



Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen



Jan Genoe
jan.genoe@kuleuven.be

Klasse C en Klasse F versterkers

In dit hoofdstuk bespreken we de klasse C en klasse F vermogen-versterkers. Dit zijn versterkers waarbij het vermogen geleverd wordt door slechts 1 actieve transistor.



Vermogenversterkers voor hoge frequenties

- Vermogenversterkers voor hoge frequenties hebben meestal
 - een vaste frequentie
 - een beperkte bandbreedte (max 1 % van de frequentie)
- Toepassingen
 - inductieve verwarming
 - smeltovens
 - diëlektrisch verwarmen
 - drogen, bakken, polymeriseren
 - Telecommunicatie
 - draaggolf van zenders

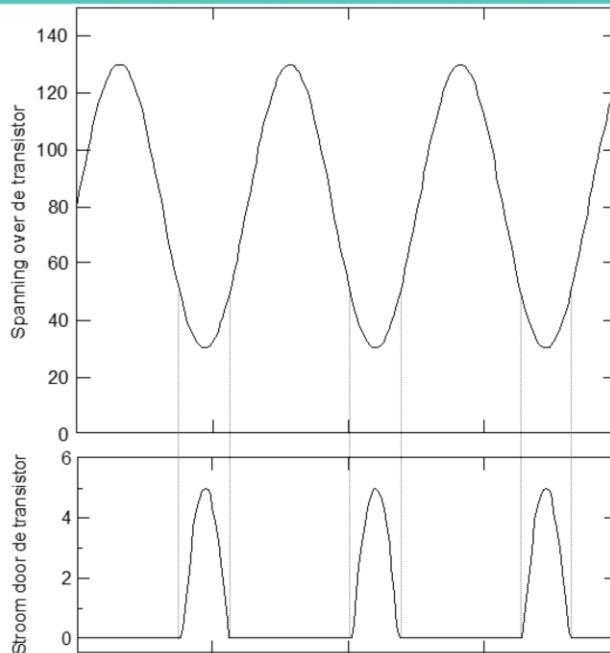


Vermogenversterkers voor hoge frequenties

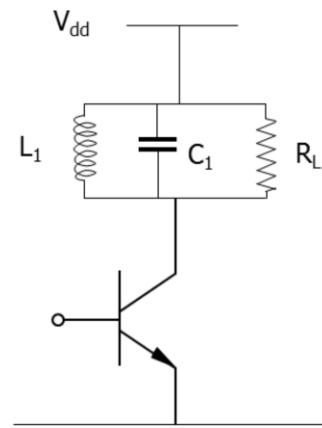
- We kunnen gebruik maken van de eigenfrequentie van een resonante kring om
 - De oscillatie op de juiste frequentie te genereren
 - Om harmonischen weg te filteren
- Deze resonante kring vormt de belasting van de vermogentransistor
 - De vermogentransistor levert het vermogen dat verloren/uitgestraald wordt door de resonante kring



Basisschema klasse C



- Rol actief element:
 - Leveren van energie
 - Niet: vorming sinus

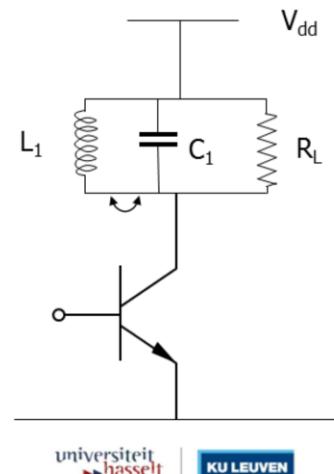
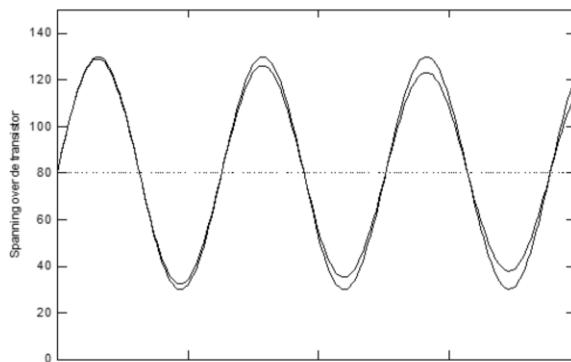




Verklaring van de werking (1)

▪ Zonder sturing actief element

- De inductantie (L_1) wisselt met de condensator (C_1) energie uit: trilling op de eigenfrequentie
- Amplitude van de oscillatie daalt (de trilling dempt uit) door energieoverdracht naar de belasting R_L

universiteit
hasselt

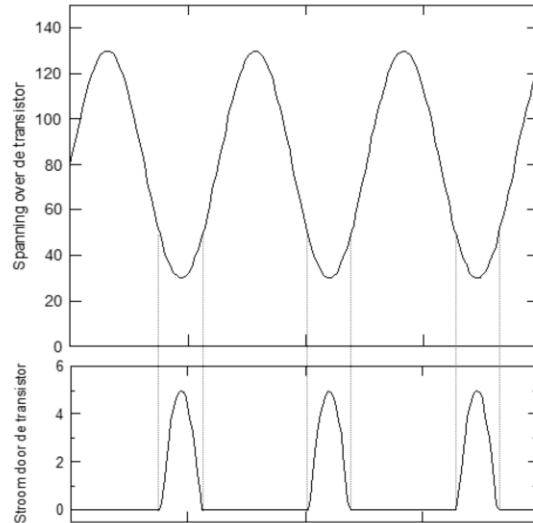
KU LEUVEN

5

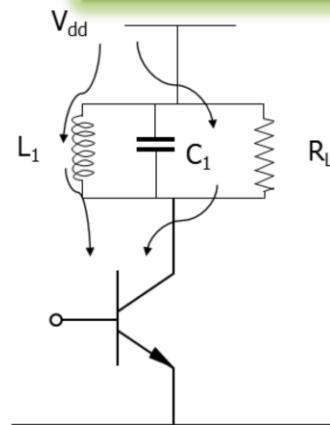


Verklaring van de werking (2)

