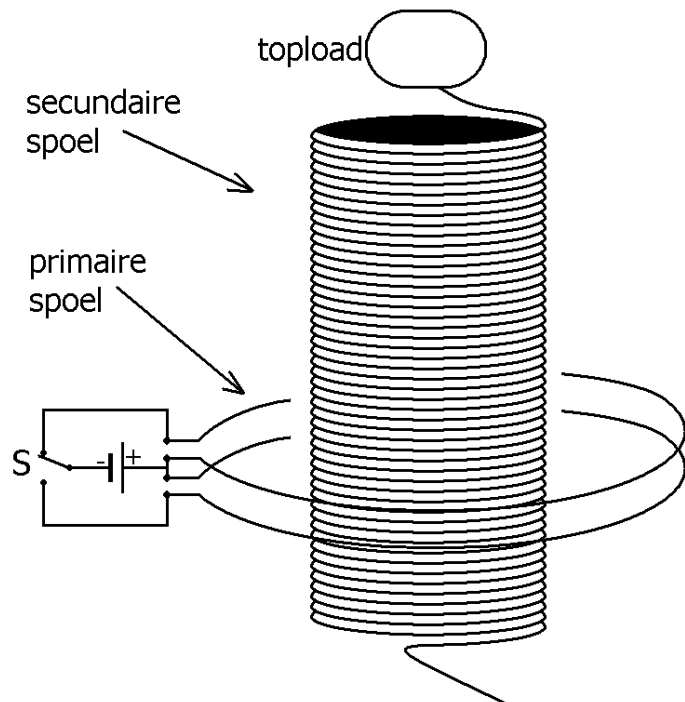


Teslaspoel

Hiernaast is een teslaspoel getekend. Deze bestaat eigenlijk uit twee spoelen, namelijk de primaire spoel en de secundaire spoel. De primaire spoel bevat weinig windingen, de secundaire spoel juist heel veel. Het principe van een teslaspoel is eenvoudig. Door de primaire spoel loopt een grote, steeds van richting omkerende, stroom. Daarbij wordt een magnetisch veld opwekt dat ook steeds van richting omkeert. Dit magneetveld wekt vervolgens een elektrische trilling in de secundaire spoel op. Als de frequentie van de stroom in de primaire spoel goed gekozen is, groeit deze trilling zo sterk aan, dat zich aan de bovenkant (bij de topload) ontladingsverschijnselen in de lucht voordoen.

