van de uitgangsspanning U_o i.f.v. de tijd van de volgende opampschakeling.

De opamp is ideaal en de condensator C_1 is een ideale condensator (kortsluiting voor AC).

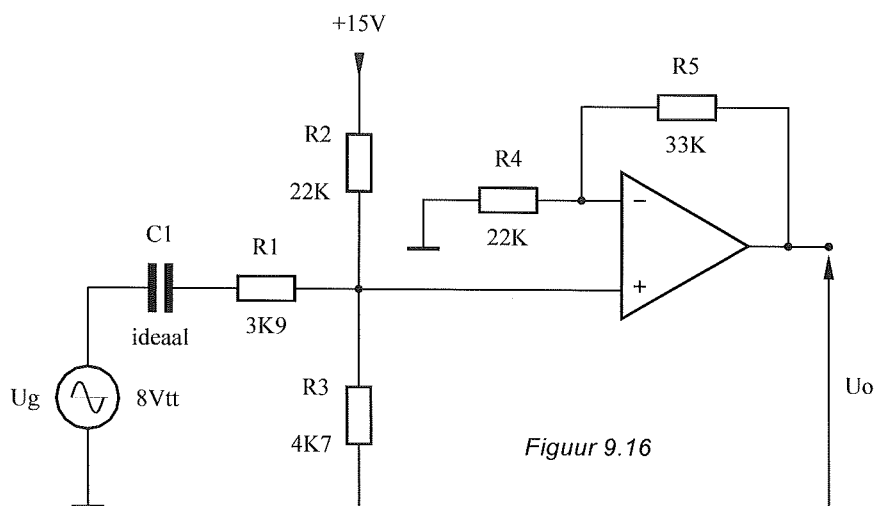


Figuur 9.15

Oefening 18

De opamp in de volgende schakeling is ideaal en wordt symmetrisch gevoed met +15V en -15V.

Teken het uitgangssignaal U_o en hetingangssignaal U_g i.f.v. de tijd.



Figuur 9.16

Oefening 19

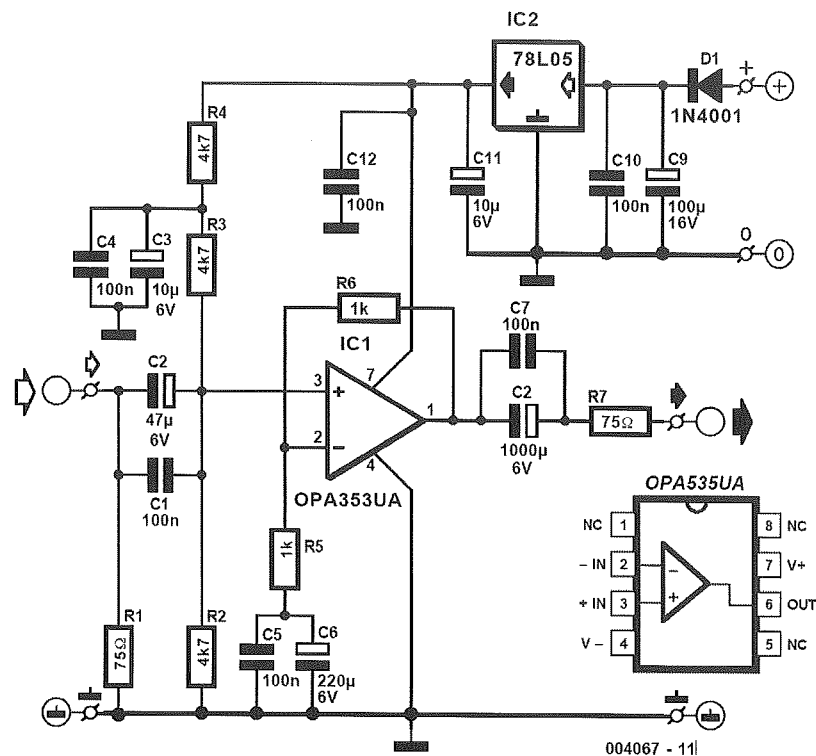
Video line driver

Een video line driver is een circuit bedoeld om basisband videosignalen (CVBS, *composiet videosignaal*) te versterken om ze via een coaxiale kabel te kunnen verbinden met standaard videoapparatuur.

Videosignalen (analoog) hebben standaard de volgende eigenschappen:

- maximale amplitude $1V_{tt}$
- frequentiebereik van 50Hz tot 5MHz
- karakteristieke impedantie van 75Ω

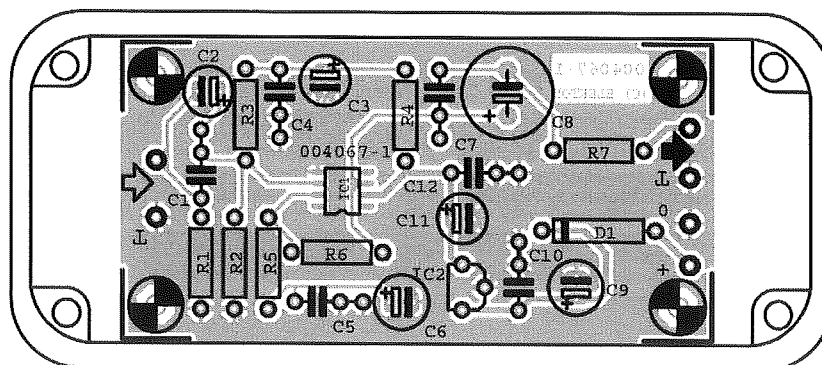
Een videobron heeft een uitgangsweerstand van 75Ω en de ingangsweerstand van een video-toestel is ook steeds 75Ω . D.w.z. dat wanneer men de uitgang van een videoapparaat verbindt met de ingang van een ander videoapparaat, het signaal steeds in grootte gehalveerd wordt. Om dit euvel te verhelpen kan men gebruik maken van een video line driver.



Figuur 9.17: video line driver (Elektor, 2001)

Probeer de volledige werking van deze praktische schakeling te achterhalen.

Ter illustratie hieronder het gemonteerde PCB (printed circuit board).



Figuur 9.18: PCB video line driver (Elektor, 2001)

Oefening 20

Ontwerp een inverterende sommatoren met een ideale opamp met de volgende eigenschappen:

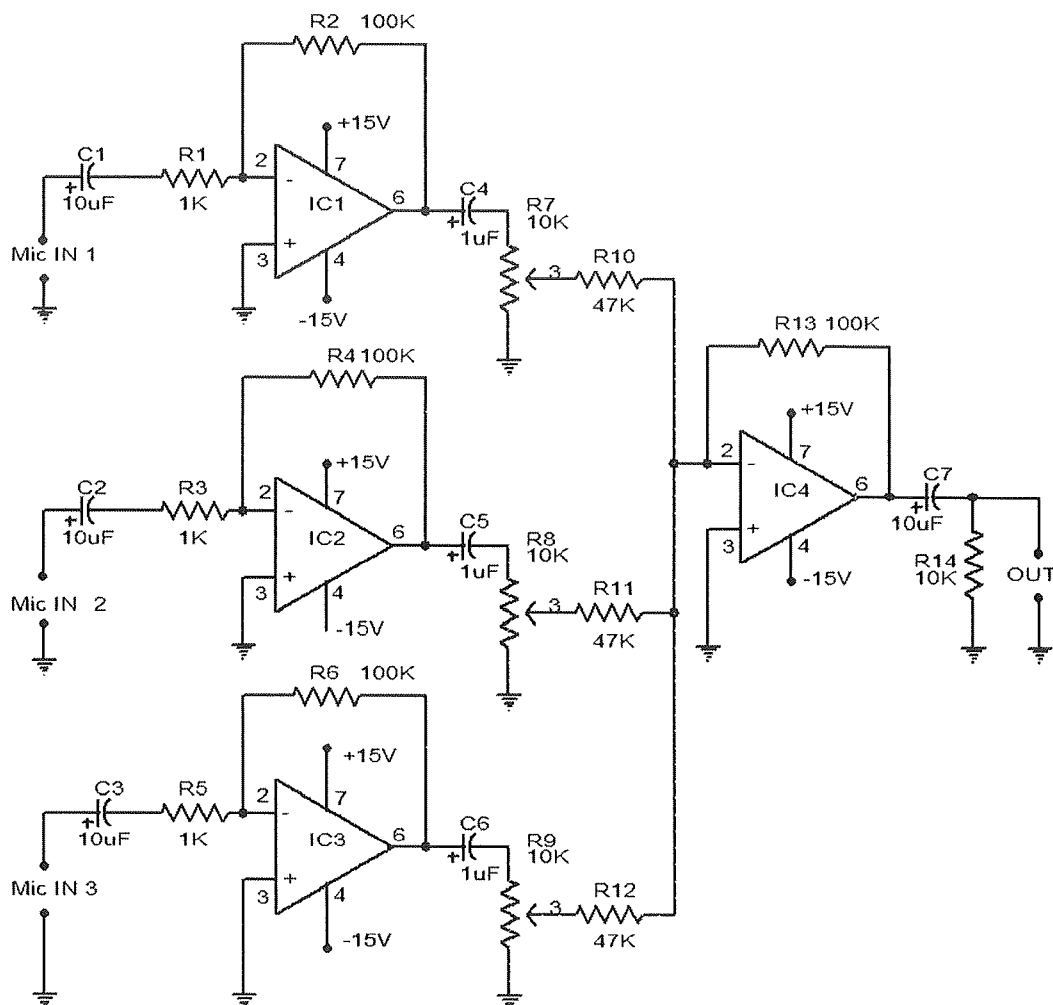
- vier ingangen U_{g1} t.e.m. U_{g4}
- ingangsweerstand U_{g1} bedraagt $20\text{k}\Omega$
- symmetrische voeding van $+15\text{V}$ en -15V
- uitgangsspanning $U_o = -(5U_{g1} + 10U_{g2} + 2U_{g3} + U_{g4})$

Oefening 21

3-kanaals audiomixer voor microfoonsignalen

Hoe werkt deze schakeling?

Wat is de functie van elk onderdeel?



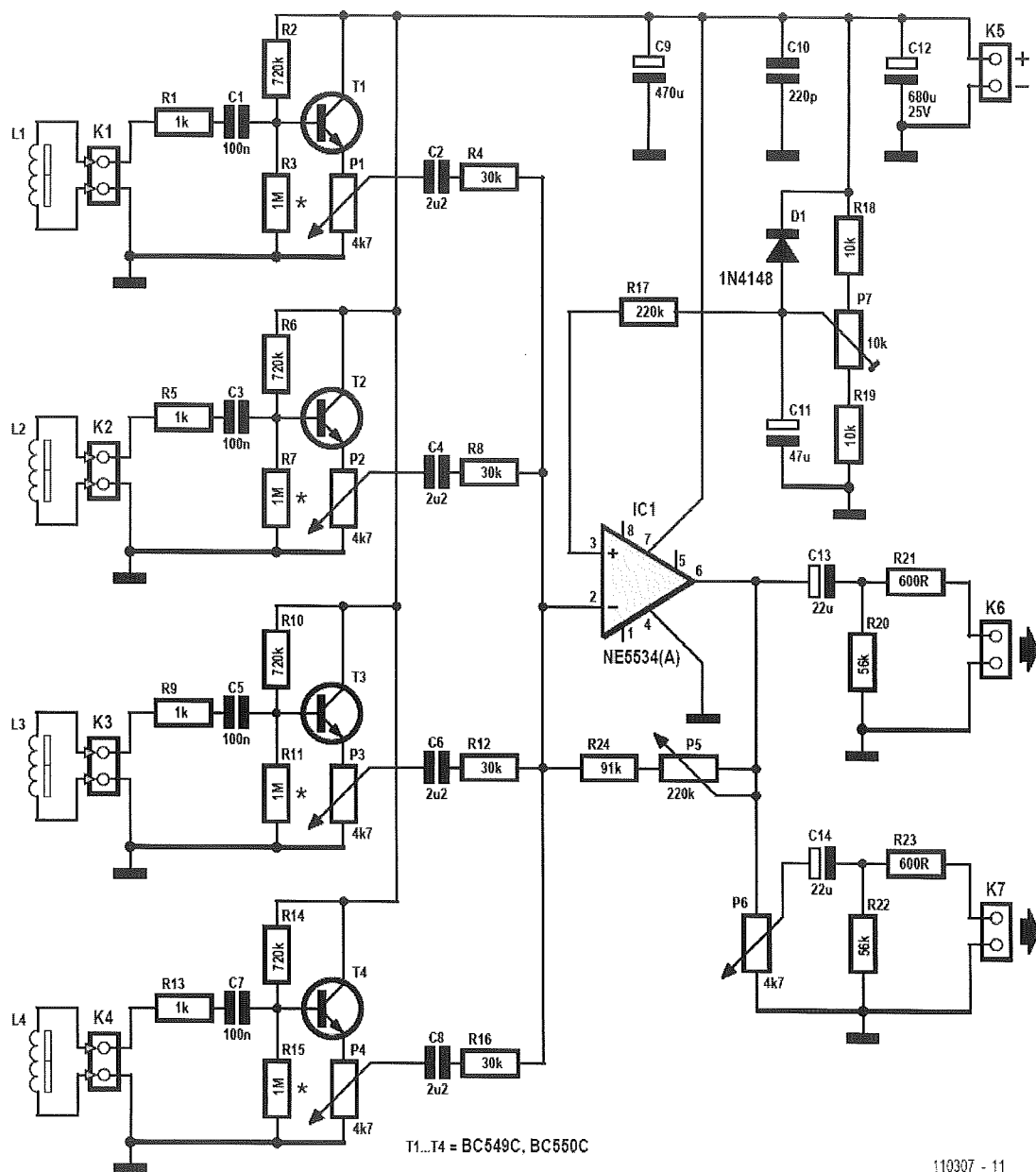
Figuur 9.19: three input microphone mixer
(circuitstoday.com, 2015)

Oefening 22

Mixer voor elektrische gitaar

Een elektrische gitaar heeft tot zes elementen die de trillingen van de metalen snaren converteren naar een elektrisch signaal. Deze sensor-signalen worden samengevoegd tot één signaal. Het niveau van elk element is best afzonderlijk regelbaar om zo het gewenste effect te bereiken.