- De aansturing van het actieve element plaatst lading bij op de condensator

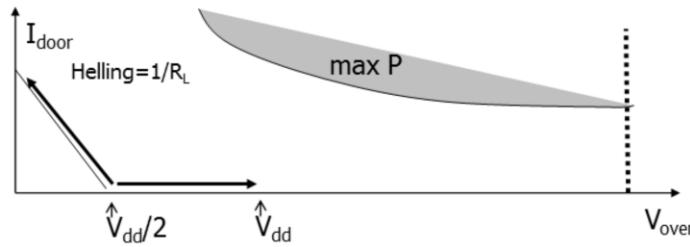


Dit is energie toevoegen aan de trilkring



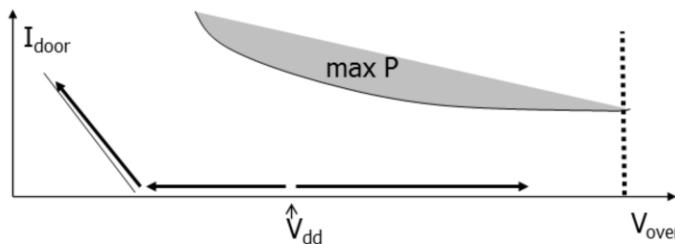


Stroom door het actieve element



Klasse B

- ruststroom nul
- helft van de tijd in geleiding
- rustspanning helft van voeding
- spanning tot de voeding

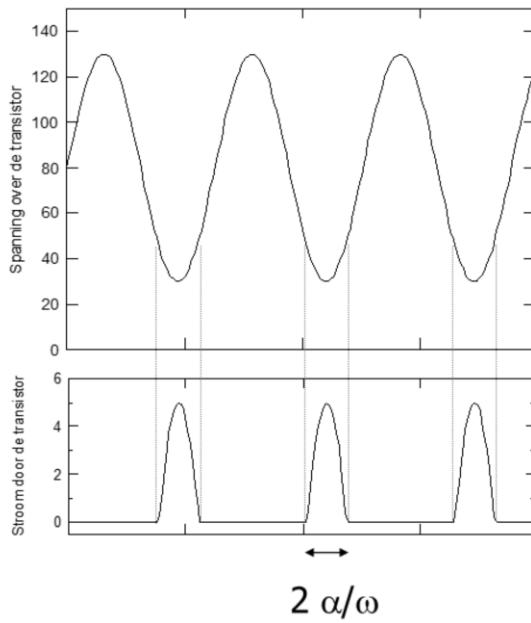


Klasse C

- ruststroom nul
- < helft van de tijd in geleiding
- rustspanning voeding
- spanning tot de dubbele voeding



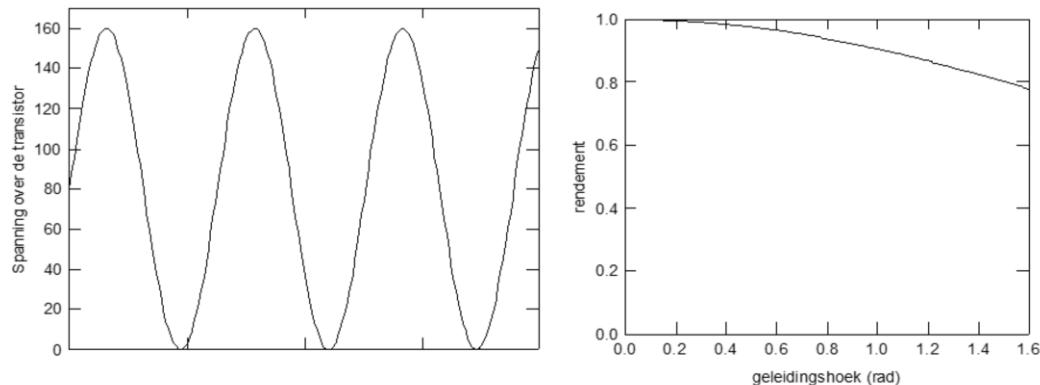
geleidingshoek α



- 2α is het deel van de periode dat de transistor gestuurd wordt
- Hoe korter de stuurperiode
 - Hoe minder energie er geleverd wordt
 - Hoe efficiënter de versterker
- α blijft best constant
 - anders bekomen we niet-lineariteiten in de weergave



Rendement in verzadiging



- Volledige uitsturing van de oscillatie
- Rendement bij een geleidingshoek $\pi/2$ (Transistor is de halve periode in geleiding) komt overeen met de klasse B versterker
 - Dit noemen we "werken in de klasse B mode"



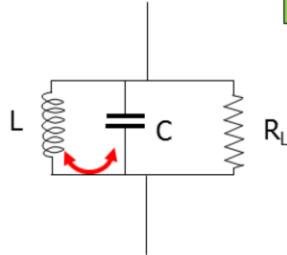
Gebruik van de klasse C versterker

- Voor vaste bronnen ...
- Voor FM versterkers
 - amplitude is vast, frequentie varieert
 - hoek α kan ook constant zijn
- Voor AM versterkers
 - Directe uitvoering
 - Hoek α moet variëren tenzij $\alpha=\pi/2$
 - $\alpha=\pi/2$ is de enige oplossing
 - Gebruik: kleine AM zenders en televisiezenders
 - Plaatmodulatie uitvoering
 - Voedingsspanning variëren in plaats van de hoek α
 - Gebruik: grote AM zenders