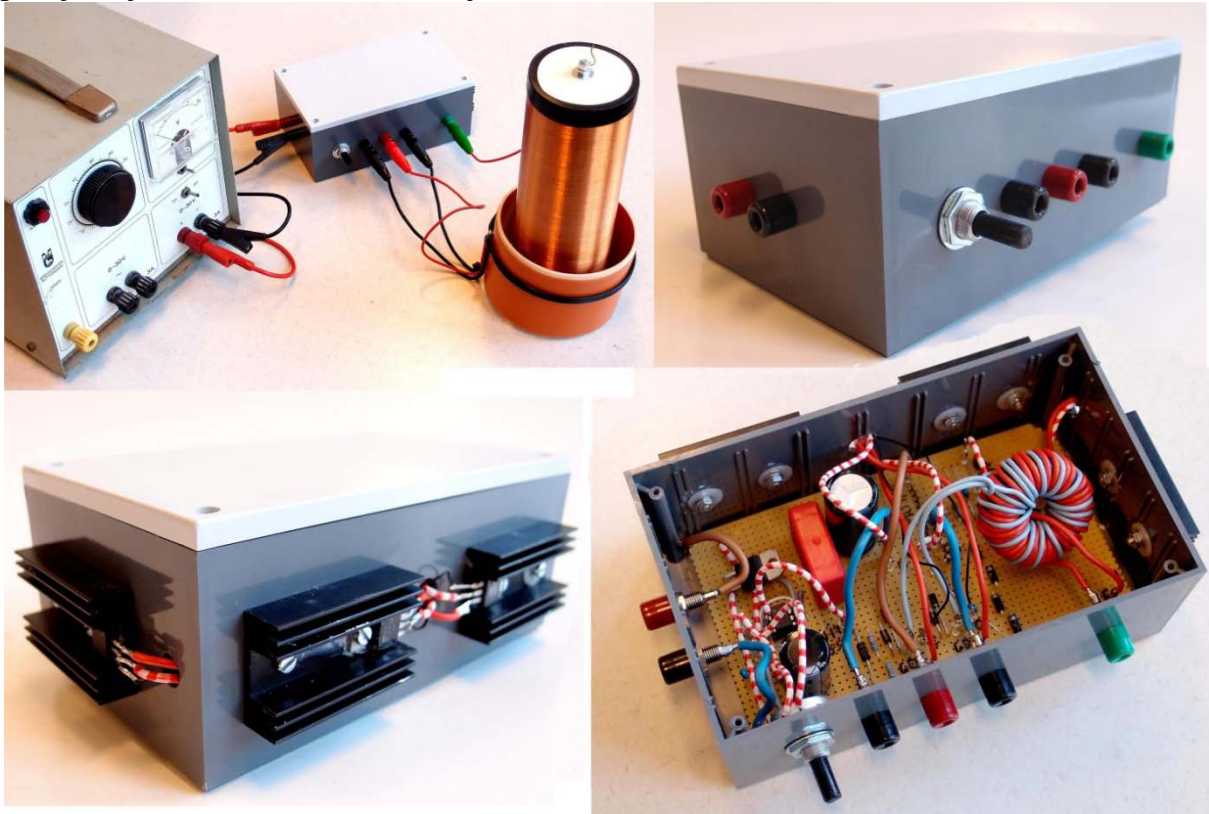


Een enkele spoel heeft uiteraard geen resonantiefrequentie. In de secundaire spoel spelen echter meerdere capaciteiten een rol, zoals die van de topload ten opzichte van de grond en parasitaire capaciteiten tussen de windingen. Dit heeft tot gevolg dat de secundaire spoel meerdere resonantiefrequenties heeft. Meestal brengt de primaire spoel de secundaire spoel in trilling bij de laagste resonantiefrequentie.

In ons geval bestaat de primaire spoel uit twee lussen (windingen). Wat onze teslaspoel anders maakt dan de meeste andere teslaspoelen, is dat beide lussen apart aangestuurd worden. Afwisselend wordt er een stroompuls door de ene lus en door de andere lus gestuurd. De stroompuls door de ene lus is steeds linksom (van bovenaf gezien), de stroompuls door de andere lus steeds rechtsom. In de bovenstaande figuur is dit schematisch weergegeven met schakelaar S die voortdurend van stand verandert. In werkelijkheid wordt het aansturen van de primaire spoel gedaan door een elektronische schakeling.

Praktische realisatie van de teslaspoel

De onderstaande plaatjes tonen een mogelijke uitvoering van de teslaspoel. In het overzichtsp plaatje (links boven) zijn rechts de primaire en secundaire spoel te zien. Het kleine kastje bevat de elektronische schakeling. Helemaal links staat de voedingskast. De andere drie plaatjes zijn detailfoto's van het kastje met de elektronica.



