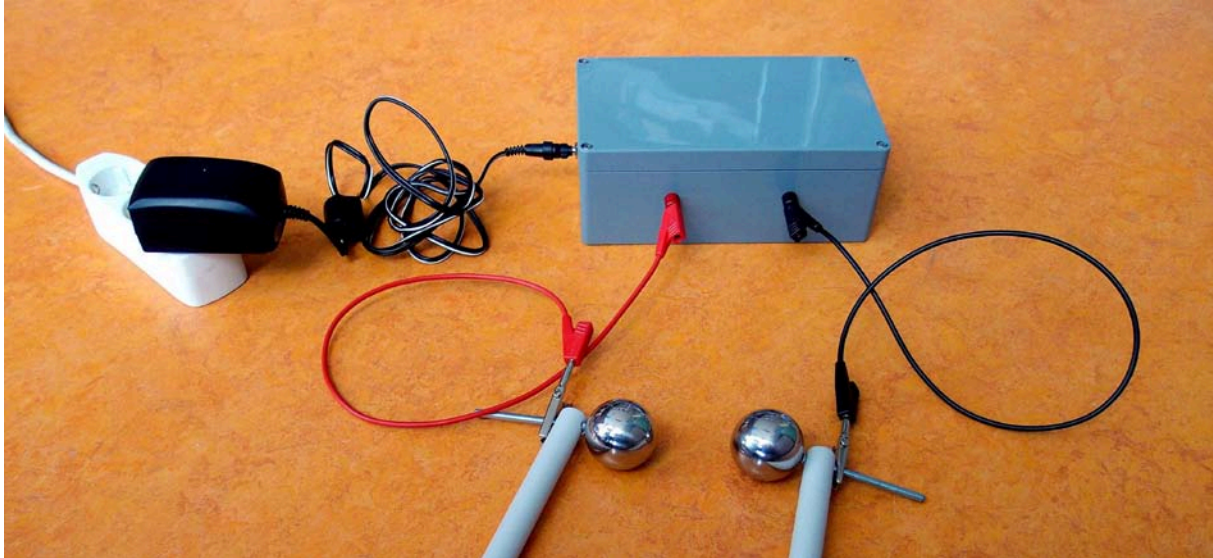


Zelf een hoogspanningsgenerator (9 kV gelijkspanning) bouwen



Inhoud

De schakeling

Een blokspanning van 15 V opwekken

De wisselspanning omhoog transformeren

Analyse van de maximale stroom door de primaire spoelen

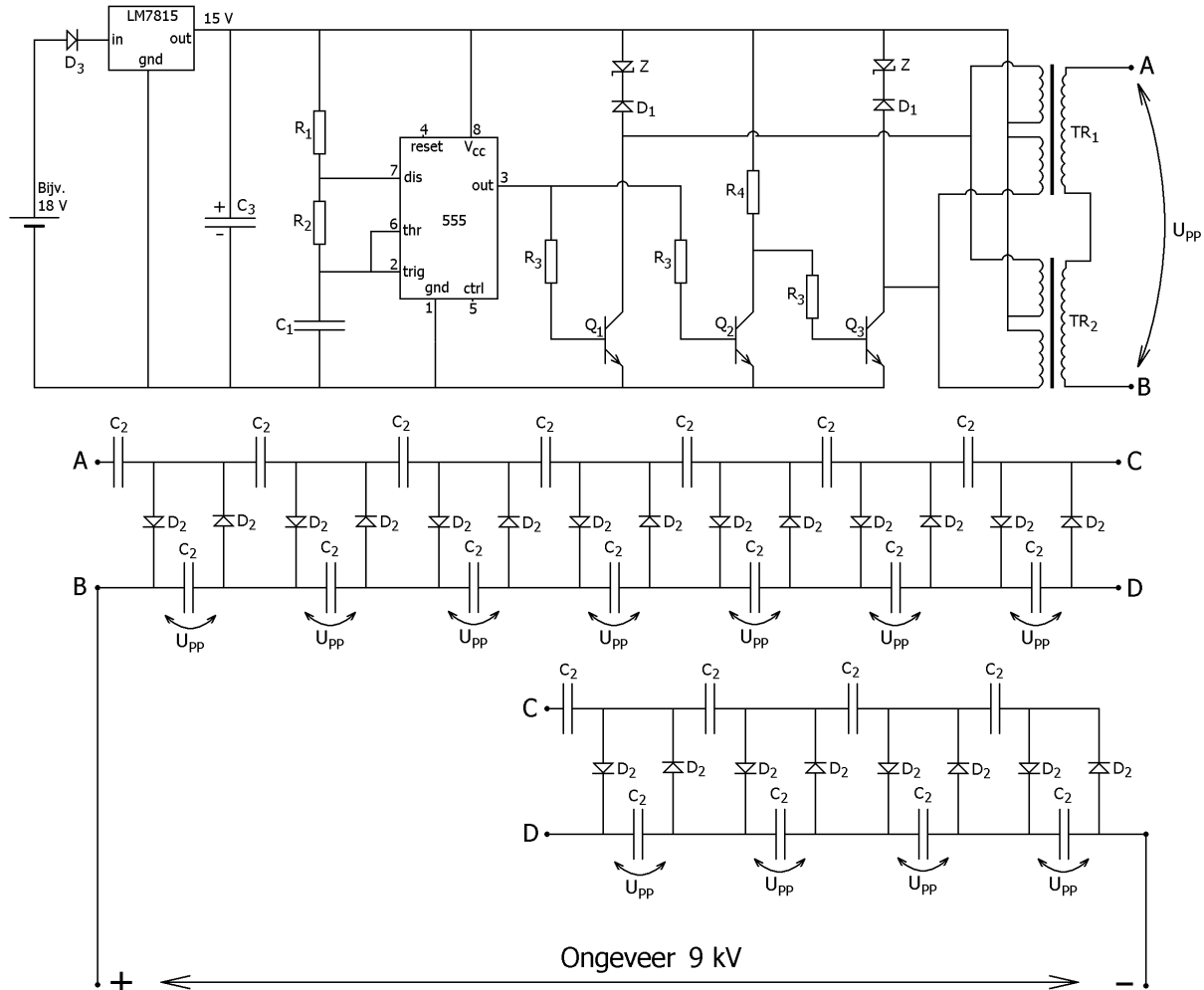
De wisselspanning omzetten in een hoge gelijkspanning

Bepaling van de uitgangsspanning van de schakeling

Bijlage: het bepalen van de zelfinductie van een spoel

De schakeling

De onderstaande figuur geeft de schakeling waarmee een hoge gelijkspanning gemaakt kan worden. Globaal bestaat de schakeling uit drie delen. In het eerste deel wordt een blokspanning van 15 V opgewekt. In het tweede deel wordt deze blokspanning met behulp van transformatoren opgevoerd naar een wisselspanning van honderden volts. In het derde deel wordt deze hoge wisselspanning omgezet in een gelijkspanning van kilovolts.



De onderstaande waarden kunnen als richtlijn voor de componenten dienen.

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 47 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 10 \text{ nF}$$

$$C_2 = 4,7 \text{ nF met een toelaatbare spanning van } 1000 \text{ V (bijv. de WIMA MKS4)}$$

$$C_3 = 100 \text{ }\mu\text{F}$$

D_1 = general purpose diode

D_2 = general purpose diode met een sperspanning van tenminste 1000 V (bijv. de 1N4007)