De trilkring

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} V = L \frac{dI_L}{dt} \\ Q_C = CV \\ V = R_L I_R \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V}{L} \\ I_C = C \frac{dV}{dt} \\ I_R = \frac{V}{R_L} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V}{L} \\ \frac{dI_C}{dt} = C \frac{d^2V}{dt^2} \\ \frac{dI_R}{dt} = \frac{1}{R_L} \frac{dV}{dt} \end{array} \right. \\
 & I_C + I_L + I_R = 0 \qquad \qquad \qquad \frac{dI_C}{dt} + \frac{dI_L}{dt} + \frac{dI_R}{dt} = 0
 \end{aligned}$$



$$C \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{1}{R_L} \frac{dV}{dt} + \frac{V}{L} = 0$$

universiteit
hasselt

KU LEUVEN

11

Om het gedrag van de trilkring beter te begrijpen, berekenen we eerst de evolutie van de spanning in functie van de tijd indien deze trilkring niet aangestuurd wordt. Vervolgens besturen we de trilkring onder een sinusvormige aansturing. Het globale gedrag van de trilkring is een combinatie van beiden.

Deze differentiaalvergelijking levert een sinus functie op voor de spanning over de parallelkring. Als de spanning sinusvormig is, is de stroom door de weerstand R ook sinusvormig.



Oplossing trilkring

$$V = V_0 \sin(\omega t + \phi) \exp(-\beta t)$$

Vertrekbasis:

- R_L de belasting
- f de frequentie

Demping

Trilfrequentie

$$\beta = \frac{1}{2R_L C}$$

$$2\pi f = \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \beta^2}$$

Kies $\beta/\omega \ll 1$

Laat toe C te kiezen

Laat toe L te kiezen

Integratieconstanten

$$\begin{cases} V_0 \\ \phi \end{cases}$$

Dit is de oplossing van de spanning over de trilkring wanneer de trilkring spontaan trilt.

De amplitude daalt, tenzij de versterker stroompulsen stuurt.

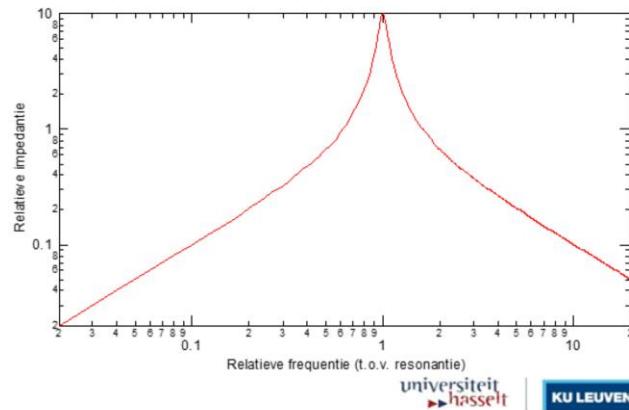


Aansturing off-resonance

- Veronderstel een sinusvormige aansturing off-resonance
- Een lagere waarde van de impedantie van de trilkring wordt bekomen
- Dit houdt in
 - Veel hogere stuurstroom nodig om dezelfde spanningszwai te bekomen
 - Veel minder spanningszwai met dezelfde stuurstroom

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{j\omega L}}$$

$$Z(\omega) \cdot I(\omega) = V(\omega)$$



De bovenstaand redenering is gedaan voor een sinus aansturing, maar is uitbreidbaar door superpositie voor elke periodieke aansturing.

Uit het bovenstaande kunnen we dus besluiten dat het mogelijk is een trilkring aan te sturen op een frequentie die een beetje verschilt van de resonantiefrequentie. Dit laat dus FM modulatie toe, indien de frequentiezwaai niet te groot is.

Voor elk periodisch signaal kunnen we ontbinden in frequenties aan de hand van een Fourier analyse, dus ook de stuurstroom.

Elk van deze Fourier componenten kunnen we dan vermenigvuldigen met de $Z(\omega)$.

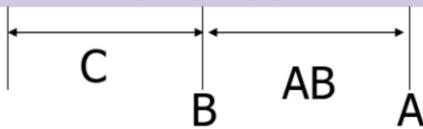
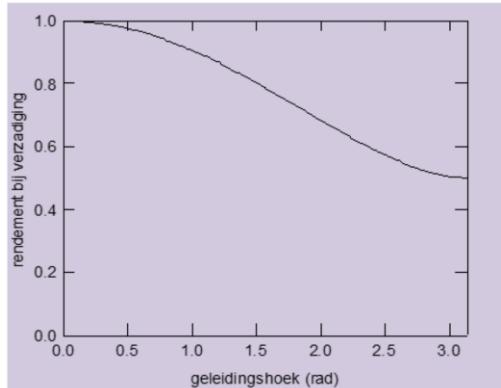


Oefening

- Een $\lambda/2$ antenne die een stralingsweerstand heeft van 60 Ohm, wensen ze te gebruiken om signalen uit te zenden op 104.7 MHz.
- Kies geschikte waardes voor de capaciteit C en de inductantie L.