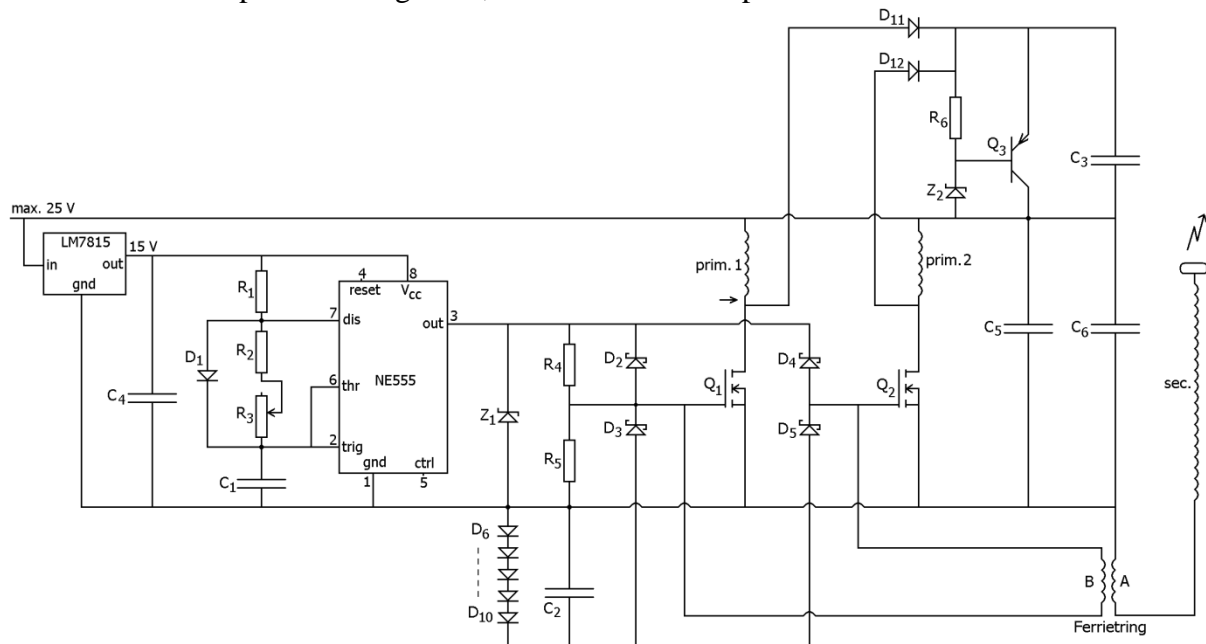
Het kastje heeft aan de korte zijde de plus- en min aansluiting voor de voeding (max. 25 V). De lange zijde van het kastje heeft een potmeter waarmee de puls frequentie geregeld kan worden (dit heeft niets te maken met de resonantiefrequentie van de secundaire spoel). Daarnaast bevinden zich de drie aansluitingen voor de primaire spoel. De stroom loopt van de rode aansluiting via de twee lussen naar de twee zwarte aansluitingen. Tenslotte moet de groene aansluiting met de onderkant van de secundaire spoel verbonden worden.

De figuur hiernaast toont de ontladingen aan de bovenkant van de secundaire spoel. Hoe hoger de voedingsspanning is, des te langer de 'bliksemschichtjes' zijn.



Schakeling

Met de onderstaande schakeling worden de twee lussen van de primaire spoel aangestuurd. De ene lus is met 'prim. 1' aangeduid, de andere lus met 'prim. 2'.



Hieronder staan richtlijnen voor de componenten.

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

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

$$R_4 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 47 \text{ k}\Omega$$

$$R_6 = 330 \Omega$$

$$C_1 = 100 \text{ nF}$$

$$C_2 = 100 \text{ nF}$$

$$C_3 = 100 \text{ nF}$$

$$C_4 = 3300 \mu\text{F}$$

$$C_5 = 3300 \mu\text{F}$$

$$C_6 = 6,8 \mu\text{F (polyester)}$$

D₂, D₃, D₄, D₅ liefst Schottky diodes (bijv. 1N5819) omdat deze snel kunnen ompolen.

D₁₁ en D₁₂ liefst diodes die snel ompolen en veel stroom kunnen doorlaten (bijv. SF18)

Q₁ en Q₂ power MOSFETs die snel kunnen schakelen (bijv. IRF3205)

Q₃ = pnp powertransistor (bijv. de BD912)

Q₁, Q₂ en Q₃ moeten op een koellichaam bevestigd worden.

$$Z_1 = 16 \text{ V}$$

$$Z_2 = 24 \text{ V}$$

Ferrietring; spoel A heeft 30 lussen, spoel B heeft 15 lussen.

Globale werking van de schakeling

De maximaal toegestane voedingsspanning is 25 V. Condensatoren C_5 en C_6 hebben tot taak om deze spanning constant te houden.

De LM7815 geeft een uitgangsspanning van 15 V. Dit is de maximaal toegestane voedingsspanning voor de NE555. Condensator C_4 heeft als taak om de uitgangsspanning van de LM7815 constant te houden.

De uitgang van de NE555 (aansluiting 3) geeft pulsen van 15 V.

De pulsduur bedraagt $\ln(2) \cdot R_1 C_1 = 0,69 \cdot 10k \cdot 100n = 0,69$ ms.

De tijd tussen twee pulsen bedraagt $\ln(2) \cdot (R_2 + R_3) C_1$.

Deze is minimaal $0,69 \cdot 100k \cdot 100n = 6,9$ ms (145 Hz).

Deze is maximaal $0,69 \cdot 200k \cdot 100n = 13,8$ ms (72 Hz).