Voer een grondige schema-analyse uit op deze schakeling (voeding tussen 12V en 24V).

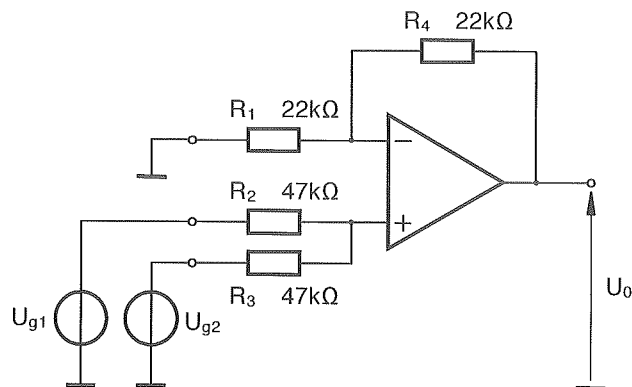


110397 - 11

Figuur 9.20: mixer voor elektrische gitaar (Elektor, 2011)

Oefening 23

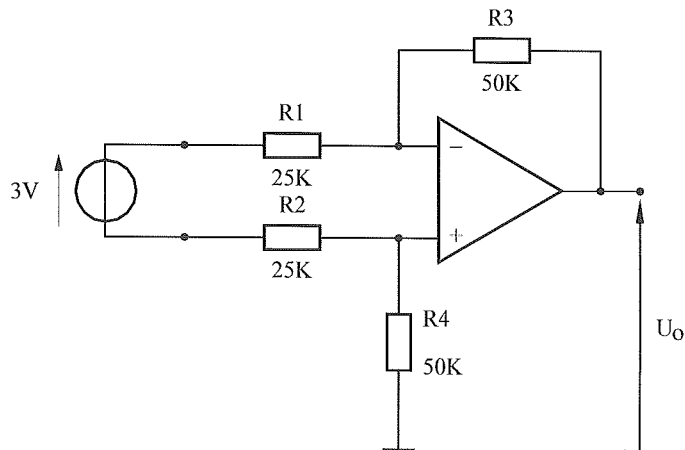
Welke functie heeft deze schakeling? Bereken het uitgangssignaal i.f.v. de ingangssignalen.



Figuur 9.21

Oefening 24

Bepaal de uitgangsspanning U_o . De operationele versterker mag worden geïdealiseerd.

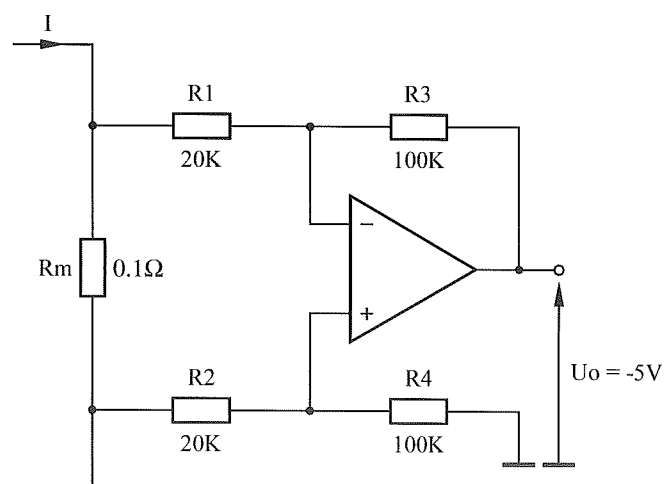


Figuur 9.22

Oefening 25

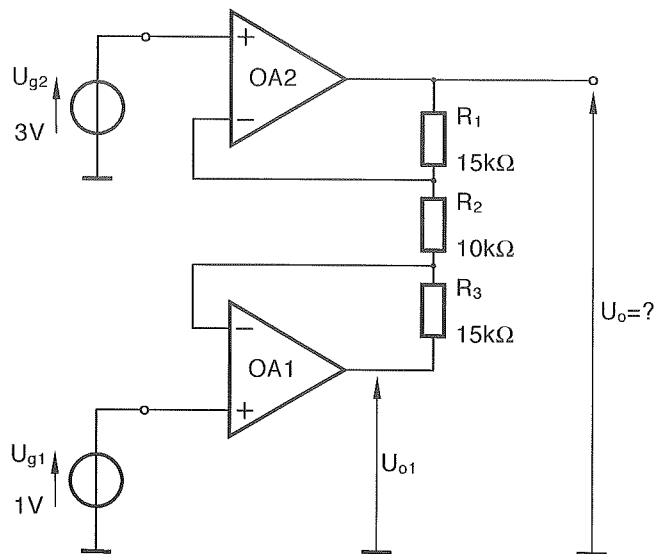
Aan de hand van de volgende schakeling wordt de stroom I door een verbruiker, die in serie geschakeld wordt met R_m gemeten.

Bepaal de stroom I door de verbruiker (schakeling uitgevoerd met een ideale opamp).



Figuur 9.23

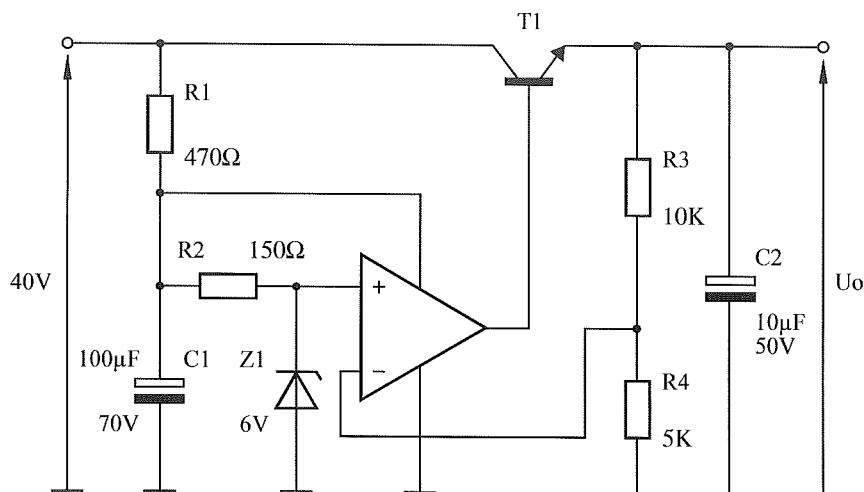
Oefening 26



Figuur 9.24

Oefening 27

Bereken de gelijkspanning die deze lineaire voeding levert aan de uitgang.
De componenten mogen als ideaal worden beschouwd.



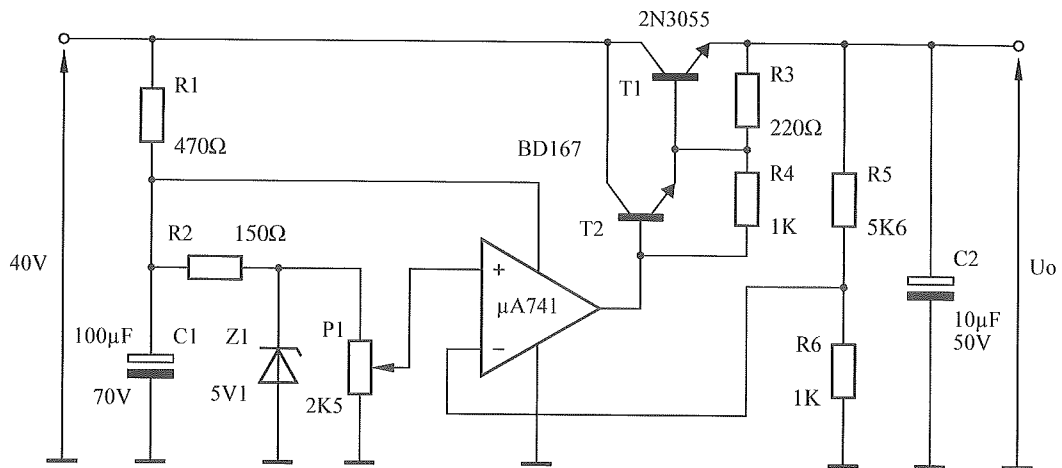
Figuur 9.25

Oefening 28

Lineaire gestabiliseerde voeding volgens figuur 9.26.

Bepaal de grootte van de uitgangsspanning U_o wanneer de loper van de potentiometer P_1 (spanningsregeling) in de middenstand staat.

Is deze voeding beveiligd tegen kortsluiting?

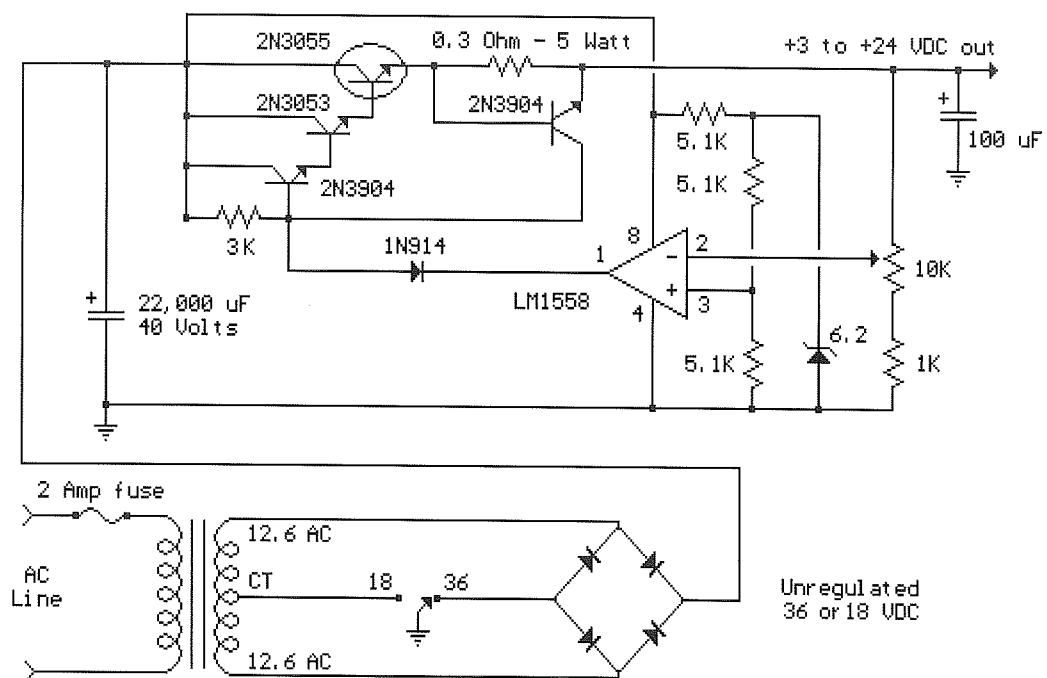


Figuur 9.26: gestabiliseerde voeding

Oefening 29

Hoeveel bedraagt de uitgangsspanning U_o indien de loper van de potentiometer in het midden staat?