Rendement in functie van de geleidingshoek



$$\eta_{\max} = \frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{4(\sin(\alpha) - \alpha \cos(\alpha))}$$

- Een geleidingshoek α kleiner dan 90° geeft een klasse C werking
- Een geleidingshoek gelijk aan 90° geeft een klasse B werking
- Een geleidingshoek tussen 90° en 180° geeft een klasse AB werking
- Een geleidingshoek van 180° geeft een klasse A werking

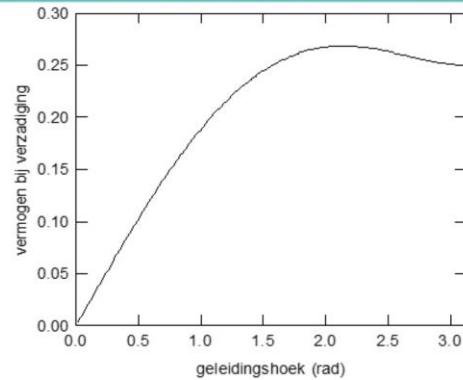
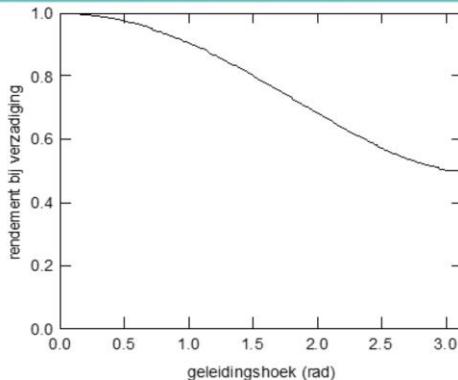
Berekening rendement:

$$P_{ac} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} V_{ac} \cos(x) I_o (\cos(x) - \cos(\alpha)) dx$$

$$P_{tot} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} V_{dd} I_o (\cos(x) - \cos(\alpha)) dx$$



Rendement en vermogen bij verzadiging



- Als het rendement bijna 100 % is bij een zeer kleine geleidingshoek (zeer korte stuurstroom), waarom werken we dan niet altijd bij deze geleidingshoek?
 - Het bekomen vermogen wordt te klein

$$P_{\max} = \frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{4\pi(1 - \cos(\alpha))} V_{dd} I_{\max}$$

Maximale stroom door de transistor

Berekening P_{\max} :

$$P_{ac} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} V_{dd} \cos(x) I_o (\cos(x) - \cos(\alpha)) dx$$

Deze formule van P_{\max} veronderstelt dat de klasse C versterker door een sinus stroombus aangestuurd wordt gedurende de geleidingshoek α . In de praktijk zal de aansturing vaak een sinusspanning zijn die aangelegd wordt aan de gate van een MOS transistor. Hiervoor kunnen andere formules voor P_{\max} afgeleid worden [1].

[1] D. Roddy, O. Buelow and R. Williams, "Maximising power transfer in Class-C", Electronics world and wireless world 101, 964 (1995)

$$I_{\max} = \frac{I_o}{1 - \cos(\alpha)}$$



Keuze van de voedingsspanning (V_{dd}) en van α

Vertrekbasis:

- R_L de belasting
- P_{\max} het vermogen
- I_{\max} de maximale transistorstroom

$$P_{\max} = \frac{V_{dd}^2}{2R_L}$$

$$P_{\max} = \frac{2\alpha - \sin(2\alpha)}{4\pi(1 - \cos(\alpha))} V_{dd} I_{\max}$$

- We zullen de voedingsspanning kiezen zodat we bij verzadiging het maximale vermogen leveren.
- We zullen α kiezen zodat we toch nog het nodige vermogen kunnen leveren zonder de maximale stroom (I_{\max}) te overschrijden.

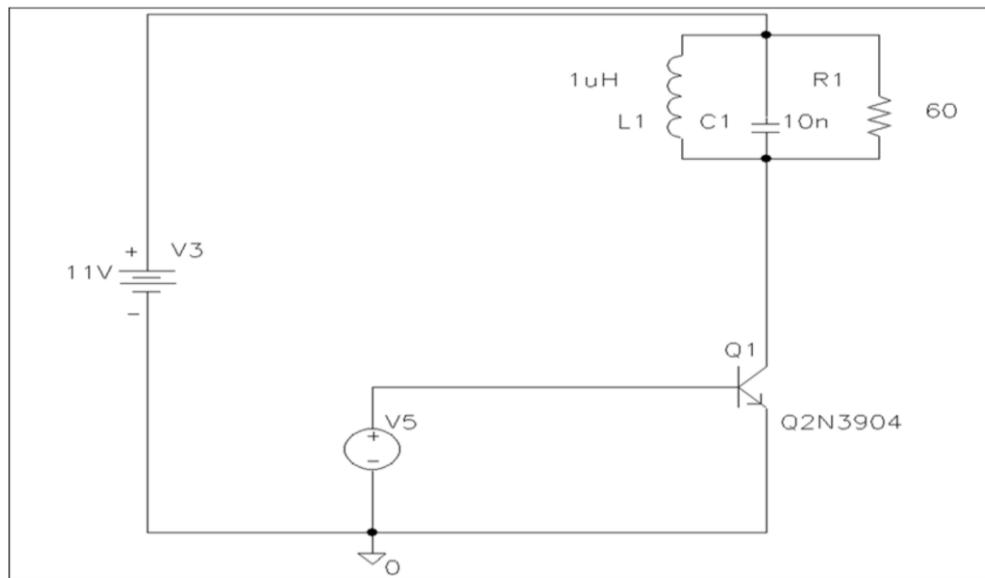


Oefening

- Een belasting met een weerstand van 60 Ohm wensen we te gebruiken om 1 W over te brengen op 1.591 MHz, aan de hand van een vermogentransistor met een maximale stroom van 660 mA
- Kies geschikte waardes voor de capaciteit C , de inductantie L , de voedingsspanning V_{dd} en de hoek α
- Hoe groot is het rendement?
- Wat kiezen we als de maximale stroom 360 mA is?