Zenerdiode Z_1 beschermt de uitgang van de NE555 tegen (positieve) spanningspieken die afkomstig zijn van spoel B rond de ferrietring. De zenerspanning is net iets hoger dan 15 V gekozen (16 V).

Bij het begin van een puls trekt de spanningsdeler, bestaande uit R_4 en R_5 , de gate van transistors Q_1 en Q_2 omhoog tot een spanning van

$$\frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot U_{PULS} = \frac{47}{100 + 47} \cdot 15 = 4,8 \text{ V}$$

Deze spanning is meer dan de drempelspanning van Q_1 en Q_2 (dit is de minimale spanning tussen gate en source waarbij de FET geleidt). Bij de IRF3205 ligt deze namelijk tussen 2 V en 4 V. Kortom, Q_1 en Q_2 gaan geleiden en er gaat een stroom door de lussen (aangeduid met 'prim. 1' en 'prim. 2') lopen.

Om de ferrietring zijn twee spoelen A en B gewonden. Dit geheel werkt als een transformator die een belangrijke rol speelt bij de terugkoppeling (méékoppeling) van de secundaire spoel naar de gates van Q_1 en Q_2 . Deze terugkoppeling zorgt ervoor dat steeds slechts één van de twee FETs geleidt en dat het omschakelen naar de andere FET op het juiste moment plaats vindt. Hierdoor wordt de trilling in de secundaire spoel elke keer opnieuw versterkt.

De terugkoppeling werkt als volgt. De stroom door de secundaire spoel wordt via spoel A naar aarde geleid. In spoel B ontstaat hierdoor een inductiespanning die de ene FET in geleiding trekt en de andere FET juist laat sperren. Als de spanning in de secundaire spoel van richting omkeert, keert de spanning in spoel B ook om en gaat de andere FET geleiden.

Diodes D_2 en D_3 vormen een clamp voor de gatespanning van Q_1 en diodes D_4 en D_5 vormen een clamp voor de gatespanning van Q_2 . Een clamp is een (deel)schakeling die voorkomt dat de spanning een bepaalde grenswaarde overschrijdt. D_2 en D_4 voorkomen dat de gatespanningen hoger dan 15 V worden (ze worden dan namelijk geleidend). D_3 en D_5 voorkomen dat de gatespanningen te laag worden. De ondergrens bedraagt ongeveer min 3 V. Het voordeel van een negatieve ondergrens is dat de FETs dan sneller in de spertoestand getrokken kunnen worden. De negatieve spanning wordt gevormd door de voorwaartse spanningen van D_6 tot en met D_{10} bij elkaar op te tellen ($5 \times 0,6 \text{ V} = 3,0 \text{ V}$). Condensator C_2 stabiliseert deze spanning. Als de gatespanningen daaronder komen, gaan D_3 en D_5 geleiden.

Aan het einde van elke puls van de NE555 wordt de gatespanning van Q_1 en Q_2 naar nul gebracht, en dempt de trilling in de secundaire spoel uit. Het voordeel van pulsering is dat de kans op oververhitting van bepaalde componenten van de schakeling (met name Q_1 , Q_2 en Q_3) beperkt blijft.

Elke lus heeft een zekere zelfinductie in zich. Dit betekent dat de stroom door een lus niet sprongsgewijs kan toenemen en ook niet in één klap nul kan worden. Op het moment dat FET Q_1 of Q_2 geleidend wordt, komt de gehele voedingsspanning over de bijbehorende lus te staan. De stroom door de lus zal dan gelijkmatig (snel maar niet oneindig snel) toenemen. Omgekeerd zal de stroom in de lus de gelegenheid moeten krijgen om nog even door te lopen nadat de FET gaat sperren. In het volgende wordt uitgelegd hoe dit in de schakeling gerealiseerd wordt.