Bepaal de maximum stroom die deze voeding kan leveren.



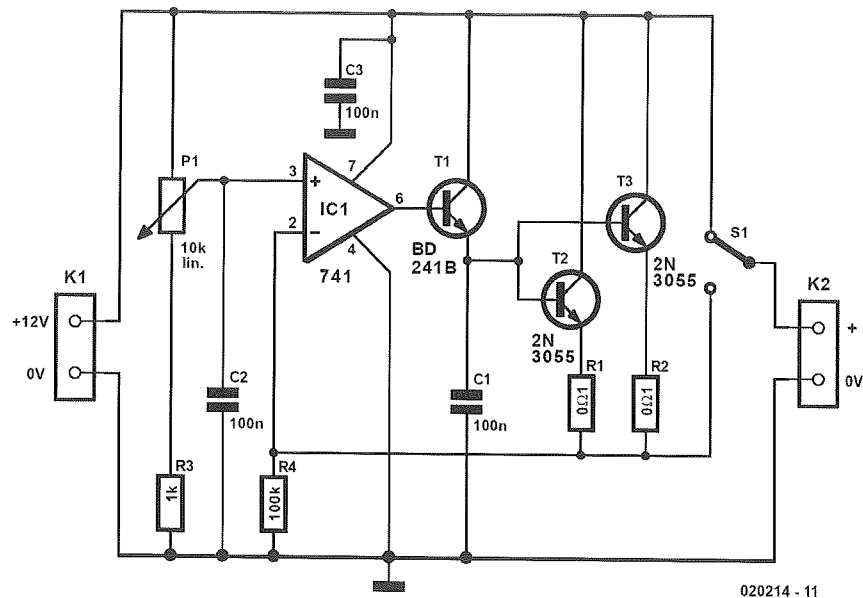
Drawn by - Bill Bowden

Figuur 9.27: lineaire voeding (www.bowdenshobbycircuits, 2015)

Oefening 30

Met deze schakeling kan men een voedingsspanning tussen 1.8V en 10V maken om allerlei toestellen van gelijkspanning te voorzien, vertrekkende van de accu spanning van 12V in de wagen.

Ga na hoe deze eenvoudige regelbare autovoeding werkt en bespreek de functie van elke component.



Figuur 9.28: regelbare autovoeding (Elektor, 2003)

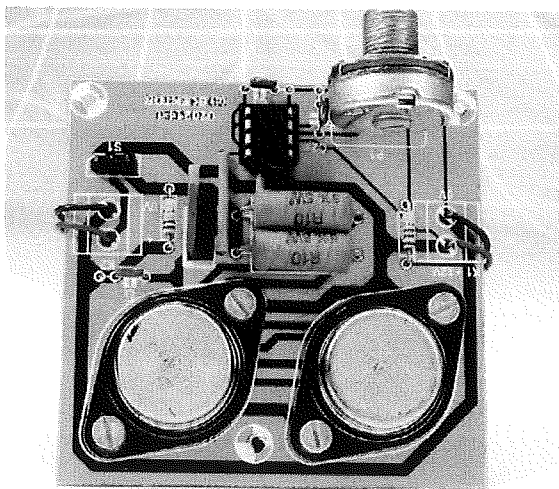
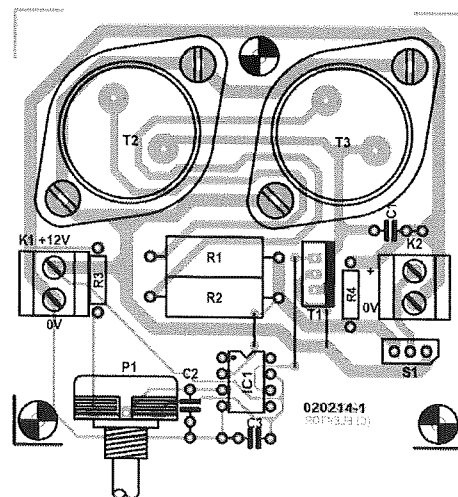


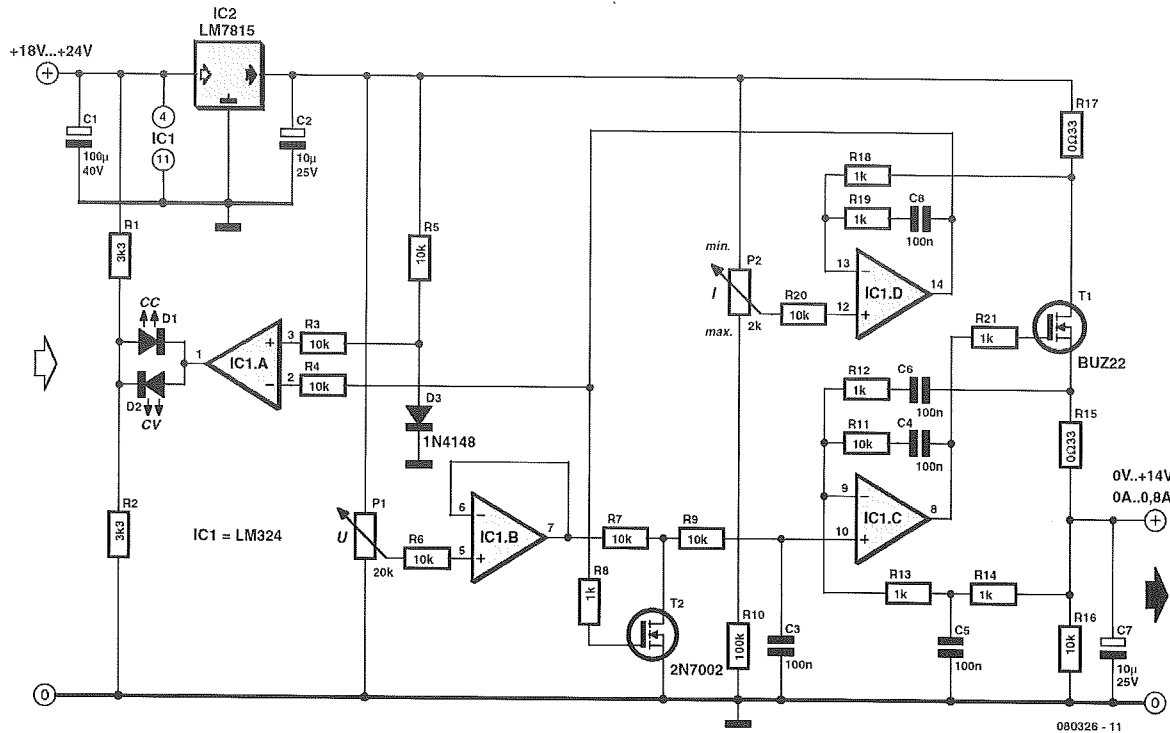
Foto 9.1: gemonteerde regelbare autovoeding (Elektor, 2003)



Figuur 9.29: PCB regelbare autovoeding (Elektor, 2003)

Oefening 31

Schema-analyse labvoeding.

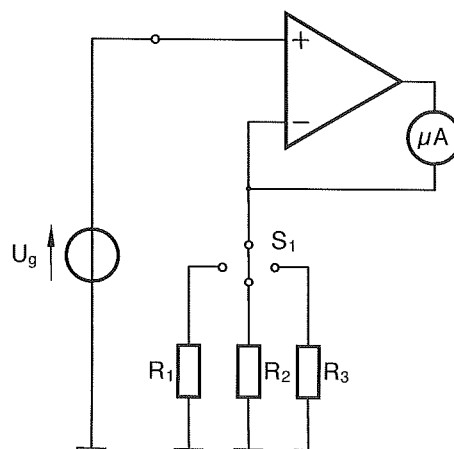


Figuur 9.30: labvoeding (Elektor, 2008)

Oefening 32

Analoge mV-meter

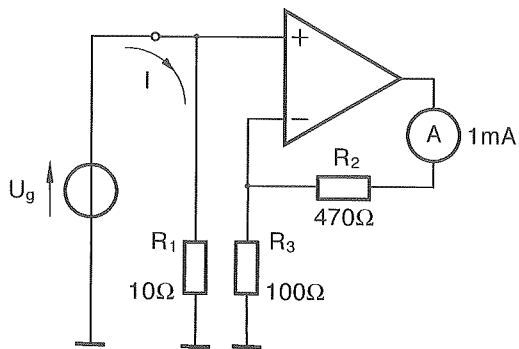
Bepaal de waarde van de weerstanden R_1 , R_2 en R_3 voor een meetbereik van respectievelijk 1mV, 10mV en 100mV. De draaispoelmeter heeft een volle schaaluitslag bij een stroom van $100\mu\text{A}$.



Figuur 9.31: analoge mV-meter

Oefening 33

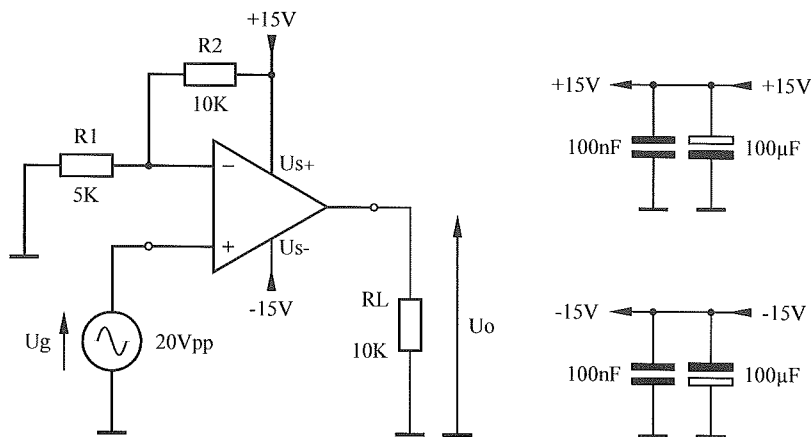
Hoe werkt deze analoge stroommeter en wat is zijn meetbereik?



Figuur 9.32: analoge stroommeter

Oefening 34

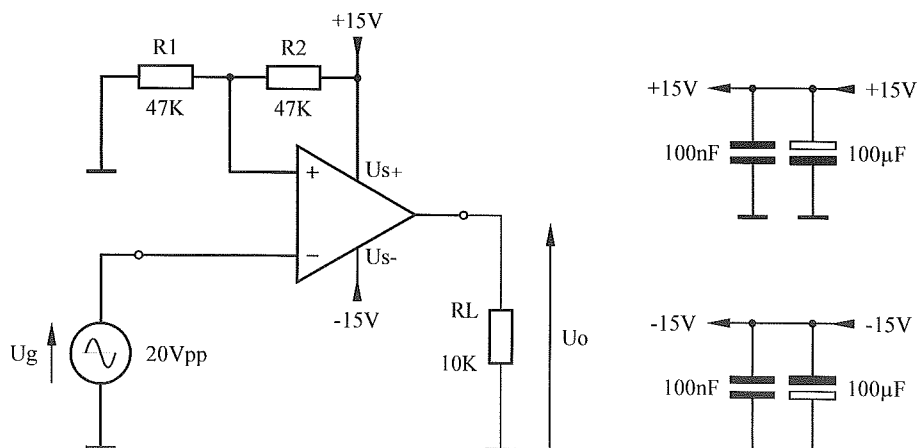
Bereken en teken het uitgangssignaal U_o van het volgende circuit met het gegeven ingangssignaal U_g . Schets op de grafiek U_o en U_g in hun juiste faseverband. De opamp is ideaal.



Figuur 9.33

Oefening 35

Teken het uitgangssignaal U_o met het gegeven ingangssignaal U_g . Schets op de grafiek U_o en U_g in hun juiste faseverband. Teken tevens de transferkarakteristiek. De opamp is ideaal.