D_3 = general purpose diode

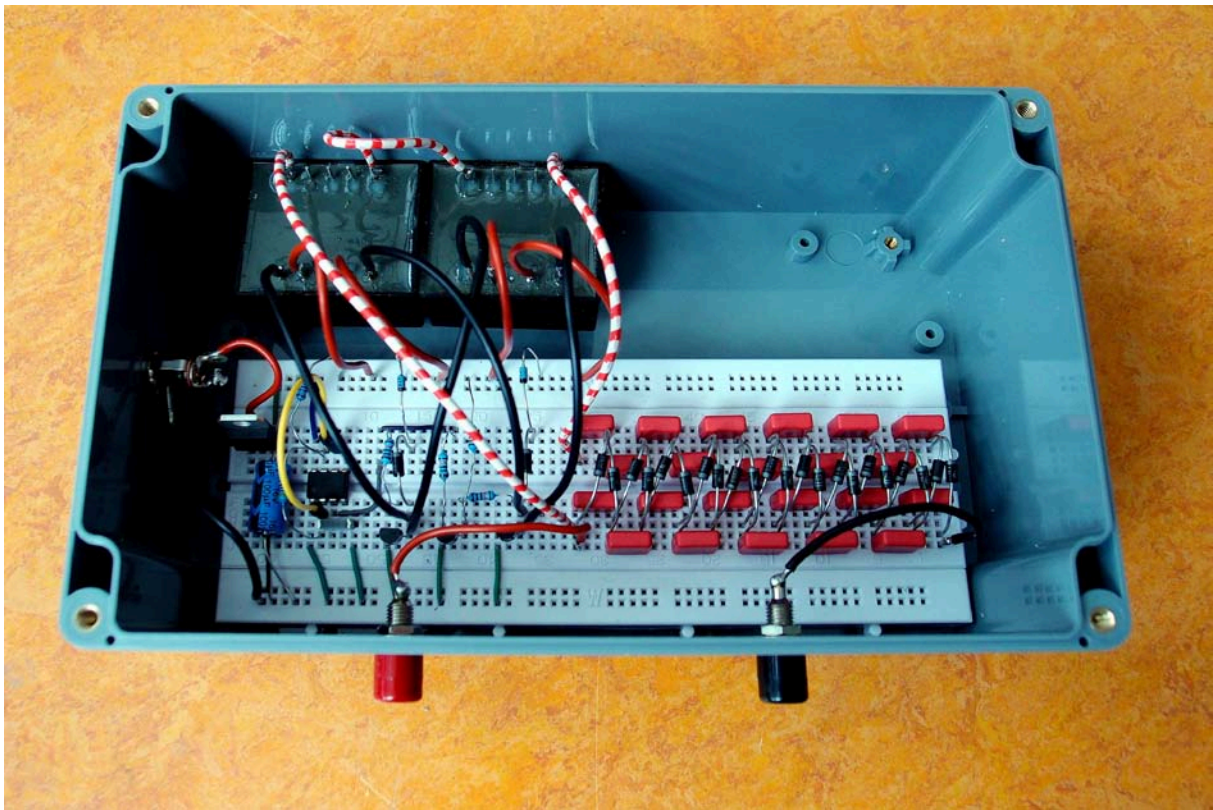
Z = zenerdiode van 15 V

Q_1 , Q_2 en Q_3 = general purpose transistor (bijv. de BC547)

TR = printtrafo prim. 220 V sec. 2x12 V;

In de schakeling wordt de primaire kant verwisseld met de secundaire kant.

In de onderstaande afbeelding is de schakeling op een breadboard gebouwd.



Een blokspanning van 15 V opwekken

Diode D_3 en de LM7815 dienen ter beveiliging van de schakeling. D_3 voorkomt schade als de plus- en minpool van de voeding verwisseld worden. De LM7815 levert een gelijkspanning van 15 V, die voor de 555-timer de maximaal toelaatbare voedingsspanning is. Deze 15 V wordt gestabiliseerd door condensator C_3 .

Met behulp van een 555-timer wordt een blokspanning van 15 V opgewekt. Ingang 2 en 6 van de 555 zijn met elkaar verbonden. De ingangsspanning (behorend bij pootje 2 en 6) is gelijk aan de spanning over condensator C_1 . De uitgangsspanning van de 555-timer kan 'hoog' of 'laag' zijn. Hoog wil zeggen: gelijk aan de positieve voedingsspanning en laag wil zeggen: gelijk aan aarde (minpool).

Als de condensatorspanning stijgende is, zal de uitgang op een bepaald moment omlaag schieten. Dit gebeurt als de condensatorspanning gelijk wordt aan $2/3$ van de voedingsspanning. Als de condensatorspanning dalende is, zal de uitgang op een bepaald moment omhoog schieten. Dit gebeurt als de condensatorspanning gelijk wordt aan $1/3$ van de voedingsspanning.

Pootje 7 speelt een belangrijke rol bij het omklappen van de 555. Als de uitgang namelijk hoog is, is pootje 7 in het inwendige van de 555 niet aangesloten en laadt condensator C_1 zich op via R_1 en R_2 . Als de uitgang laag is, is pootje 7 in het inwendige van de 555 aangesloten op aarde en ontlaadt condensator C_1 zich via R_2 .