SPICE simulatie

universiteit
hasselt

KU LEUVEN

19

Een oplossing voor de oefening op de vorige pagina wordt gegeven door het bovenstaande schema.

Hoe sturen we op de eenvoudigste wijze de transistor Q1 aan zodat de transistor enkel gedurende de gekozen geleidingshoek α in geleiding is?

De meest eenvoudige wijze is door gebruik te maken van een sinus met een negatieve DC offset. Zolang dat de spanning aan de basis van de transistor kleiner is dan de voorwaartse spanning van de basis-emitter diode, zal de transistor niet in geleiding zijn en de trilkring dus niet aangestuurd worden. Van zodra dat de spanning wel groter wordt bepaalt de stroom naar de basis, de stroom naar de trilkring. Deze stroom naar de basis wordt, bij grote waardes van V5, beperkt door de inwendige basisweerstand van de transistor Q1. Het bijplaatsen van een extra basisweerstand geeft de ontwerper een controle over de basisstroom, maar dit geeft ook extra verliezen.



SPICE Netlist

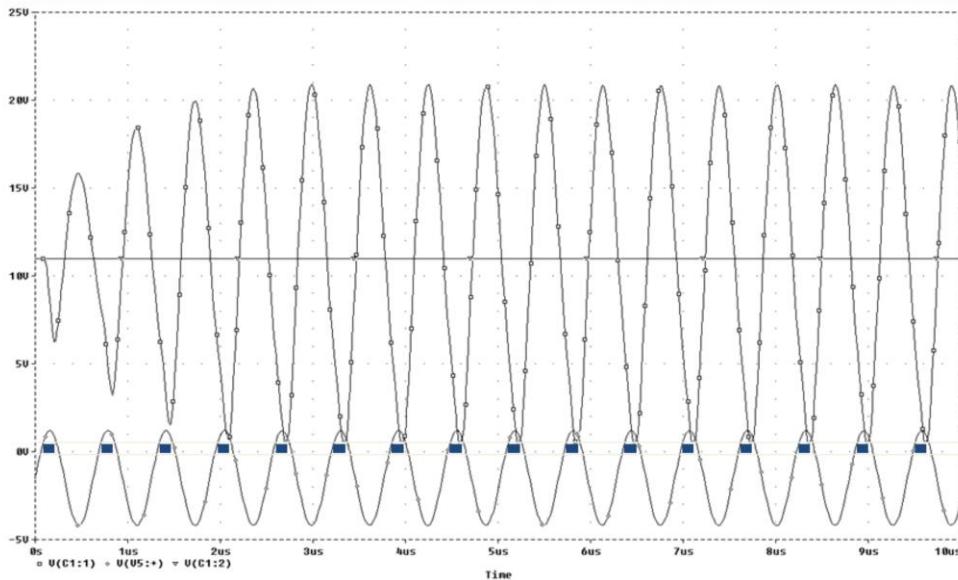
```
Q_Q1      2 1 0 Q2
L_L1      2 3 1uH
C_C1      2 3 10n
R_R1      2 3 60
V_V3      3 0 11V
V_V5      1 0 sin(-1.5 2.7 1591500)
.tran 2ns 10000ns
.OP
.model Q2 NPN(Is=14.34f BF=200 Rb=100 )
.probe
.END
```

De verschillende knopen krijgen door SPICE een naam of nummer en de grondknoop noemt eenvoudigweg 0.

In dit voorbeeld krijgt de spanningsbron V5 een negatieve offset van 1.5 volt en een zwaai van 2.7 Volt. Hierdoor wordt de gewenste openingshoek bekomen.



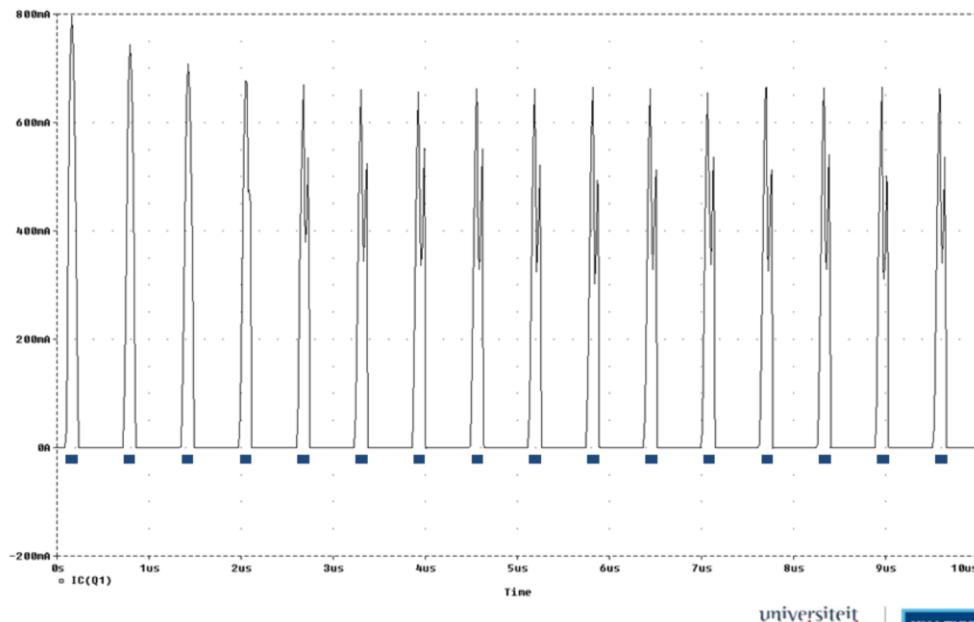
Resultaat van de simulatie (spanningen)



Deze grafiek toont het opkomen van de oscillatie en de stuurspanning V5 die hiervoor nodig is. We merken dat pas vanaf de stuurspanning groter dan 0.7 V wordt de trilkring in beweging komt.