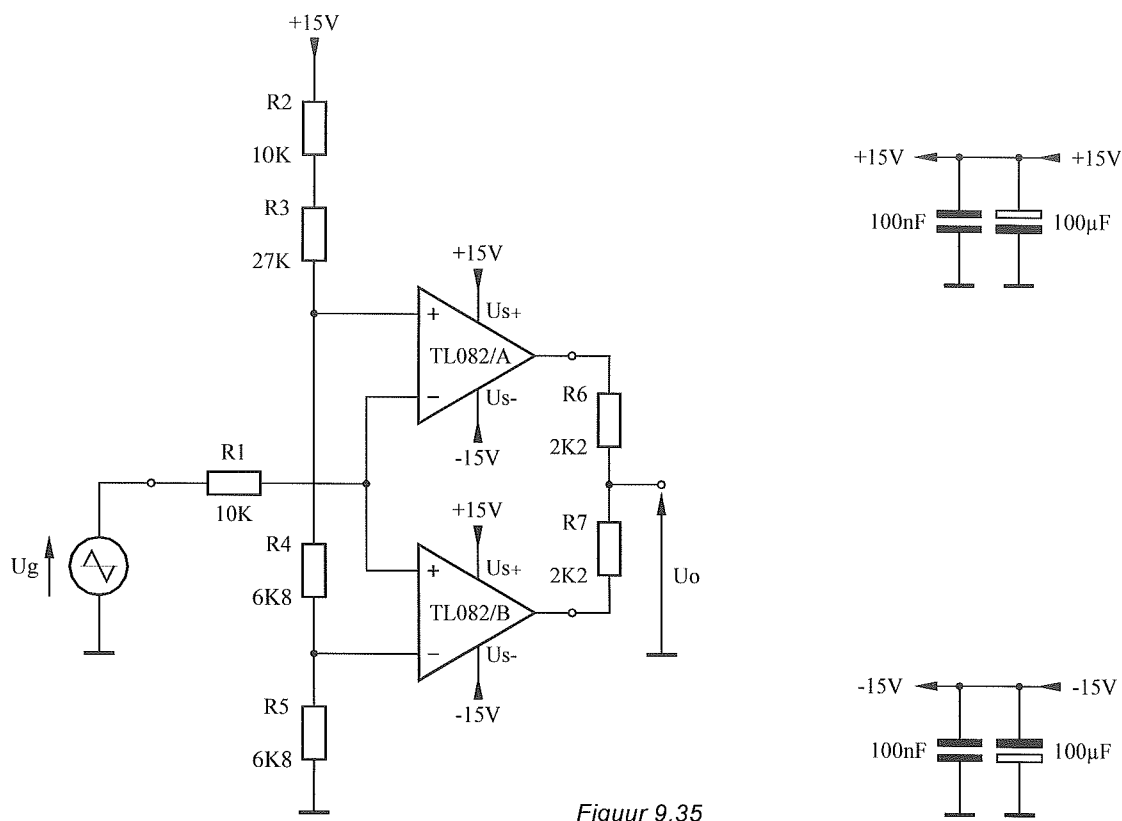
Figuur 9.34

Oefening 36

Bereken het uitgangssignaal U_o van de volgende schakeling bij een ingangsspanning U_g van 10Vpp (driehoekspanning).

Teken U_o , $U_{TL082/A}$, $U_{TL082/B}$ en U_g i.f.v. de tijd met hun juiste onderlinge faseverband.

De opamps mogen hierbij ideaal verondersteld worden.

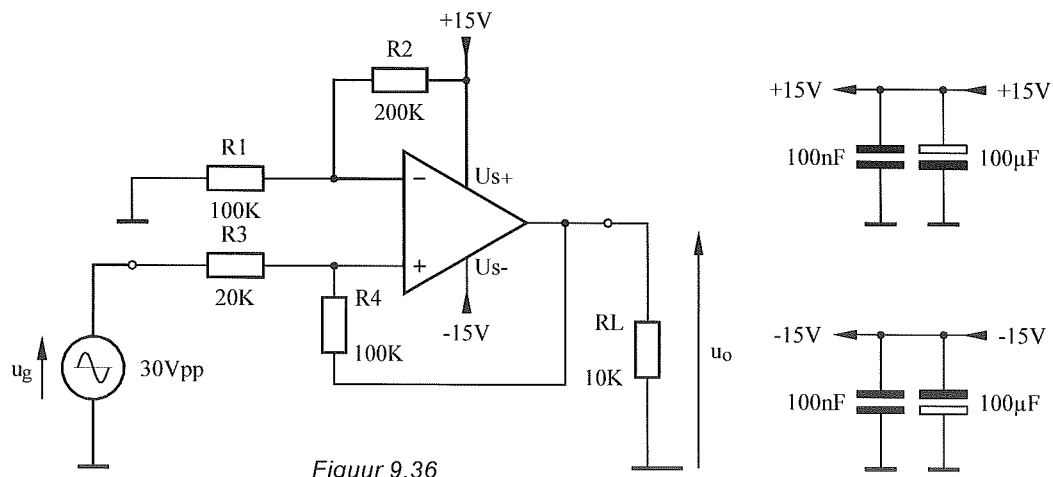


Figuur 9.35

Oefening 37

Bepaal de uitgangsspanning U_o van de volgende schakeling met ideale opamp.

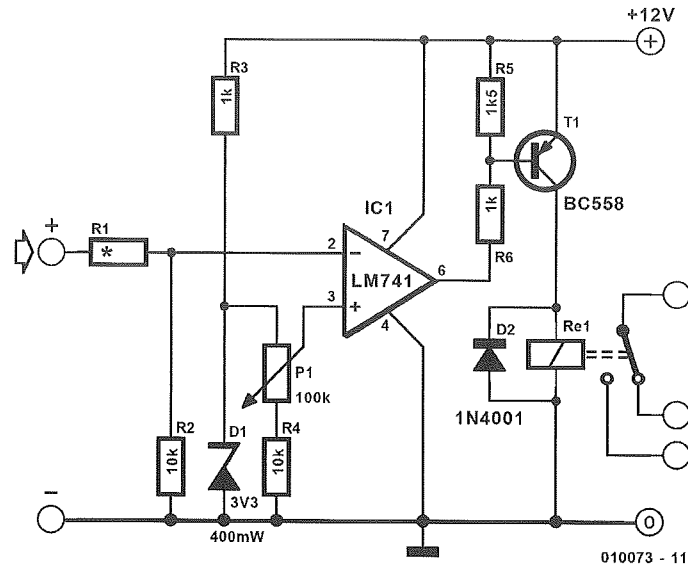
Schets het ingangssignaal U_g en het uitgangssignaal U_o op dezelfde grafiek.



Figuur 9.36

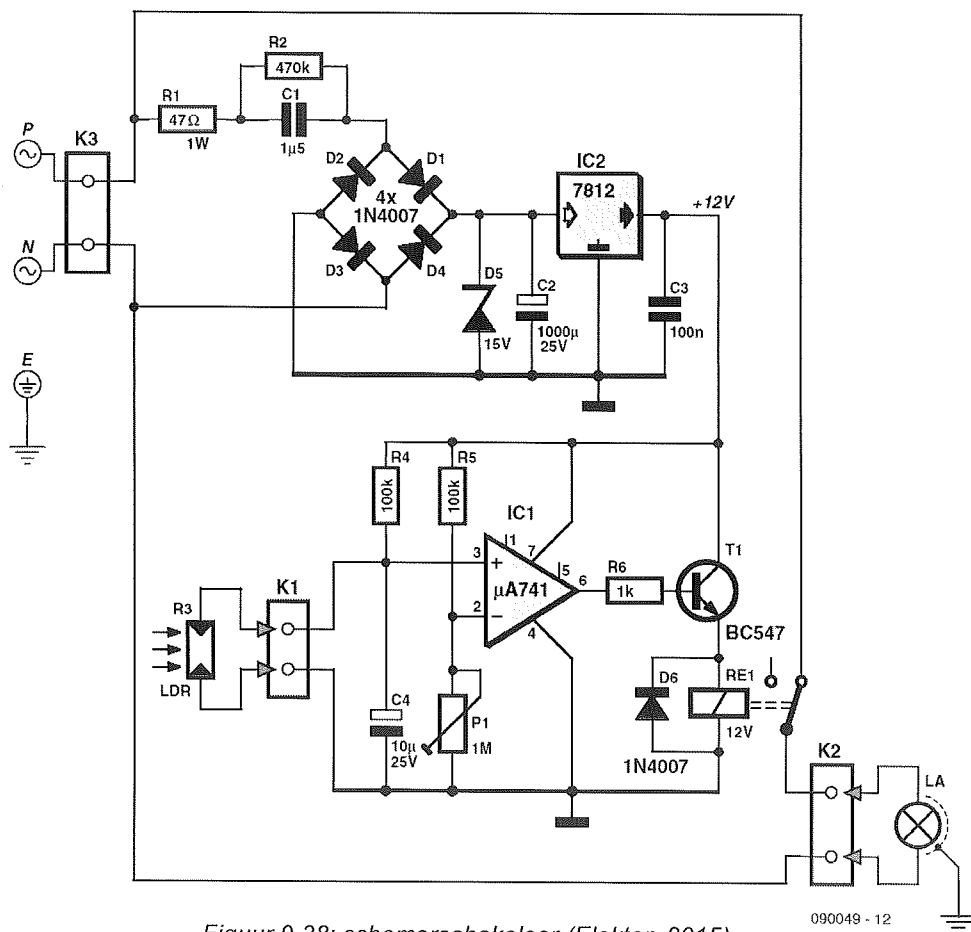
Oefening 38

De voedingsspanning van een apparaat moet aan bepaalde voorwaarden voldoen. Zo mag ze niet groter (of kleiner) dan een bepaalde waarde worden. De volgende schakeling beveiligt een apparaat tegen overspanning. Leg de werking uit in detail.



Figuur 9.37: overspanningsbeveiliging (Elektor, 2002)

Oefening 39

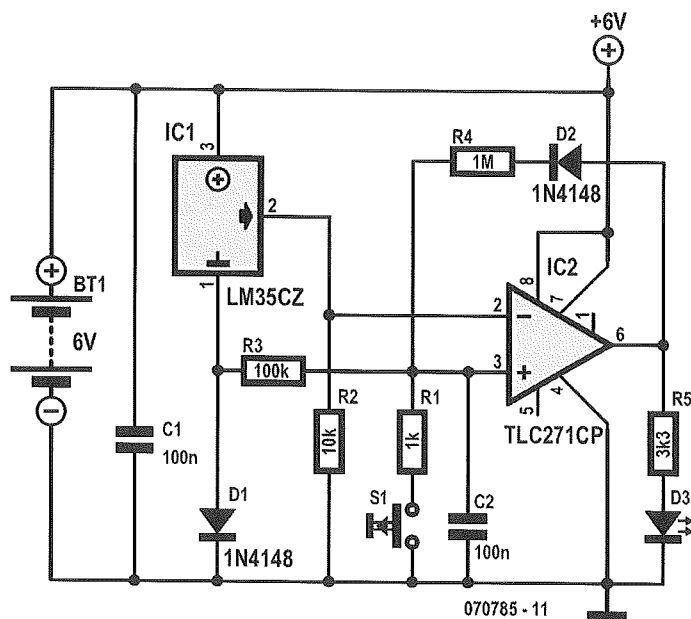


Figuur 9.38: schemerschakelaar (Elektor, 2015)

Oefening 40

Vorstdetector

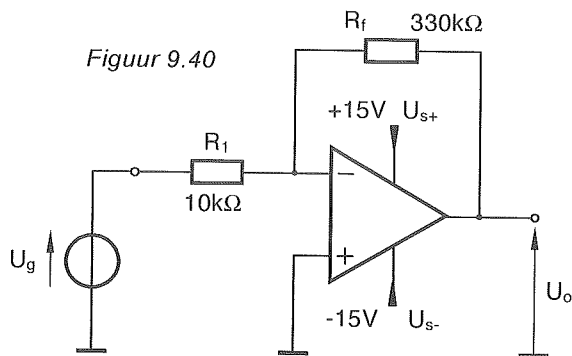
Het is handig om weten of in ruimtes zonder (of met een zwakke) verwarming de temperatuur onder het vriespunt gegaan is. In voorkomend geval kan men dan gepaste acties ondernemen. Onderstaande detector kan dit detecteren en onthouden. Zoek uit hoe deze schakeling werkt. IC₃ is een temperatuursensor van het type LM35CZ. Deze heeft een bereik van -40°C...110°C. Hij levert een spanning af die recht evenredig is met de gemeten temperatuur (10mV/°C). Bij een temperatuur van 0°C bedraagt de spanning tussen pin 2 (uitgang) en pin 1 (referentie) 0V, bij 1°C is dit 10mV, bij 10°C wordt dit 100mV enz.