Voor de tijdsduur waarbij de uitgang hoog is geldt:

$$T_{HOOG} = 0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1$$

Voor de tijdsduur waarbij de uitgang laag is geldt:

$$T_{LAAG} = 0,7 \cdot R_2 \cdot C_1$$

Omdat R_1 veel kleiner is dan R_2 , geldt bij benadering voor de gehele periode:

$$T = 1,4 \cdot R_2 \cdot C_1$$

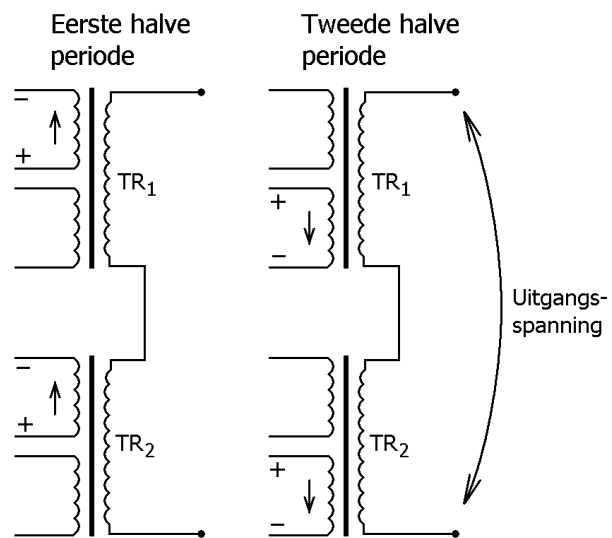
en voor de frequentie:

$$f = \frac{1}{1,4 \cdot R_2 \cdot C_1}$$

Bij $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ en $C_1 = 10 \text{ nF}$ is de frequentie 1,5 kHz.

De wisselspanning omhoog transformeren

De 555 levert een blokspanning van 15 V_{pp} (pp = piek tot piek). Met twee transformatoren Tr₁ en Tr₂ wordt deze spanning omhoog getransformeerd. Zoals hiernaast is getekend, bevatten zowel Tr₁ als Tr₂ twee primaire spoelen. Gedurende de eerste helft van een periode worden de bovenste primaire spoel van Tr₁ en de bovenste primaire spoel van Tr₂ op de voeding aangesloten (linker plaatje). Gedurende de tweede helft van de periode worden de onderste primaire spoel van Tr₁ en de onderste primaire spoel van Tr₂ op de voeding aangesloten (rechter plaatje). De polariteit is daarbij tegengesteld aan die tijdens de eerste helft van de periode.



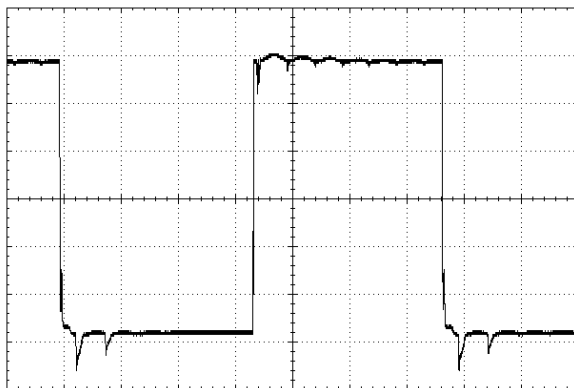
Uiteindelijk leveren de twee in serie geschakelde secundaire spoelen samen een hoge wisselspanning op (ettelijke honderden volts). In de figuur is deze spanning met 'Uitgangsspanning' aangeduid.

De bovenste primaire spoel van Tr₁ en de bovenste primaire spoel van Tr₂ worden gestuurd door transistor Q₁. De basis van Q₁ is via R₃ met de uitgang van de 555 verbonden, zodat Q₁ afwisselend geleidend en sperrend is. Uitsluitend tijdens de geleidende fase voert Q₁ de stroom door de spoelen naar aarde af. Transistor Q₃ doet hetzelfde als transistor Q₁, maar dan voor de onderste primaire spoel van Tr₁ en de onderste primaire spoel van Tr₂. Transistor Q₂ zorgt ervoor dat Q₃ in tegenfase opereert ten opzichte van Q₁.

Op het moment dat transistor Q₁ of Q₃ gaan sperren, mag de stroom door de bijbehorende spoelen niet abrupt nul worden. Dit zou tot zeer grote inductiespanningen leiden, wat het einde van Q₁ en Q₂ zou kunnen betekenen. Na de overgang van geleiden naar sperren keert de polariteit van de betreffende spoelen vliegensvlug om en loopt hun stroom via zenerdiode Z en diode D₁ naar de pluspool van de voeding. De gekozen zenerspanning van Z bedraagt 15 V, wat betekent dat het tempo waarin de stroom afneemt ongeveer even groot is als het tempo waarin de stroom daarvoor is toegenomen.