Stel bijvoorbeeld dat Q_1 op een bepaald moment gaat sperren. De stroom door de bijbehorende lus (prim. 1) heeft tot dit moment flink kunnen aangroeien en is dus groot. Omdat de stroom nu opeens niet meer door Q_1 kan lopen, zoekt hij een andere weg. Het luseinde waar in de schakeling een pijltje bij staat, wordt nu positief. De stroom door de lus loopt dan via D_{11} en powertransistor Q_3 naar de voedingslijn. Overigens speelt de zenerspanning van zenerdiode Z_2 een belangrijke rol. Deze bepaalt namelijk hoe positief het luseinde (met pijltje) moet worden om gebruik te kunnen maken van de alternatieve route voor de stroom. Stel bijvoorbeeld dat de zenerspanning 24 V is. De spanning over de spoel moet dan groter dan 24 V zijn. Om precies te zijn: 24 V plus de basis-emitter-spanningbasis van Q_3 (ongeveer 0,6 V) plus de voorwaartse spanning van D_{11} (ook ongeveer 0,6 V). Condensator C_3 heeft tot taak om deze spanning stabiel te houden.

De onderstaande oscilloscoopbeelden geven het tijdsverloop van de gatespanningen weer. In het linker beeld is de spanning van één gate in combinatie met de uitgangsspanning van de NE555 gegeven. Om overlap zoveel mogelijk te voorkomen, zijn de signalen in verticale richting ten opzichte van elkaar verschoven. In het middelste beeld zijn beide gatespanningen weergegeven (weer verschoven ten opzichte van elkaar). In het rechter beeld is het begin van de oscillatie in detail weergegeven.



Omschakelmomenten van de FETs

Hiernaast is onze teslaspoel nogmaals getekend. Door de ene lus van de primaire spoel loopt stroom I_1 . Deze stroom wekt een daarmee evenredige magnetische flux Φ_1 op. Door de andere lus van de primaire spoel loopt stroom I_2 . Deze wekt (de daarmee evenredige) magnetische flux Φ_2 op.

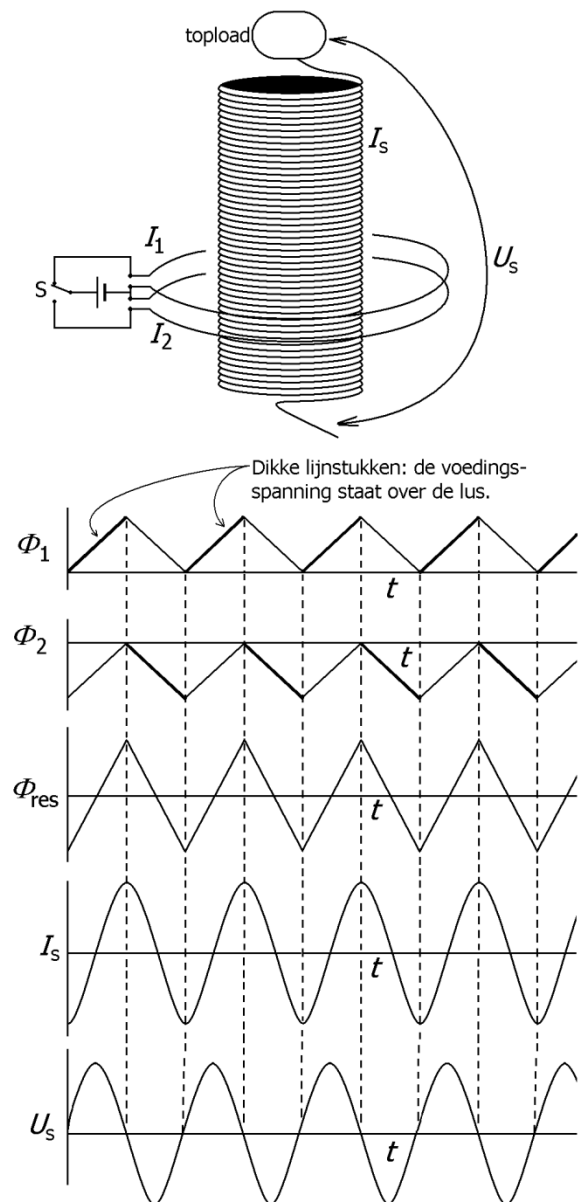
In het bovenste diagram hiernaast is Φ_1 tegen de tijd t uitgezet. In het tweede diagram is Φ_2 tegen de tijd uitgezet. Omdat I_2 in tegengestelde richting loopt als I_1 , zijn Φ_1 en Φ_2 ook tegengesteld gericht. In de diagrammen is Φ_1 positief genomen en Φ_2 negatief. Overigens zijn de twee diagrammen geïdealiseerd.