Figuur 9.39: vorstdetector (Elektor, 2008)

9.2 Oplossingen oefeningen

Oplossing oefening 1



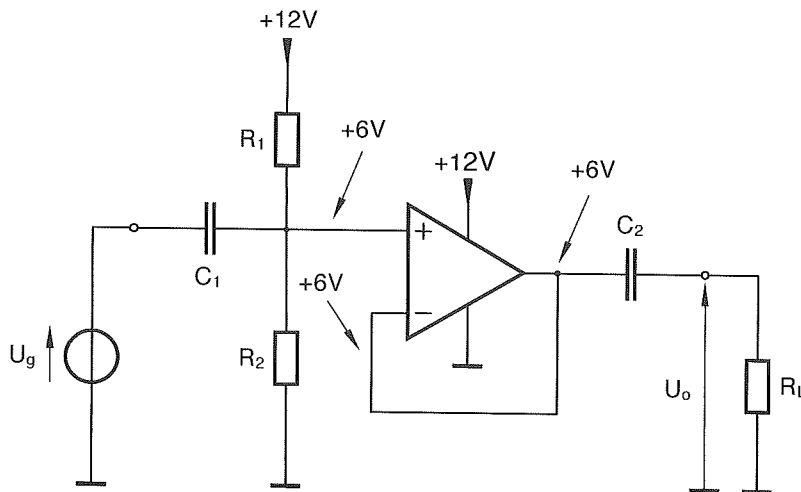
Ingangsweerstand $R_{if} = R_1 = 10k\Omega$

Versterking $A_{uf} = -\frac{R_f}{R_1}$

$R_f = -R_1 \cdot A_{uf} = -10k\Omega \cdot (-33)$

$R_f = 330k\Omega$

Oplossing oefening 2



Figuur 9.41

De condensatoren C_1 en C_2 blokkeren de DC-spanning en stroom. De weerstanden R_1 en R_2 krijgen elk een waarde van $100k\Omega$. Ze vormen een spanningsdeler die de (+) klem van de opamp op de middelpuntsspanning van 6V plaatst. De ingangsweerstand van de schakeling wordt gevormd door de parallelschakeling van R_1 met R_2 . Met de keuze van $100k\Omega$ voor deze weerstanden wordt de totale ingangsweerstand van deze schakeling $100k\Omega // 100k\Omega = 50k\Omega$.

Oplossing oefening 3

$$U_{R1} = 1V$$

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{1V}{33 \cdot 10^3 \Omega} = 30,3 \mu A = I_{R2}$$

$$U_o = I_{R2} \cdot R_2 = 30,3 \cdot 10^{-6} A \cdot 100 \cdot 10^3 \Omega$$

$$U_o = 3,03V$$

Oplossing oefening 4

$$U_{(+)} = U_{(-)} = +5V$$

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{2V}{10 \cdot 10^3 \Omega} = 200 \mu A = I_{R3}$$

$$U_{R3} = I_{R3} \cdot R_3 = 200 \cdot 10^{-6} A \cdot 20 \cdot 10^3 \Omega = +4V$$

$$U_o = U_{(-)} + U_{R3} = 5V + 4V = +9V$$

Oplossing oefening 5

$$U_{R3} = \frac{U_g}{2}; (-) \text{ klem opamp is virtuele massa}$$

$$U_o = -U_{R3} \frac{R_4}{R_2} = -\frac{U_g}{2} \frac{80 \cdot 10^3 \Omega}{10 \cdot 10^3 \Omega} = -4 \cdot U_g$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = -4$$

$$R_{if} = R_1 + (R_2 \parallel R_3) = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{if} = 5 \cdot 10^3 \Omega + \frac{10 \cdot 10^3 \Omega}{2} = 10 k\Omega$$

Oplossing oefening 6

$$U_{R3} = \frac{U_g}{2}; (+) \text{ klem opamp } \infty \text{ ingangsweerstand}$$

$$U_o = \frac{U_g}{2}; \text{ spanningsvolger}; A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = \frac{1}{2}$$

$$R_{if} = R_1 + R_3 = 10 \cdot 10^3 \Omega + 10 \cdot 10^3 \Omega = 20 \cdot k\Omega$$

Oplossing oefening 7

Schakelaar S open

Stroom door $R_1 = 0$, spanning over $R_1 = 0$

$$U_{(+)} = +4V = U_{(-)}$$

Spanning over $R_2 = 0$, stroom door $R_2 = 0$, stroom door $R_3 = 0$, spanning over $R_3 = 0$

$$U_o = U_{(-)} = U_{(+)} = +4V$$

Schakelaar gesloten

Inverterende versterker met versterking $A_{uf} = -1$

$$U_o = -U_g \frac{R_3}{R_2} = -4V \frac{47 \cdot 10^3 \Omega}{47 \cdot 10^3 \Omega} = -4V$$

Weerstand R_1 staat // met de bron en heeft geen invloed op de uitgangsspanning.

Toepassing: polariteitschakelaar

Oplossing oefening 8

$$U_o = U_{(+)} \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) = U_g \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) = U_g \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{R_1 + R_4}{R_1}$$

$$U_o = U_g \frac{20 \cdot 10^3 \Omega}{10 \cdot 10^3 \Omega + 20 \cdot 10^3 \Omega} \frac{10 \cdot 10^3 \Omega + 20 \cdot 10^3 \Omega}{10 \cdot 10^3 \Omega} = 2 \cdot U_g$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = 2$$

$$R_{if} = R_2 + R_3 = 10 \cdot 10^3 \Omega + 20 \cdot 10^3 \Omega = 30 \text{ k}\Omega$$

Uitgangsweerstand = 0Ω; ideale opamp

Oplossing oefening 9

$$U_{R1} = U_g$$

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_g}{R_1}$$

$$I_{R2} = I_{R1}$$

$$U_{R2} = I_{R2} \cdot R_2 = \frac{U_g}{R_1} R_2$$

$$U_o = U_{R1} + U_{R2} = U_g + \frac{U_g}{R_1} R_2$$

$$U_o = U_g \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

De uitgangsspanning is onafhankelijk van de uitgangsstroom dus $R_o = 0$

Oplossing oefening 10

Opgelet, potentiometer P_1 wordt belast!

Potmeter P_1 staat in middenstand dus de twee helften zijn elk $5 \text{ k}\Omega$.

$$U_{\text{loper } P1} = U_g \frac{(\alpha P_1) \parallel R_1}{(1 - \alpha) P_1 + (\alpha P_1) \parallel R_1}$$

$$U_{\text{loper } P1} = 3,5 V_{tt} \frac{5 \text{ k}\Omega \parallel 4,7 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega \parallel 4,7 \text{ k}\Omega} = 3,5 V_{tt} \frac{\frac{5 \text{ k}\Omega \cdot 4,7 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega + 4,7 \text{ k}\Omega}}{5 \text{ k}\Omega + \frac{5 \text{ k}\Omega \cdot 4,7 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega + 4,7 \text{ k}\Omega}} = 1,14 V_{tt}$$

$$U_o = -U_{\text{loper } P1} \frac{R_2}{R_1} = -1,14 V_{tt} \frac{33 \cdot 10^3 \Omega}{4,7 \cdot 10^3 \Omega} = 8,02 V_{tt}$$

Weerstand R_3 voert geen stroom en heeft geen effect op de uitgangsspanning.

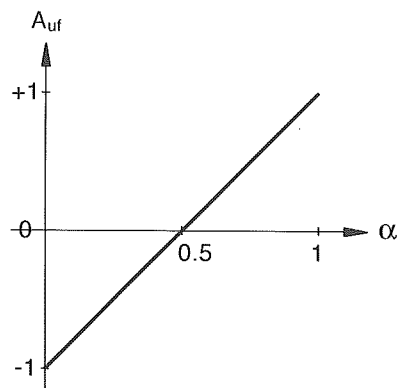
Oplossing oefening 11

$$U_o = U_{(-)} + U_{R2} = \alpha \cdot U_g + I_{R2} \cdot R_2$$

$$I_{R2} = I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{\alpha \cdot U_g - U_g}{R_1} = (\alpha - 1) \frac{U_g}{R_1}$$

$$U_o = \alpha \cdot U_g + (\alpha - 1) \frac{U_g}{R_1} R_2 = \alpha \cdot U_g + (\alpha - 1) U_g \frac{10k\Omega}{10k\Omega} = (2\alpha - 1) U_g$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = 2\alpha - 1$$



Figuur 9.42: verloop A_{uf} i.f.v. α

Oplossing oefening 12

$$U_A = U_o \frac{R_2 \parallel R_3}{R_4 + R_2 \parallel R_3}$$

Anderzijds is:

$$U_A = -U_g \frac{R_2}{R_1}$$

Gelijkstellen geeft:

$$U_o \frac{R_2 \parallel R_3}{R_4 + R_2 \parallel R_3} = -U_g \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = -\frac{R_4 + R_2 \parallel R_3}{R_2 \parallel R_3} \frac{R_2}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_2 \parallel R_3} \right)$$

$$A_{uf} = -\frac{R_2}{R_1} \left[1 + \frac{R_4}{\frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} \right] = -\frac{10^3 \Omega}{1,5 \cdot 10^3 \Omega} \left[1 + \frac{10 \cdot 10^3 \Omega}{\frac{10^3 \Omega \cdot 10 \cdot 10^3 \Omega}{10^3 \Omega + 10 \cdot 10^3 \Omega}} \right]$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = -8$$

Oplossing oefening 13

$$U_o = U_{R1} + U_{R2} + U_{R3}$$

De stroom door R_1 , R_2 en R_3 is dezelfde nl.

$$I_{R1} = \frac{U_g}{R_1}$$

$$U_o = I_{R1}(R_1 + R_2 + R_3) = \frac{U_g}{R_1}(R_1 + R_2 + R_3) = U_g \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right)$$

$$U_o = 1V \left(1 + \frac{15 \cdot 10^3 \Omega + 15 \cdot 10^3 \Omega}{10 \cdot 10^3 \Omega}\right) = 4V$$

Oplossing oefening 14

$$U_{(+)} = \frac{V_{cc}}{2} = \frac{15V}{2} = 7,5V = U_{(-)}$$

$$I_{R3} = I_{R4} = \frac{U_{(-)}}{R_3} = \frac{7,5V}{1,5 \cdot 10^3 \Omega} = 5mA$$

$$U_o = V_{cc} - I_{R4} \cdot R_4 = 15V - 5 \cdot 10^{-3} A \cdot 1 \cdot 10^3 \Omega = 10V$$

Oplossing oefening 15

$$U_{loper\ P1} \approx \alpha U_o$$

Anderzijds is:

$$U_{loper\ P1} = -I_{R2} \cdot R_2 = -I_{R1} \cdot R_2 = -\frac{U_g}{R_1} R_2$$

Gelijkstellen geeft:

$$\alpha U_o \approx -\frac{U_g}{R_1} R_2$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = -\frac{R_2}{\alpha R_1} = -\frac{120 \cdot 10^3 \Omega}{0,4 \cdot 100 \cdot 10^3 \Omega} = -3$$

Oplossing oefening 16

$$U_{loper\ P1} \approx \alpha U_o$$

Anderzijds is:

$$U_{loper\ P1} = I_{R1}(R_1 + R_f) = \frac{U_g}{R_1}(R_1 + R_f)$$

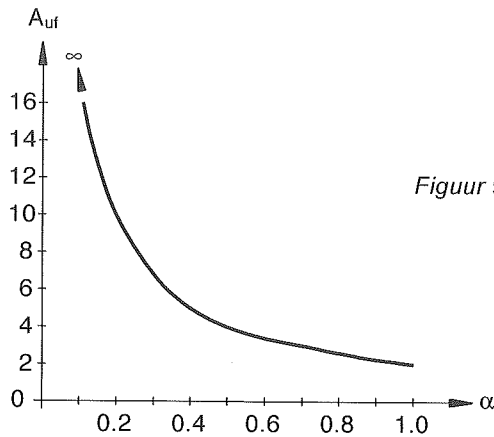
Gelijkstellen geeft

$$\alpha U_o = \frac{U_g}{R_1}(R_1 + R_f)$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = \frac{R_1 + R_f}{\alpha R_1}$$

Met $R_1 = R_f$ wordt dit:

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_g} = \frac{2}{\alpha}$$



Figuur 9.43: versterking i.f.v. loperstand potmeter

De versterking evolueert van 2 naar ∞ bij een α variërend van 1 naar 0.