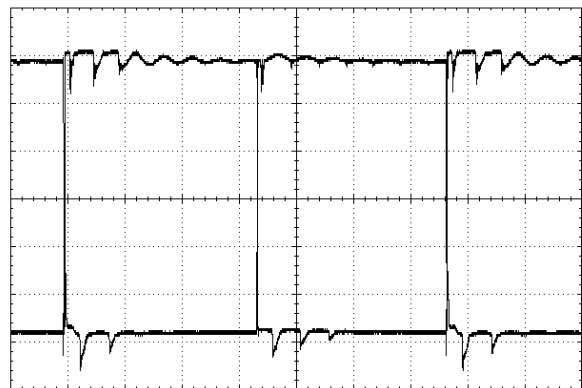
De volgende diagrammen tonen het spanningsverloop over de primaire spoelen. Opmerkelijk is de piek tot piekspanning van ongeveer 30 V. De ene helft van deze spanning komt voort uit de voedingsspanning van 15 V. Voor de andere helft is de zenerspanning van 15 V verantwoordelijk.

Spanning over één primaire poel



5 V/div 0,1 ms/div

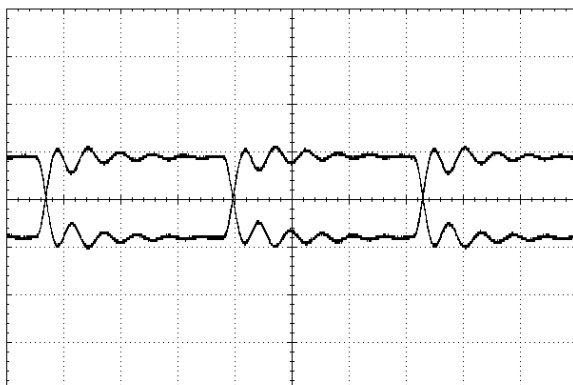
Spanning over beide primaire spoelen van één trafo



5 V/div 0,1 ms/div

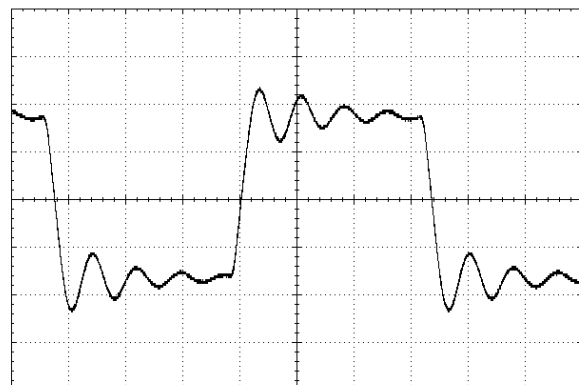
De onderstaande diagrammen geven het spanningsverloop van de secundaire spoelen weer. Zoals te zien is, is de piek-tot-piek-spanning van de combinatie van secundaire spoelen ongeveer 800 V (in onbelaste toestand).

Spanning van de twee secundaire spoelen



200 V/div 0,1 ms/div

Totale spanning van de sec. spoelen



200 V/div 0,1 ms/div

Analyse van de maximale stroom door de primaire spoelen

Als eerste berekenen we de maximale stroomsterkte door de primaire spoelen onder de aanname dat er geen onderlinge beïnvloeding van de spoelen is. De coëfficiënt van zelfinductie van iedere afzonderlijke primaire spoel bedraagt ongeveer 0,19 H (zie de bijlage waarin de meting is beschreven). Uitgaande van de formule

$$U = L \frac{dI}{dt}$$

en de aanname dat U (bijna) constant is, geldt dan voor de toename ΔI van de stroom door een primaire spoel:

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta t}{L}$$

Als we stellen $U = 15 \text{ V}$ en $\Delta t = 0,33 \text{ ms}$ (dit is de halve periode) en $L = 0,19 \text{ H}$ vinden we: $\Delta I = 26 \text{ mA}$.