Resultaat van de simulatie (collectorstroom)

universiteit
hasselt

KU LEUVEN

22

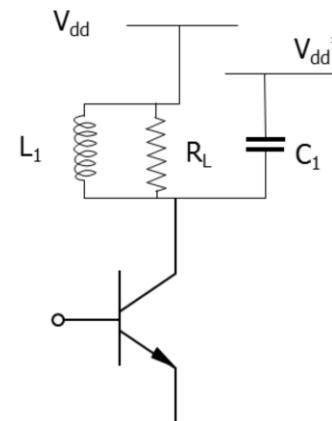
Deze grafiek toont de collectorstromen die horen bij het omkomen van de oscillatie die getoond werd in de vorige grafiek. We merken dat bij het starten van de oscillatie de stroom eventjes boven in de opgave gestelde limiet komt. Wanneer dit een probleem vormt moet de geleidingshoek groter gemaakt worden.

We merken ook op dat de stroom terug daalt wanneer de bipolaire transistor in verzadiging geraakt.



Variatie op hetzelfde schema

- De knoop van de condensator die aan de vaste spanning hangt, hoeft niet noodzakelijk aan de voedingsspanning te hangen.
- Dit mag eender welke vaste spanning zijn.
- Het gevolg is wel dat de maximale spanning over de condensator toeneemt, en er dus een duurdere condensator nodig is.



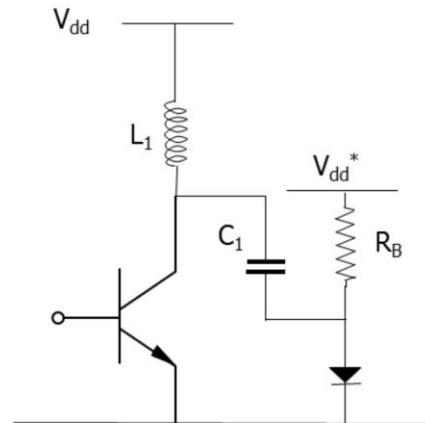
In het voorgaande schema kwam de spanning over de condensator perfect overeen met het AC signaal. Wanneer we echter de knoop van de condensator die aan de vaste spanning hangt aan een andere spanning hangen dan de voedingsspanning, zal de werking van de condensator niet veranderen. Het AC signaal over de condensator blijft exact hetzelfde. Er komt enkel maar een DC spanning bij. Dit laatste heeft echter wel tot gevolg dat de maximale spanning over de condensator groter wordt, en dus de kans op doorslag toeneemt. Dit kan men voorkomen door de dikte (d) van het dielectricum groter te maken. Maar om dezelfde condensatorwaarde te bekomen zal dus de oppervlakte (A) groter moeten worden, en zullen we dus gebruik moeten maken van een duurdere condensator. Toch zijn er, zoals we verder zullen zien een aantal situaties waarbij dit nuttig is.

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$



Diode als belasting

- Een mogelijke keuze van de spanning V_{dd}^* is 0.7 V, wat kan bekomen worden door een diode en een weerstand in serie te plaatsen.
- De R_L wordt nu bekomen door de geleidbaarheid van de diode en de weerstand R_B , wat maakt dat het circuit geen lineaire belasting meer heeft.

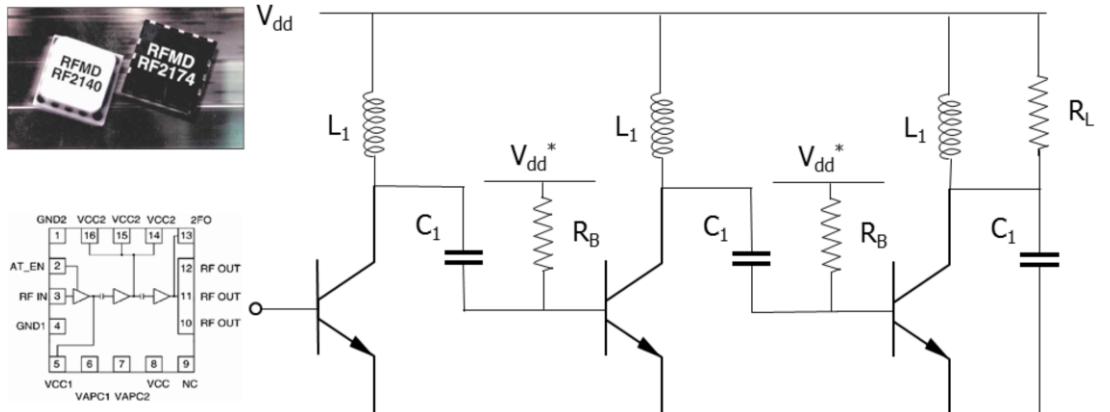


Ook staat de belasting in serie in plaats van in parallel, wat de werking iets anders maakt.