Oplossing oefening 17

Toepassen superpositiemethode

DC

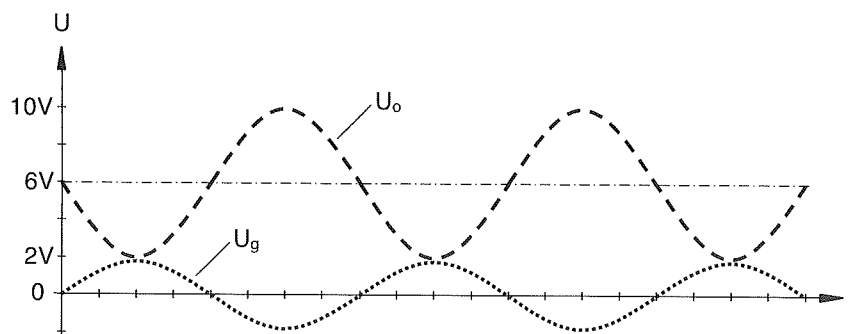
Condensator C_1 blokkeert gelijkstroom bijgevolg kan er door R_1 en R_3 geen DC-stroom vloeien.

$$U_{(+)} = U_{(-)} = U_o$$

$$U_{o(dc)} = V_{cc} \frac{R_4}{R_2 + R_4} = 15 \frac{22 \cdot 10^3 \Omega}{33 \cdot 10^3 \Omega + 22 \cdot 10^3 \Omega} = 6V_{dc}$$

AC

$$U_{o(ac)} = -U_g \frac{R_3}{R_1} = -3,8V_{tt} \frac{82 \cdot 10^3 \Omega}{39 \cdot 10^3 \Omega} = -8V_{tt}$$



Figuur 9.44: U_o en U_g oefening 17

Oplossing oefening 18

DC-instelling

$$U_{(+)\text{dc}} = +15V \frac{R_3}{R_2 + R_3} = +15V \frac{4,7 \cdot 10^3 \Omega}{22 \cdot 10^3 \Omega + 4,7 \cdot 10^3 \Omega} = +2,64V$$

$$U_{o(\text{dc})} = U_{(+)\text{dc}} \left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) = 2,64V \left(1 + \frac{33 \cdot 10^3 \Omega}{22 \cdot 10^3 \Omega} \right) = 6,60V$$

AC-uitgang

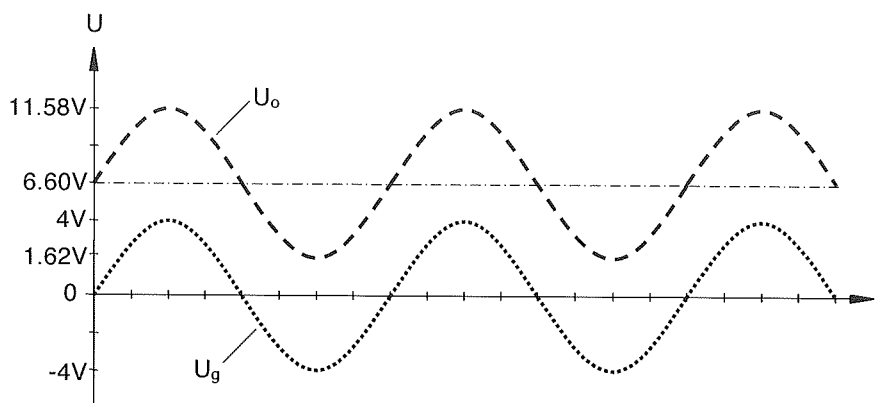
$$U_{o(\text{ac})} = U_{(+)\text{ac}} \left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) = U_{(+)\text{ac}} \left(1 + \frac{33 \cdot 10^3 \Omega}{22 \cdot 10^3 \Omega} \right) = 2,5 \cdot U_{(+)\text{ac}}$$

$$U_{(+)\text{ac}} = U_g \frac{R_2 \parallel R_3}{R_2 \parallel R_3 + R_1} = U_g \frac{22 \cdot 10^3 \Omega \parallel 4,7 \cdot 10^3 \Omega}{22 \cdot 10^3 \Omega \parallel 4,7 \cdot 10^3 \Omega + 3,9 \cdot 10^3 \Omega} = 0,498 \cdot U_g$$

$$U_{o(\text{ac})} = 2,5 \cdot U_{(+)\text{ac}} = 2,5 \cdot 0,498 \cdot U_g = 1,25 \cdot U_g = 1,25 \cdot 8V_{\text{tt}} = 9,96V_{\text{tt}}$$

$$U_{o(\text{max})} = U_{o(\text{dc})} + \frac{U_{o(\text{ac})}}{2} = 11,58V$$

$$U_{o(\text{min})} = U_{o(\text{dc})} - \frac{U_{o(\text{ac})}}{2} = 1,62V$$



Figuur 9.45: U_o en U_g oefening 18

Oplossing oefening 19

Video line driver

Het hart van de schakeling is een asymmetrisch gevoede niet-inverterende versterker gevormd rond IC_1 (OPA353UA).

Voedingsspanning

De schakeling wordt van stroom voorzien door een netadapter. Diode D_1 zorgt samen met afvlakcondensator C_9 voor een gelijkgerichte, afgevlakte ruwe gelijkspanning. De 5V wordt geleverd door de 5V spanningsregelaar IC_2 van het type 78L05. De condensatoren C_{10} en C_{11} zorgen voor de nodige ont koppeling en voorkomen oscillatiegevaar. De voedingsspanning van de opamp wordt extra ont koppeld via C_{12} .

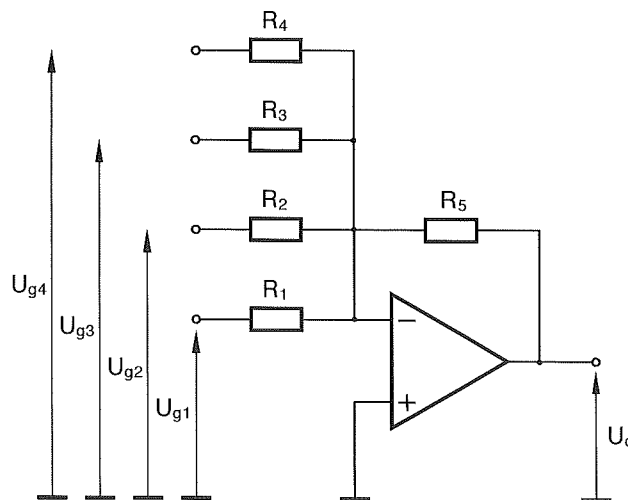
DC-analyse

Via R_2 , R_3 en R_4 wordt de (+) ingang van IC_1 op $5V/3 = 1,67V$ gezet. Bijgevolg staat ook de (-) klem en de uitgang van de opamp (pin 1) op $1,67V$.

AC-analyse

De versterking van de asymmetrisch gevoede niet-inverterende versterker wordt bepaald door R_5 en R_6 . Deze bedraagt $(1 + R_6/R_5) = (1 + 1K/1K) = 2x$. C_1 , C_2 , C_5 , C_6 , C_7 en C_8 , zijn koppel- en ontkoppelcondensatoren. Zij laten de AC-signalen perfect door maar blokkeren DC. Er wordt telkenmale een parallelschakeling van twee condensatoren gebruikt. Men doet dit omdat de elektrolytische condensatoren enkel goede eigenschappen (lage impedantie) hebben voor de lagere frequenties. De kleinere foliecondensatoren hebben een lage impedantie voor de hogere frequenties. Samen bestrijken ze het volledige frequentiegebied. Normaal is de ingangsweerstand van een niet-inverterende versterker zeer groot. De ingangsweerstand voor een video line driver hoort echter 75Ω te zijn. Dit wordt bekomen door de weerstand R_1 van 75Ω parallel te schakelen met de ingang. Zo ook is de uitgangsweerstand van een niet-inverterende trap zeer klein. Deze wordt opgetrokken naar 75Ω door de weerstand R_7 in serie met de opamp-uitgang te plaatsen. Wanneer de line driver belast wordt met 75Ω dan wordt het signaal op de belasting 2 maal kleiner dan het uitgangssignaal aan de opamp (pin 1). Dit wordt veroorzaakt door de spanningsdeling die ontstaat door de serieschakeling van de belasting van 75Ω met de weerstand R_7 van eveneens 75Ω . Doordat de niet-inverterende versterker, die $2x$ versterkt, gevolgd wordt door een 2 -deling wordt het uiteindelijke signaal op de belasting toch hetzelfde als het ingangssignaal.

Oplossing oefening 20



Figuur 9.46

$$R_1 = R_{if1} = 20k\Omega$$

$$A_{uf1} = -\frac{R_5}{R_1} = -5 \rightarrow R_5 = 5 \cdot R_1 = 5 \cdot 20k\Omega = 100k\Omega$$

$$A_{uf2} = -\frac{R_5}{R_2} = -10 \rightarrow R_2 = \frac{R_5}{10} = \frac{100k\Omega}{10} = 10k\Omega$$

$$A_{uf3} = -\frac{R_5}{R_3} = -2 \rightarrow R_2 = \frac{R_5}{2} = \frac{100\text{k}\Omega}{2} = 50\text{k}\Omega$$

$$A_{uf4} = -\frac{R_5}{R_4} = -1 \rightarrow R_2 = \frac{R_5}{1} = \frac{100\text{k}\Omega}{1} = 100\text{k}\Omega$$

Oplossing oefening 21

3-kanaals audiomixer voor microfoonsignalen

De microfoons zijn AC-gekoppeld via C_1 , C_2 en C_3 . Ook het uitgangssignaal is AC-gekoppeld via C_7 .

Elk microfoonsignaal wordt versterkt door zijn respectievelijke voorversterker opgebouwd rond IC_1 , IC_2 en IC_3 . Dit is telkens een symmetrisch gevoede inverterende versterker met versterking $R_2/R_1 = 100\text{K}/10\text{K} = 100$. IC_4 vormt een symmetrisch gevoede inverterende sommatoren. De versterking per kanaal is $R_{13}/R_{10} = 100\text{K}/47\text{K} = 2,13$. De potentiometers R_7 , R_8 en R_9 dienen om het volume per kanaal in te stellen. De maximale versterking bedraagt $100 \cdot 2,13 = 213$.

Doordat zowel de voorversterkers als de sommatoren inverteren is de uitgang in fase met de ingangen.

Oplossing oefening 22

Mixer voor elektrische gitaar

De mixer is principieel een inverterende sommatoren opgebouwd rond IC_1 (NE5534). Op DC-gebied wordt de (+) klem van IC_1 op de halve voedingsspanning geplaatst (instelbaar met P_7). Dit is nodig omdat de ganse schakeling asymmetrisch gevoed wordt. Ook de (-) klem en de uitgang van de opamp staan hierdoor DC op de halve voedingsspanning. C_{11} zorgt er voor dat de (+) klem van de opamp op AC-gebied op massapotentiaal staat. De in- en uitgangen zijn allen AC-gekoppeld via C_1 , C_3 , C_5 , C_7 , C_{13} en C_4 om de DC-spanningen te blokkeren. De terugkoppeling gevormd door de serieschakeling van R_{24} met P_6 is instelbaar gemaakt. De maximale versterking per kanaal bedraagt $-(R_{24}+P_6)/R_4 = -(81\text{K}+220\text{K})/30\text{K} = -10$ en de minimale versterking bedraagt $-R_{24}/R_4 = -81\text{K}/30\text{K} = -2,7$. De aan te sluiten voedingsspanning mag tussen 12V en 24V liggen. Deze wordt ontkoppeld met C_9 , C_{10} en C_{12} . Het signaal afkomstig van de inductieve gitaarelementen ($\approx 200\text{mV}_{\text{tt}}$) wordt eerst gebufferd met de spanningsvolgers opgebouwd met T_1 t.e.m. T_4 . De spanningsversterking van deze buffertrappen bedraagt ongeveer 1x maar ze hebben een vrij grote ingangsweerstand zodat de inductieve gitaarsensoren nauwelijks belast worden. De versterking kan per buffer geregeld worden tussen 0 en 1 via de potmeters P_1 t.e.m. P_4 . Op plug K_6 is het uitgangssignaal beschikbaar met een uitgangsweerstand van 600Ω (R_{21}). Aansluiting K_7 voorziet in een regelbaar (P_8) uitgangssignaal, eveneens met een uitgangsweerstand van 600Ω (R_{23}). Door onderling de instellingen van de verschillende potentiometers P_1 t.e.m. P_4 te wijzigen kan men het gewicht van de verschillende sensoren beïnvloeden om zo de gewenste klankkleur te bekomen.

Oplossing oefening 23

$$U_{(+)} = \frac{U_{g1} + U_{g2}}{2}$$

$$U_o = U_{(+)} \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) = U_{(+)} \left(1 + \frac{22k\Omega}{22k\Omega} \right) = U_{(+)} \cdot 2$$

$$U_o = \frac{U_{g1} + U_{g2}}{2} \cdot 2$$

$$U_o = U_{g1} + U_{g2}$$

Dit is een niet-inverterende sominator.