In werkelijkheid zorgt de wederkerige inductie tussen de spoelen ervoor, dat deze stroom aanzienlijk lager ligt. Een bepaalde fluxverandering van het magneetveld in de ijzeren kern van een trafo kan namelijk worden veroorzaakt door een toename van de stroom in de ene primaire spoel of een afname van de stroom in de andere primaire spoel.

Als tweede berekenen we de maximale stroomsterkte die de collector van iedere transistor kan leveren tijdens geleiding. Voor de basisstroom geldt:

$$I_B = \frac{U}{R_3} = \frac{15 - 0,6}{100 \text{ k}} = 0,14 \text{ mA}$$

Als de stroomversterking van de transistor bijvoorbeeld 250 is, bedraagt de maximale collectorstroom van iedere transistor $250 \times 0,14 \text{ mA} = 35 \text{ mA}$. In werkelijkheid ligt deze stroom waarschijnlijk lager omdat de transistor verzadigd is. Uit de diagrammen volgt namelijk dat de spanning over de spoelen bij benadering de voedingsspanning is. De spanning tussen de collector en emitter moet dan dus zeer klein zijn.

Als we het bovenstaande samenvatten, kunnen we het volgende over de maximale waarde van de stroomsterkte door een primaire spoel zeggen. Rekenen aan de spoel zelf levert als bovengrens 26 mA. Rekenen aan een transistor geeft als bovengrens de helft van 35 mA, dus 17,5 mA (bij een stroomversterking van 250).

De gelijkstroom die de voeding (15 V) aan de schakeling levert, bedraagt 35 mA. Hiermee kan ook een ruwe schatting van de primaire spoelstromen gemaakt worden. Een deel van de 35 mA gaat naar de 555 en ligt in de orde van 10 mA. Het overige deel (25 mA) gaat hoofdzakelijk naar twee primaire spoelen (afwisselend de ene twee en de andere twee spoelen). Dit zou neerkomen op gemiddeld ongeveer 12,5 mA per spoel. De piekwaarde per spoel zou dan 25 mA zijn. Inconsistenties met de eerder genoemde waarden kunnen veroorzaakt worden door onder andere ohmse verliezen.

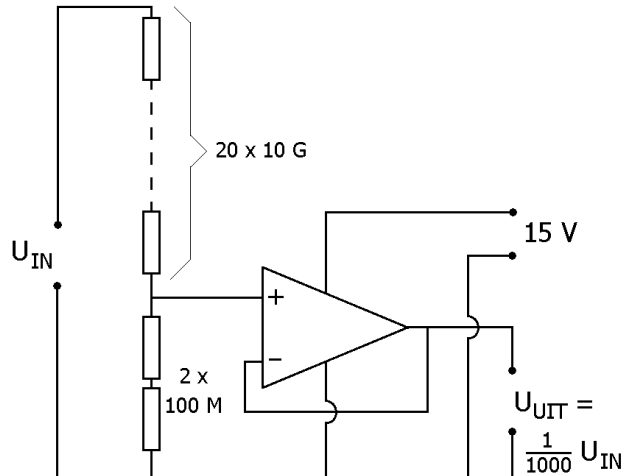
De wisselspanning omzetten in een hoge gelijkspanning

De combinatie van condensatoren C_2 en diodes D_2 zetten de hoge wisselspanning van de trafo's om in een zeer hoge gelijkspanning. De getekende schakeling bestaat uit elf trappen die ieder uit twee condensatoren en twee diodes bestaat. Elke trap levert een bijdrage aan de gelijkspanning ter grootte van de piek-tot-piek-spanning (U_{PP}). Uit het laatste diagram blijkt dat U_{PP} bij onbelaste secundaire spoelen ongeveer 800 V bedraagt. Dit zou betekenen dat na elf trappen de gelijkspanning ongeveer 9 kV bedraagt.

Bepaling van de uitgangsspanning van de schakeling

De uitgangsspanning van de schakeling kan worden bepaald door zowel de pluspool als de minpool op een gladde metalen bol aan te sluiten en de afstand tussen beide bollen te bepalen waarbij door de lucht doorslag plaats vindt. Deze afstand bedraagt ongeveer 3 mm. Aangezien de doorslagspanning van droge lucht bij een luchtdruk van 1 bar ongeveer 30 kV/cm is, kunnen we concluderen dat de uitgangsspanning van de schakeling ongeveer 9 kV is. Dit komt overeen met de eerder berekende waarde (zie hiervoor).