Bipolaire transistor als belasting

- Hierdoor kunnen we een meertrapsverstrekker bekomen

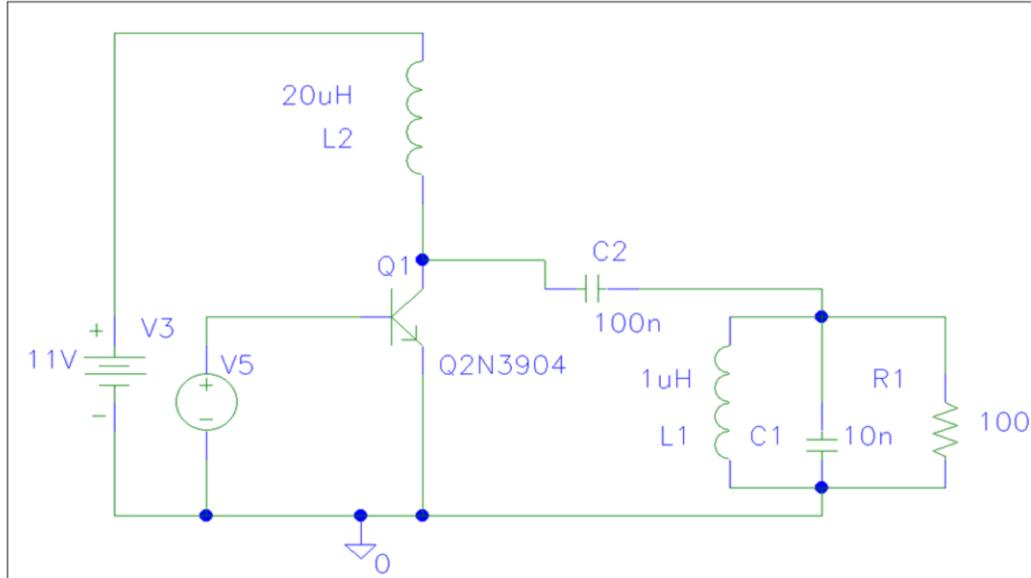


Dit is bijvoorbeeld een schema dat gebruikt wordt in de GSM transmitter ICs RFMD RF2140 en RF2174. Deze ICs werken tussen 1710 en 1785 MHz, gebruiken een voedingsspanning van 3.2V en bekomen een zendvermogen van 32.7 dBm (ongeveer 2 W) met een efficiëntie van 50.6 %.

Meer details kan je vinden in: B. Schmukler and J. Jorgenson, "Design of a 3-Volt HBT power amplifier for DCS", Applied Microwave and wireless, June 2000, pp 116-125 en op www.rfmd.com



Alternatief schema



In het hiervoor besproken schema's gebeurde de oscillatie steeds rond de voedingsspanning.

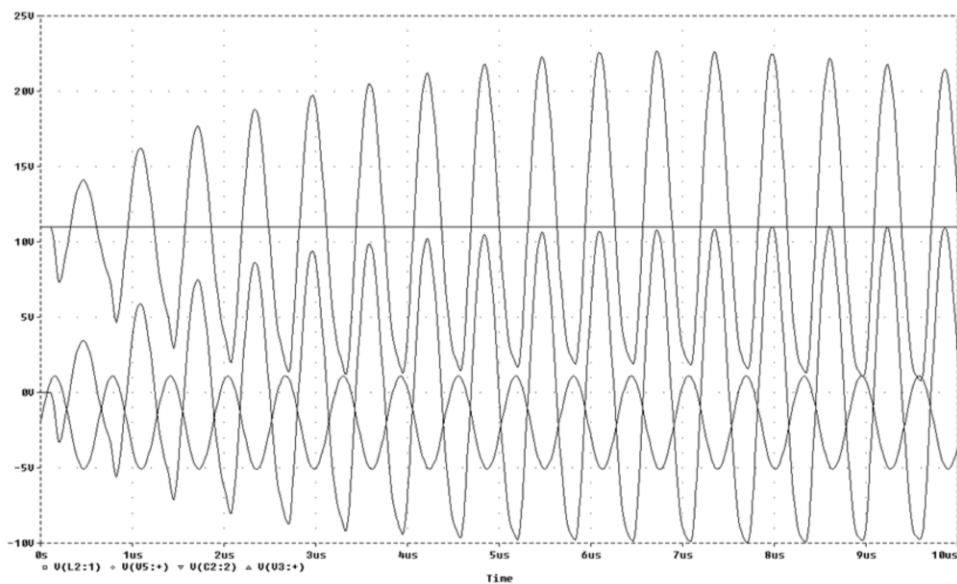
In een aantal gevallen is dit gevaarlijk of niet gewenst. We kunnen hiervoor dan het bovenstaande schema toepassen.

De inductantie L_2 laat een DC stroom door, maar voor de frequenties die gebruikt worden voor het signaal vormt het bijna een open keten, dit wil zeggen dat de impedantie van het andere pad veel kleiner is.

De condensator C_2 laat geen DC stroom door maar voor de frequenties die gebruikt worden voor het signaal vormt het bijna een kortsluiting, dit wil zeggen dat de impedantie van de elementen van de trilkring veel groter is.