Oplossing oefening 24

Verschilversterker

$$U_o = (U_{g1} - U_{g2}) \frac{R_3}{R_1}$$

$$U_o = (-3V) \frac{50 \cdot 10^3 \Omega}{25 \cdot 10^3 \Omega} = -6V$$

Oplossing oefening 25

Stroomsensor met verschilversterker

$$U_o = (U_{g2} - U_{g1}) \frac{R_3}{R_1} = (U_{g2} - U_{g1}) \frac{100k\Omega}{20k\Omega} = 5(U_{g2} - U_{g1})$$

$$U_o = -5V = 5(U_{g2} - U_{g1})$$

$$(U_{g2} - U_{g1}) = -1$$

$$I = \frac{U_{g1} - U_{g2}}{R_m} = \frac{1V}{0,1\Omega} = 10A$$

Oplossing oefening 26

De spanning onderaan $R_2 = 1V$

De spanning bovenaan $R_2 = 3V$

De spanning over $R_2 = 2V$

De stroom door R_1 en R_2 en R_3 is

$$I = \frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{2V}{10k\Omega} = 200\mu A$$

$$U_o = U_{(-)OA2} + I \cdot R_1 = 3V + 200 \cdot 10^{-6} A \cdot 15 \cdot 10^3 \Omega = 6V$$

Oplossing oefening 27

Lineaire gestabiliseerde voeding

$$U_{R4} = U_{z1} = 6V$$

$$I_{R4} = I_{R3} = \frac{U_{R4}}{R_4} = \frac{6V}{5 \cdot 10^3 \Omega} = 1,2mA$$

$$U_o = I_{R4}(R_3 + R_4) = 1,2 \cdot 10^{-3} A (10 \cdot 10^3 \Omega + 5 \cdot 10^3 \Omega) = 8V$$

Oplossing oefening 28

Gestabiliseerde voeding

$$U_{(+)} = \frac{U_{z1}}{2} = \frac{5,1V}{2} = 2,55V$$

$$U_{(+)} = U_o \frac{R_6}{R_5 + R_6}$$

$$U_o = U_{(+)} \frac{R_5 + R_6}{R_6} = U_{(+)} \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right)$$

$$U_o = 2,55V \left(1 + \frac{5,6 \cdot 10^3 \Omega}{1 \cdot 10^3 \Omega} \right) = 16,83V$$

Deze gestabiliseerde voeding is niet beveiligd tegen kortsluiting.

Oplossing oefening 29

Gestabiliseerde voeding Bill Bowden

$$U_{(+)} = \frac{U_{z1}}{2} = \frac{6,2V}{2} = 3,1V = U_{(-)} = U_{loper}$$

$$I_{potm} = \frac{U_{loper}}{1k\Omega + 5k\Omega} = \frac{3,1V}{6 \cdot 10^3 \Omega} = 517\mu A$$

$$U_o = I_{potm}(10k\Omega + 1k\Omega) = 5,68V$$

$$I_{o(max)} = \frac{U_{be}}{0,3\Omega} = \frac{0,6V}{0,3\Omega} = 2A$$

Oplossing oefening 30

De spanning op de looper van $P_1 = U_{(+)} \text{ opamp} = U_{(-)} \text{ opamp} = U_o$. T_2 en T_3 zijn twee in parallel geschakelde vermogentransistoren om voldoende stroom (enkele A's) te kunnen leveren. Vermogentransistoren van het type 2N3055 hebben een relatief kleine stroomversterkingsfactor ($50 \leq h_{fe} \leq 100$). De basisstroom die ze nodig hebben is te groot voor de opamp om deze rechtstreeks te kunnen leveren. Daarom wordt er een extra stroomversterking voorzien met transistor T_1 . We noemen dit de drivertrap. De condensatoren in de schakeling zorgen voor de nodige stabiliteit. In deze applicatie moeten de transistoren bij een grote belasting vrij veel vermogen dissiperen. Het kan daarom nodig zijn om deze van een koelplaat te voorzien.

Oplossing oefening 31

De aangelegde ruwe gelijkspanning bedraagt tussen de 18V en 24V. IC_2 van het type LM7815 doet de voorregeling. De uitgang van deze driepootsregelaar levert een zeer stabiele spanning van 15V. De vier gebruikte opamps zijn van het type LM324. Dit is een compacte quad opamp (4 opamps in één behuizing). De spanningsstabilisatie gebeurt d.m.v. IC_{1C} . IC_{1B} fungeert als spanningsvolger voor de spanning op de loper van potmeter P_1 (spanningsregeling). Bij normale werking (geen stroombegrenzing) komt de loperspanning van P_1 ook op de (+) klem van IC_{1C} te staan. Deze staat ook op de (-) klem van IC_{1C} en via R_{13} en R_{14} (geen DC-stroom door R_{13} en R_{14}) ook op de uitgang van de voeding. De uitgangsspanning kan dus in principe variëren tussen 0V en 15V. De uitgangsstroom wordt geleverd door de MOSFET T_1 die gestuurd wordt door IC_{1C} . R_{11} en C_4 vormen een netwerk voor frequentiecompensatie. Dit dient om de schakeling stabiel te houden (geen oscillatie). R_{15} is ook aanwezig om stabiliteitsredenen (capacitieve belastingen). Om deze laatste reden werd ook de f-compensatie R_{12} - C_6 geplaatst. De meting van de uitgangsspanning gebeurt via het laagdoorlaatfilter R_{14} - C_5 . De condensator C_7 zorgt voor een kleine inwendige weerstand voor AC en R_{16} vormt een ontlaadweg zodat de spanning snel kan zakken over C_7 . IC_{1D} doet de stroomregeling. Het referentieniveau wordt ingesteld d.m.v. potmeter P_2 (stroomregeling). De belastingsstroom wordt gemeten via de spanning over de vermogenweerstand R_{17} . Ook hier zorgen R_{19} en C_8 voor een bandbreedtebeperking zodat de schakeling stabiel blijft. Als de belastingsstroom te groot wordt dan wordt de spanning over R_{17} ook groot en duikt de spanning op de (-) klem van IC_{1D} onder de ingestelde spanning op de (+) klem. De uitgang van IC_{1D} stijgt dan waardoor de MOSFET T_2 begint te geleiden en de spanning op de (+) klem van de spanningsregeling IC_{1C} begint te dalen. De uitgangsspanning zal dalen totdat de ingestelde stroomsterkte terug bereikt is. R_7 , R_9 en C_3 zorgen voor een zekere demping zodat er ook hier geen onstabiele situaties ontstaan zoals overshoot. IC_{1A} is als niveaudetector geschakeld. Bij normale werking (geen stroombegrenzing) is de (-) klem van IC_{1A} laag en de (+) klem staat op 0,7V (U_{D3}). De uitgang is hoog en de CV-LED (constant voltage) licht op. Bij overstroom is de (-) klem van IC_{1A} hoog en de uitgang van IC_{1A} laag. De CC-LED (constant current) licht nu op.

Oplossing oefening 32

Analoge mV-meter

De stroom door de draaispoelmeter is dezelfde als de stroom door de weerstanden.
Over de gekozen weerstand staat steeds de ingangsspanning U_g .

$$\text{Meetbereik 1mV: } R_1 = \frac{U_{R1}}{I} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{V}}{100 \cdot 10^{-6} \text{A}} = 10 \Omega$$

$$\text{Meetbereik 10mV: } R_2 = \frac{U_{R2}}{I} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{V}}{100 \cdot 10^{-6} \text{A}} = 100 \Omega$$

$$\text{Meetbereik 100mV: } R_3 = \frac{U_{R3}}{I} = \frac{100 \cdot 10^{-3} \text{V}}{100 \cdot 10^{-6} \text{A}} = 1000 \Omega$$

Oplossing oefening 33

De stroom door de ampèremeter (draaispoelinstrument) vloeit uit de opamp-uitgang en gaat door R_2 en R_3 . De maximaal toegelaten stroomsterkte voor het draaispoelinstrument bedraagt 1mA . Bij deze maximale stroom bedraagt de spanning over R_3 dan $1\text{mA} \cdot 100\Omega = 0,1\text{V}$. Deze maximale spanning van $0,1\text{V}$ staat ook op de $(-)$ klem en dus ook op de $(+)$ klem van de ideale opamp en dus ook over R_1 . De maximale stroom door R_1 is meteen ook het meetbereik en bedraagt $0,1\text{V}/10\Omega = 10\text{mA}$. Weerstand R_2 is een beveiliging tegen te hoge stromen door het gevoelige draaispoelmeetertje.

Oplossing oefening 34

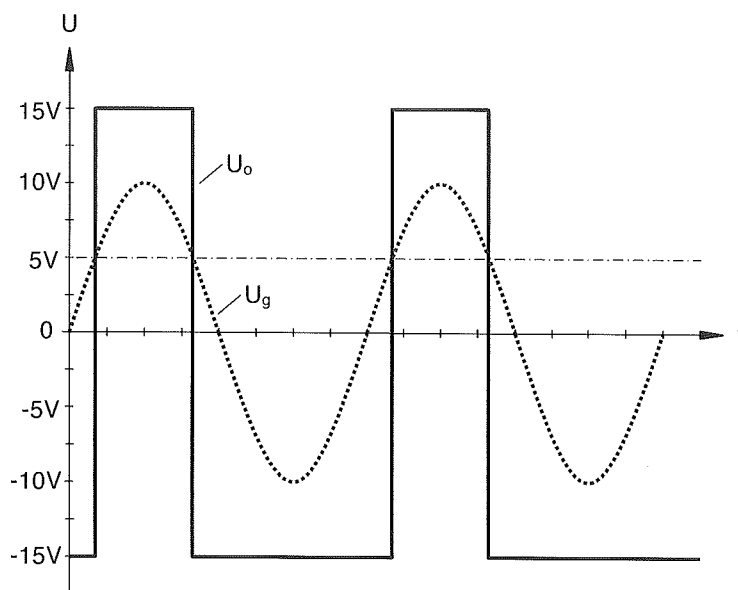
Niet-inverterende niveaudetector

De referentiespanning (omklapniveau) wordt bepaald door de spanningsdeler R_1 - R_2 .

$$U_{ref} = U_s + \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 15\text{V} \frac{5 \cdot 10^3 \Omega}{5 \cdot 10^3 \Omega + 10 \cdot 10^3 \Omega} = 5\text{V}$$

Is $U_g > U_{ref}$ dan is $U_o = U_{sat+} = +15\text{V}$

Is $U_g < U_{ref}$ dan is $U_o = U_{sat-} = -15\text{V}$



Figuur 9.47

Oplossing oefening 35

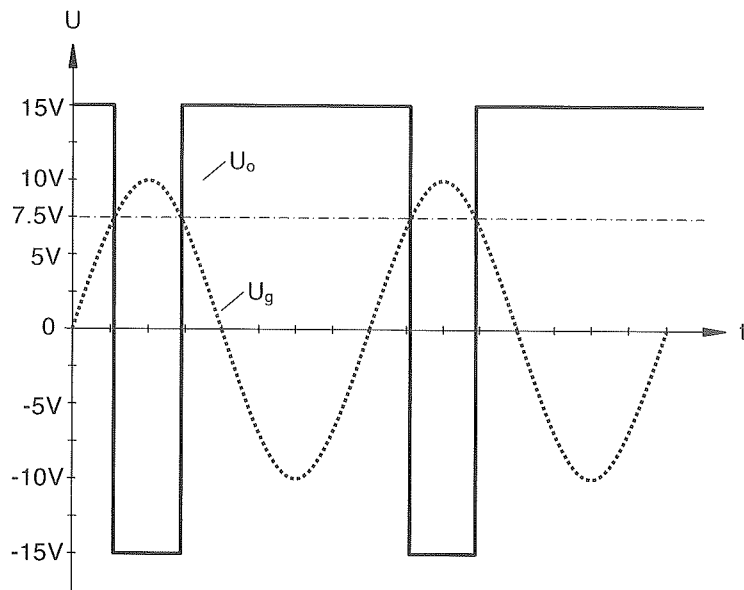
Inverterende niveaudetector

De referentiespanning (omklapniveau) wordt bepaald door de spanningsdeler R_1 - R_2 .