Een nauwkeuriger meting van de uitgangsspanning kun je uitvoeren door de hiernaast afgebeelde hoogohmige spanningsdeler (verhouding 1000 : 1) op de schakeling aan te sluiten. De ingang van de opamp moet ook hoogohmig zijn om de spanningsdeler niet noemenswaard te belasten (de TLC271 is geschikt). De met een multimeter bepaalde uitgangsspanning U_{UIT} bedraagt iets meer dan 9 V, wat betekent dat de opgewekte hoogspanning (U_{IN} dus) een ruime 9 kV is.



De stroom door de spanningsdeler bedraagt:

$$I = 9 \text{ kV} / 200 \text{ G}\Omega = 45 \text{ nA}.$$

De hierdoor veroorzaakte spanningsdaling ΔU in de cascadeschakeling kan met de volgende formule berekend worden.

$$\Delta U = \frac{I}{f \cdot C} \left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{1}{6} n \right)$$

Hierin is:

ΔU = spanningsverlies in de cascadeschakeling

I = uitgangsstroom

f = frequentie

C = capaciteit van de afzonderlijke condensatoren

n = aantal trappen.

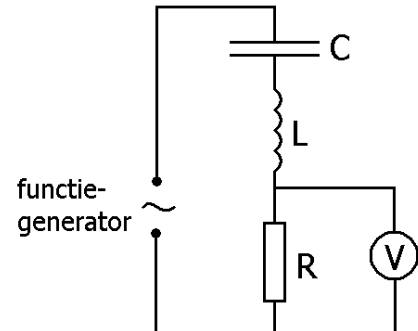
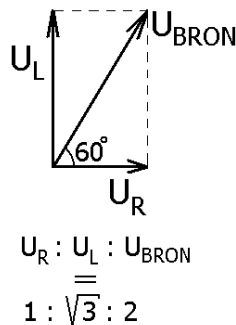
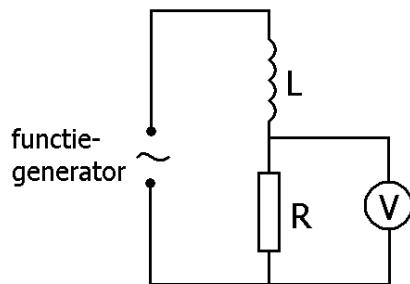
Bij $I = 45 \text{ nA}$, $f = 1,5 \text{ kHz}$, $C = 4,7 \text{ nF}$ en $n = 11$ geldt voor het spanningsverlies: $\Delta U = 6 \text{ V}$.

Dit is verwaarloosbaar ten opzichte van de 9 kV.

Bijlage: Het bepalen van de zelfinductie van een spoel

Er zijn meerdere manieren om de (coëfficiënt van) zelfinductie L van een spoel te bepalen. Zie bijvoorbeeld de onderstaande figuren. Zowel links als rechts levert de functiegenerator een harmonisch signaal met een constante amplitude en variabele frequentie. In de linker schakeling laat je de frequentie toenemen totdat de (effectieve) spanning over de weerstand gehalveerd is ten opzichte van de (effectieve) bronspanning. Uit het vectordiagram (middelste figuur) volgt dat dan geldt: $\omega \cdot L = \sqrt{3} \cdot R$. Hieruit volgt:

$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot R}{\omega}$$



De rechter schakeling geeft een alternatieve manier om L te bepalen. Hierbij moet de frequentie gezocht worden waarbij de spanning over R maximaal is en/of waarbij de spanning over R in fase is met de generatorspanning. De impedantie van L en C vallen dan tegen elkaar weg. Dan geldt:

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C}$$

Om de zelfinductie van de primaire spoel van de in dit project gebruikte trafo te testen, werd in de linker schakeling $R = 1 \text{ k}\Omega$ genomen. De frequentie waarbij de spanning over R de helft van de bronspanning was, bleek $1,4 \text{ kHz}$ te zijn. Hieruit volgt: $L = 0,20 \text{ H}$.

In de rechter schakeling werd $C = 0,2 \text{ }\mu\text{F}$ (twee $0,1 \text{ }\mu\text{F}$ parallel) en $R = 1 \text{ k}\Omega$ genomen. De frequentie waarbij de spanning over R maximaal was, bleek 850 Hz te zijn. Hieruit volgt: $L = 0,18 \text{ H}$.