De verticale stippellijnen geven de omschakelmomenten van de FETs (Q_1 en Q_2) weer. De dikke lijnstukken geven aan dat de bijbehorende FET geleidend is. De absolute waarde van de stroomsterkte neemt dan toe. Bij de dunne lijnstukken is de FET gesperd en daalt de absolute waarde van de stroomsterkte weer.

Het derde diagram geeft de resulterende flux Φ_{RES} door de primaire spoel weer. Dit diagram wordt verkregen door de eerste twee diagrammen 'bij elkaar op te tellen'.

Het vierde en het vijfde diagram geven het tijdsverloop van de stroomsterkte I_S en de spanning U_S van de secundaire spoel. De secundaire stroomsterkte is in fase met de door de primaire spoel opgewekte flux. Dit is logisch als je bedenkt dat versterking van de elektrische trilling optreedt als de flux, die door de primaire spoel wordt opgewekt, in fase is met de flux, die door de secundaire stroomsterkte wordt opgewekt.

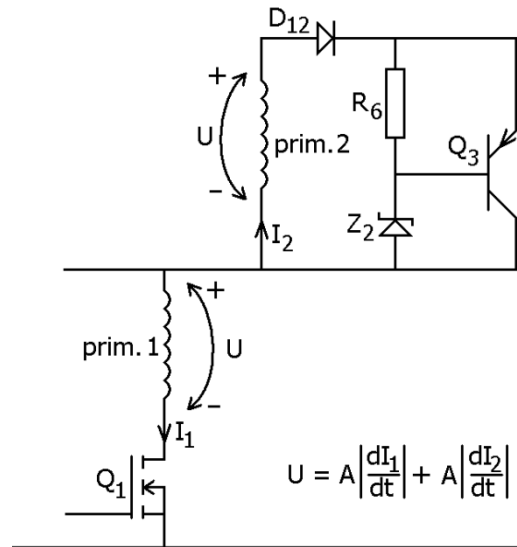
Het omschakelmoment van de FETs vindt plaats als de secundaire stroom zijn maximum waarde heeft bereikt. Deze stroom loopt ook door spoel A van de ferriering. Omdat de tijdsafgeleide van deze stroomsterkte van teken omkeert, keert de inductiespanning in spoel B ook van teken om. Dit volgt uit de formule $U = M \cdot dI/dt$ (met $M =$ wederkerige inductie), die in de appendix 1 wordt besproken.



De maximale stroom in de lussen van de primaire spoel

De schakeling bevat twee FETs Q_1 en Q_2 die om beurten geleidend zijn. Laten we de situatie bekijken waarin Q_1 geleidt en Q_2 spert. Stroom I_1 loopt dan van de plusvoeding via de ene lus ('prim. 1') en Q_1 naar aarde. Zie de figuur hiernaast. De stroom door de andere lus ('prim. 2') loopt dan via diode D_{12} en powertransistor Q_3 terug naar de plusvoeding.

Stromen I_1 en I_2 lopen in tegengestelde richtingen om de secundaire spoel. Hierdoor is de fluxbijdrage van lus 1 tegengesteld gericht aan de fluxbijdrage van lus 2. Omdat I_1 echter toeneemt en I_2 juist afneemt, versterken de fluxveranderingen elkaar.



Als we aannemen dat beide lussen dezelfde flux omvatten, is de inductiespanning U in beide lussen gelijk. In de figuur is deze inductiespanning aangegeven, samen met de polariteit (+ en -). Voor de grootte van de inductiespanning geldt:

$$U = A \cdot \left| \frac{dI_1}{dt} \right| + A \cdot \left| \frac{dI_2}{dt} \right|$$

In deze vergelijking is A de omvatte flux door een lus ten gevolge van een stroomsterkte van één ampère door deze lus. Appendix 1 geeft hier meer achtergrondinformatie over.

Omdat de inductiespanningen in beide lussen gelijk zijn, moet de zenerspanning van zenerdiode ongeveer even groot zijn als de voedingsspanning. Als de zenerspanning aanzienlijk groter is, veroorzaakt lus 1 een spanningspiek in de voedingslijn. Als de zenerspanning aanzienlijk lager ligt, wordt de stroom door diode D_{12} en transistor Q_3 erg hoog.

Het is eenvoudig om de maximale stroomsterkte door elke lus te berekenen.