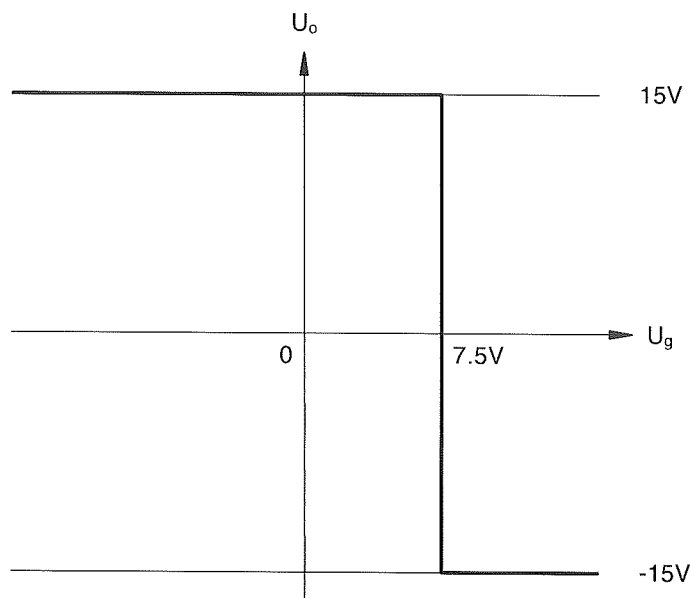
$$U_{ref} = U_s + \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 15\text{V} \frac{47 \cdot 10^3 \Omega}{47 \cdot 10^3 \Omega + 47 \cdot 10^3 \Omega} = 7,5\text{V}$$

Is $U_g > U_{ref}$ dan is $U_o = U_{sat-} = -15\text{V}$

Is $U_g < U_{ref}$ dan is $U_o = U_{sat+} = +15\text{V}$



Figuur 9.48: U_o i.f.v. U_g



Figuur 9.49: TFK

Oplossing oefening 36

Venstercomparator

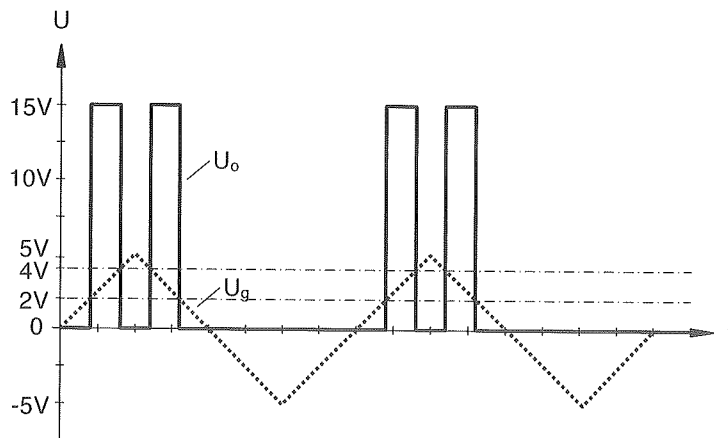
De referentiespanningen (omklapniveaus) worden bepaald door de weerstanden R_2 t.e.m. R_5 .

$$U_{ref2} = U_{s+} \frac{R_4 + R_5}{R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = 15V \frac{6,8 \cdot 10^3 \Omega + 6,8 \cdot 10^3 \Omega}{10 \cdot 10^3 \Omega + 27 \cdot 10^3 \Omega + 6,8 \cdot 10^3 \Omega + 6,8 \cdot 10^3 \Omega} = 4V$$

$$U_{ref1} = U_{s+} \frac{R_5}{R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = 15V \frac{6,8 \cdot 10^3 \Omega}{10 \cdot 10^3 \Omega + 27 \cdot 10^3 \Omega + 6,8 \cdot 10^3 \Omega + 6,8 \cdot 10^3 \Omega} = 2V$$

Is $U_{ref1} < U_g < U_{ref2}$ dan is $U_o = U_{sat+} = +15V$

Is $U_g < U_{ref1}$ of $U_g > U_{ref2}$ dan is $U_o = 0V$



Figuur 9.50

Oplossing oefening 37

Niet-inverterende Schmitt-trigger met referentiespanning

$$U_L = ?$$

$$U_o = U_{sat+} = +15V$$

$$U_{ref} = U_{(-)} = U_{sat+} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{ref} = +15V \frac{100 \cdot 10^3 \Omega}{100 \cdot 10^3 \Omega + 200 \cdot 10^3 \Omega}$$

$$U_{ref} = +5V$$

$$U_L = U_{ref} - I_3 \cdot R_3 = U_{ref} - I_4 \cdot R_3$$

$$U_L = U_{ref} - \frac{U_{sat+} - U_{ref}}{R_4} R_3$$

$$U_L = 5V - \frac{15V - 5V}{100 \cdot 10^3 \Omega} 20 \cdot 10^3 \Omega = 3V$$

$$U_H = ?$$

$$U_o = U_{sat-} = -15V$$

$$U_{ref} = +5V$$

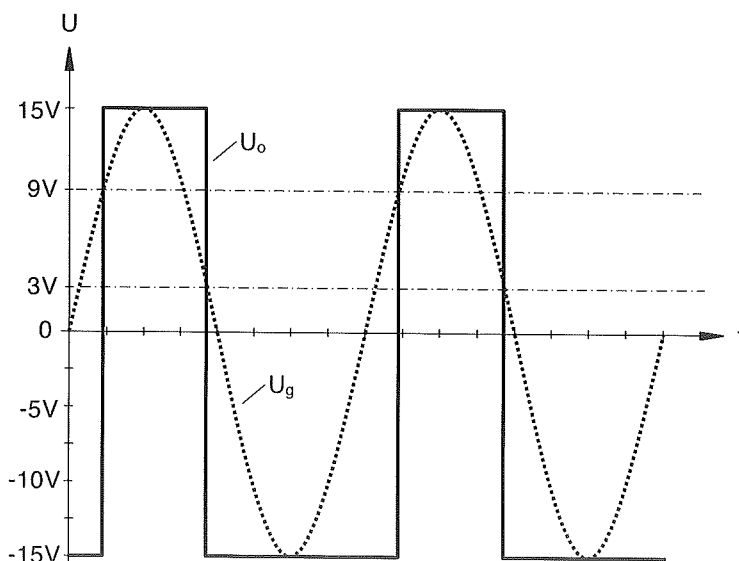
$$U_H = U_{ref} + I_3 \cdot R_3$$

$$U_H = U_{ref} + I_4 \cdot R_3$$

$$U_H = U_{ref} + \frac{U_{ref} - U_{sat-}}{R_4} R_3$$

$$U_H = 5V + \frac{5V + 15V}{100 \cdot 10^3 \Omega} 20 \cdot 10^3 \Omega$$

$$U_H = 9V$$



Figuur 9.51

Oplossing oefening 38

Overspanningsbeveiliging

In principe is deze schakeling een inverterende niveaudetector. Het omklapniveau wordt bepaald door de spanning op de (+) klem van de opamp. De spanning over de zenerdiode D_1 is de basis voor de referentiespanning en d.m.v. potentiometer P_1 kan men het gewenste omklapniveau instellen. De te testen voedingsspanning wordt links aangelegd aan de schakeling. Weerstand R_1 moet zo bepaald worden dat wanneer de spanning bereikt wordt waarbij moet ingegrepen worden, de spanning op de (-) klem = de spanning op de (+) klem (ingesteld met P_1). Stijgt de spanning boven dit niveau dan klapt de inverterende comparator om en de uitgang van IC_1 wordt 0V. Er kan dan stroom vloeien door de basis van transistor T_1 waardoor deze in geleiding wordt gestuurd. T_1 gaat in saturatie en gedraagt zich als een gesloten schakelaar. Het relais trekt dan aan en de contacten onderbreken de stroom naar het te beveiligen apparaat. Diode D_1 is een vrijlooptiode om de tegen-EMK van de relaisspoel bij het uitschakelen weg te werken. Wanneer men wil beveiligen tegen een te lage spanning dan moet men simpelweg de opamp omgekeerd aansluiten.

Oplossing oefening 39

Schemerschakelaar

Er wordt gebruik gemaakt van een netvoeding zonder transformator. De condensator C_1 is zo gekozen dat zijn impedantie de spanning voldoende verlaagt. Weerstand R_1 beperkt de stroompieken bij het inschakelen van het net en weerstand R_2 zorgt voor een ontlaadweg bij het uitschakelen. De diodes D_1 t.e.m. D_4 vormen een diodebrug die zorgt voor een dubbelzijdige gelijkrichting. Zenerdiode D_5 zorgt voor de voorstabilisatie op 15V en de geïntegreerde spanningsregelaar IC_2 zorgt voor de finale stabilisatie op 12V. Condensator C_2 is de afvlakcondensator en C_3 zorgt voor de nodige frequentiestabiliteit (voorkomen oscillatie) van de spanningsstabilisator. IC_1 is geschakeld als niet-inverterende niveaudetector. De referentiespanning wordt gevormd door de 12V, weerstand R_5 en trimpotentiometer P_1 . Deze is dus instelbaar gemaakt. De schakeling is zo ontworpen dat bij voldoende licht, de (-) klem van de opamp hoger in spanning staat dan de (+) klem. De uitgang van IC_1 staat dan laag (0V). Transistor T_1 krijgt geen basisstroom en kan dus niet geleiden. Het relais trekt niet aan en de verlichting blijft uitgeschakeld. Wanneer het verduistert zal de weerstandswaarde van de LDR (light dependent resistor) R_3 toenemen. De spanning over de LDR neemt dan eveneens toe. Bij voldoende duisternis (niveau in te stellen met trimpotmeter P_1) overschrijdt de spanning op de (+) klem deze op de (-) klem en de niveaudetector kipt om. Daardoor wordt de uitgang van IC_1 hoog. Transistor T_1 krijgt voldoende basisstroom, T_1 geleidt en het relais RE_1 trekt aan. De contacten worden gesloten en het licht wordt ingeschakeld. Condensator C_4 zorgt voor een traagheid van de LDR-spanning waardoor plotse storingen genegeerd worden. Diode D_1 is een vrijlooptiode om te beletten dat de tegen-EMK, die ontstaat bij het uitschakelen van de relaisspoel, de schakeling beschadigt.

Oplossing oefening 40

Vorstdetector

Wanneer de gemeten temperatuur 0°C is dan is de uitgangsspanning (pin 2) van de temperatuur-sensor IC_1 net 0V t.o.v. zijn referentie (pin 1). Wordt de temperatuur negatief dan wordt de spanning op pin 2 kleiner dan de spanning op pin 1. Om goed te kunnen detecteren of het vriest (negatieve temperatuur) moet de spanning op pin 2 dus iets onder de spanning op pin 1 kunnen komen. Om dit mogelijk te maken heeft men diode D_1 in serie met de massaleiding van IC_1 opgenomen. Op deze manier staat pin 1 van de temperatuursensor immers altijd op $0,7\text{V}$ (U_F van D_1). IC_2 is geschakeld als inverterende niveaudetector. De referentiespanning van deze comparator is de spanning op D_1 die ook de spanning op pin 1 (referentiespanning) van de temperatuursensor IC_1 is. Bij vorst duikt de spanning op pin 2 van IC_1 onder deze op pin 1 van IC_1 . De (-) klem van de comparator IC_2 komt dan op een lager spanning te staan dan de (+) klem van IC_2 . De comparatoruitgang wordt dan hoog (pin 6 IC_2) en de LED D_3 licht op. Via het netwerk bestaande uit diode D_2 en weerstand R_4 wordt de (+) ingang (pin 3) van de comparator IC_2 hoog gehouden. R_3 , R_4 en D_2 veroorzaken een asymmetrische hysteresis voor de comparator. Zelfs wanneer het vriezen achter de rug is blijft deze spanning hoog staan en blijft de LED D_3 branden. De schakeling heeft dus een geheugen voor de vorstdetectie (via de meekoppeling $R_4 - D_2$). Om de schakeling te resetten volstaat het om even op de drukknop S_1 te drukken. De schakeling keert dan terug naar de startsituatie. Condensator C_1 ontkoppelt de voedingsspanning. C_2 zorgt er voor dat bij het opstarten de schakeling gerest wordt. De niet-inverterende ingang van de opamp wordt bij het aanzetten van de schakeling kortstondig met massa verbonden zodat de uitgang laag is (LED uit). De gebruikte opamp kan in een minimum stroomverbruik modus werken. Om dat effect te bekomen schakelt men de bias-select (pin 8) door naar de voedingsspanning van 6V . In deze mode is de opamp wel trager maar voor een dergelijke toepassing stelt dit geen enkel probleem.