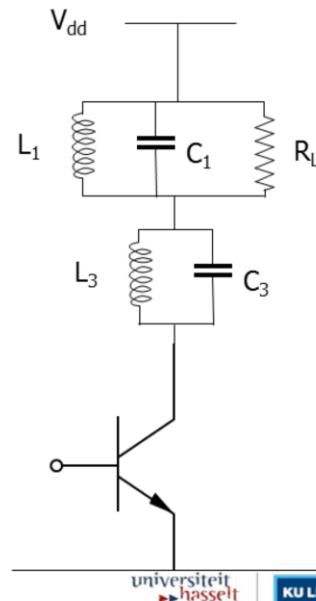
Spanningsevolutie alternatief schema





Basisschema klasse F

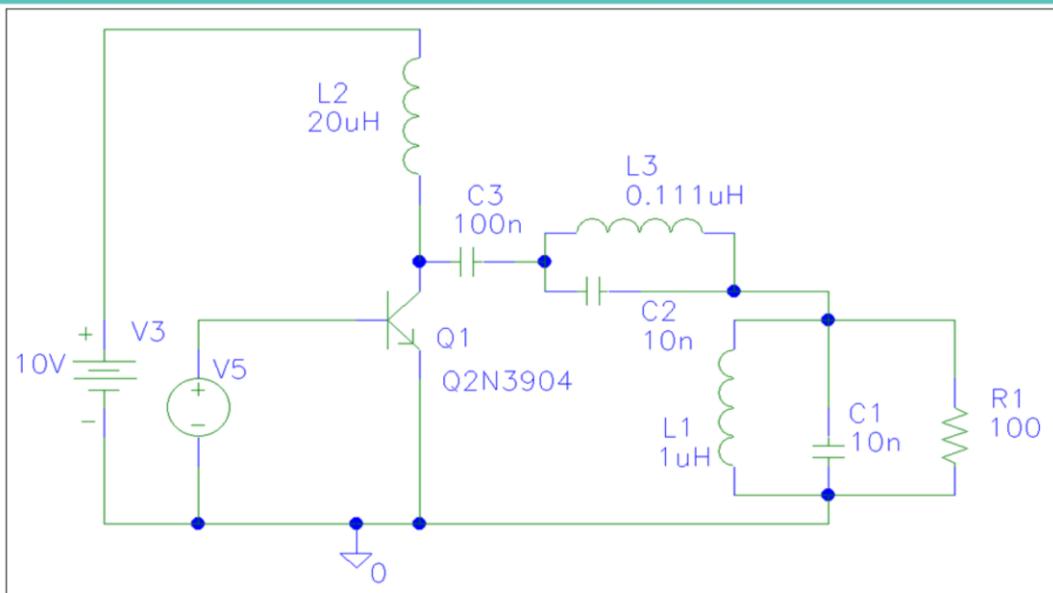
- Filter voor de derde harmonische wordt toegevoegd
- Laat toe meer energie toe te voegen bij eenzelfde openingshoek α en maximale transistorstroom I_{max}



28

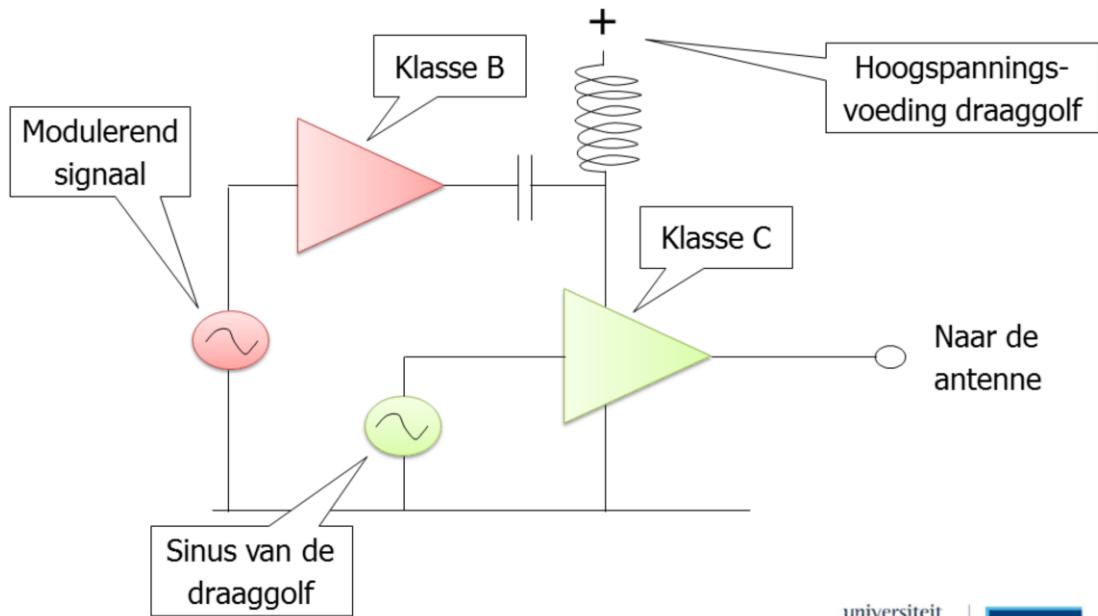


Klasse F Alternatief schema





Plaatmodulatie uitvoering AM zender



Aangezien een Klasse C versterker het beste rendement heeft indien de zwaai twee maal de voedingsspanning is, zullen we een steeds proberen de versterker te gebruiken met deze maximale zwaai. Maar wanneer we amplitude modulatie (AM) wensen toe te passen is het juist de bedoeling de zwaai van het hoogfrequent signaal aan te passen aan de amplitude van het modulerend signaal. We kunnen de klasse C versterker toch blijven gebruiken bij maximale zwaai als we het modulerend signaal de voedingsspanning laten aanpassen. Dit noemen we plaatmodulatie.

De DC component van de voeding wordt geleverd door een hoogspanningsvoeding. Deze is echter niet rechtstreeks op de voeding van de klasse C versterker aangesloten. Er werd een spoel bijgeplaatst. Deze spoel laat toe de AC component van de voedingsspanning te leveren via een klasse B versterker. Deze AC component wordt via capacitive koppeling aangebracht op de voeding. Hierdoor dient ook de klasse B versterker minder vermogen te leveren.