Als we aannemen dat stroom I_1 even snel toeneemt als stroom I_2 afneemt, geldt:

$$\left| \frac{dI_1}{dt} \right| = \left| \frac{dI_2}{dt} \right|$$

Dan geldt dus:

$$U = 2 \cdot A \cdot \left| \frac{dI_1}{dt} \right|$$

Als T de periode van de trilling is, is $T/2$ de tijd tussen twee schakelmomenten.

Als we voor U de voedingsspanning U_{BRON} nemen, volgt uit de laatste formule voor de maximale stroom I_{MAX} :

$$I_{MAX} = \frac{U_{BRON} \cdot T}{4 \cdot A}$$

Uit appendix 2 volgt dat voor A geldt:

$$A = R_L \mu_o \mu_r \left[\ln \frac{8R_L}{R_D} - 2 \right]$$

Hierin is R_L de straal van de lus en R_D de straal van de draad.

Bij een lusstraal van 5,5 cm en een draadstraal van 1 mm krijgen we:

$$A = 0,055 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\ln \frac{8 \cdot 0,055}{0,001} - 2 \right] = 0,28 \mu\text{Wb/A}$$

Bij een bronspanning van 25 V en een periode T van 2 μs (dus $f = 500 \text{ kHz}$) geldt dan:

$$I_{MAX} = \frac{25 \text{ V} \cdot 2 \mu\text{s}}{4 \cdot 0,28 \mu\text{Wb/A}} = 45 \text{ A}$$

In onze teslaspoel loopt er één lus linksom en één lus rechtsom rond de secundaire spoel. Je zou kunnen overwegen om deze enkele lussen te vervangen door meerdere lussen linksom en meerdere lussen rechtsom. Dit leidt echter, bij gelijkblijvende voedingsspanning, tot een zwakker opgewekt magnetisch veld. Dit kun je als volgt beredeneren. De opgewekte flux (en veranderingen daarvan) is evenredig met N (= het aantal windingen). De maximale stroomsterkte is echter omgekeerd evenredig met het kwadraat van N omdat dit ook voor de zelfinductie geldt. Het komt er op neer dat de opgewekte fluxveranderingen omgekeerd evenredig met N zijn.

Vereiste capaciteit ter stabilisatie van de voedingsspanning

Stel dat condensatoren, die dienen om de voedingsspanning te stabiliseren, de vereiste stroompulsen door de lussen van de primaire spoel moeten leveren. Welke verandering van de voedingsspanning brengt dit dan teweeg?

De verplaatste lading bij een gemiddelde stroom I_{GEM} gedurende een halve periode $T/2$ is:

$$\Delta Q = \frac{I_{GEM} \cdot T}{2}$$

Dit heeft een spanningsfluctuatie ΔU tot gevolg van

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_{GEM} \cdot T}{2 \cdot C}$$

Als je een maximum waarde stelt aan ΔU , kun je de vereiste capaciteit als volgt uitrekenen:

$$C = \frac{I_{GEM} \cdot T}{2 \cdot \Delta U}$$

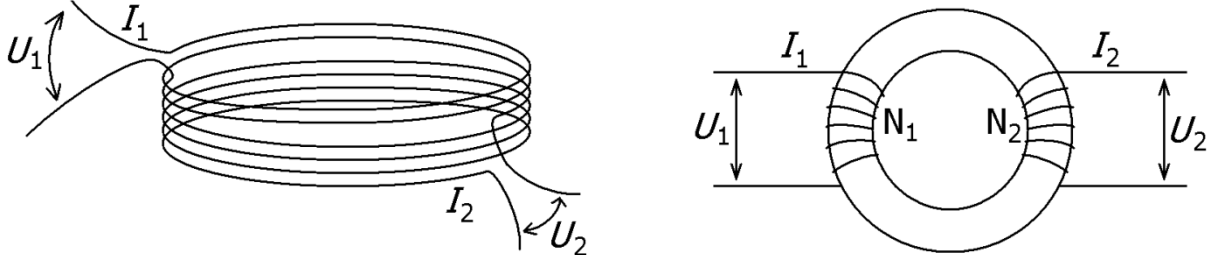
Stel dat $I_{GEM} = 22,5$ A (dit is de halve piekstroom), $T = 2$ μ s en $\Delta U = 0,1$ V. Voor C geldt dan:

$$C = \frac{22,5 \text{ A} \cdot 2 \mu\text{s}}{2 \cdot 0,1 \text{ V}} = 225 \mu\text{F}$$

Appendix 1:

Wisselwerking tussen twee spoelen die dezelfde magnetische flux omvatten.

Hieronder zijn twee situaties getekend waarin zich twee spoelen bevinden die, magnetisch gezien, sterk aan elkaar gekoppeld zijn. In de linker situatie loopt het magneetveld door lucht, in de rechter situatie loopt het magneetveld door een ringkern van ferriet.



De spoelen hebben de nummers 1 en 2. De inductiespanning over en de stroom door spoel 1 zijn met U_1 en I_1 aangegeven. Op dezelfde manier horen U_2 en I_2 bij spoel 2. Het aantal windingen van de spoelen is N_1 en N_2 .

In het volgende tekst gaan we er vanuit dat beide spoelen dezelfde magnetische flux Φ omvatten. Volgens de wet van Faraday geldt dan voor de absolute waarden van de inductiespanningen U_1 en U_2 :

$$U_1 = N_1 \cdot \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| \quad \text{en} \quad U_2 = N_2 \cdot \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$$

Uit de bovenstaande formules volgt:

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

Laten we ons nu eerst richten op één spoel zonder wisselwerking met de andere spoel. Dit zou bijvoorbeeld spoel 1 kunnen zijn als er door spoel 2 nul geen stroom loopt. Elke winding van de spoel levert een bijdrage aan de magnetische flux. Deze fluxbijdrage is evenredig aan de stroomsterkte I . Met A als evenredigheidsconstante geldt dus:

$$\Phi = A \cdot I.$$

De fluxbijdrage van de hele spoel, bestaande uit N windingen, is dan:

$$\Phi = A \cdot N \cdot I$$

Voor de inductiespanning over de spoel geldt dan:

$$U = N \cdot \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = A \cdot N^2 \cdot \left| \frac{dI}{dt} \right|$$

Dit wordt vaak geschreven als:

$$U = L \cdot \left| \frac{dI}{dt} \right|$$

Hierin is L de zogenoemde ‘coëfficiënt van zelfinductie’ of kortweg zelfinductie.

Hiervoor geldt:

$$L = A \cdot N^2.$$

We keren nu terug naar het algemene geval waarin beide spoelen stroomvoerend zijn. Dan geldt voor de inductiespanning in de eerste spoel:

$$U_1 = A \cdot N_1^2 \cdot \left| \frac{dI_1}{dt} \right| + A \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \left| \frac{dI_2}{dt} \right|$$

De twee termen in deze vergelijking moeten bij elkaar worden opgeteld als beide fluxveranderingen elkaar versterken; anders moeten ze van elkaar worden afgetrokken.

De laatste vergelijking kan worden geschreven als:

$$U_1 = L_1 \cdot \left| \frac{dI_1}{dt} \right| + M_{12} \cdot \left| \frac{dI_2}{dt} \right|$$

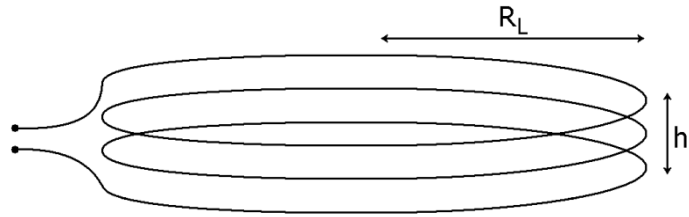
Hierin is M_{12} de coëfficiënt van wederkerige inductie.

Hiervoor geldt:

$$M_{12} = A \cdot N_1 \cdot N_2$$

Appendix 2: Zelfinductie van een spoel

Hiernaast is een spoel getekend. De windingen (lussen) zijn cirkelvormig. Zolang de hoogte h van de spoel klein is ten opzichte van de straal R_L van de spoel, geldt de volgende uitdrukking voor zijn zelfinductie.



$$L = N^2 R_L \mu_0 \mu_r \left[\ln \frac{8R_L}{R_D} - 2 + Y \right]$$

Hierin is:

L = coëfficiënt van zelfinductie van de spoel

N = aantal windingen (lussen)

μ_0 = magnetische permeabiliteit in vacuüm = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

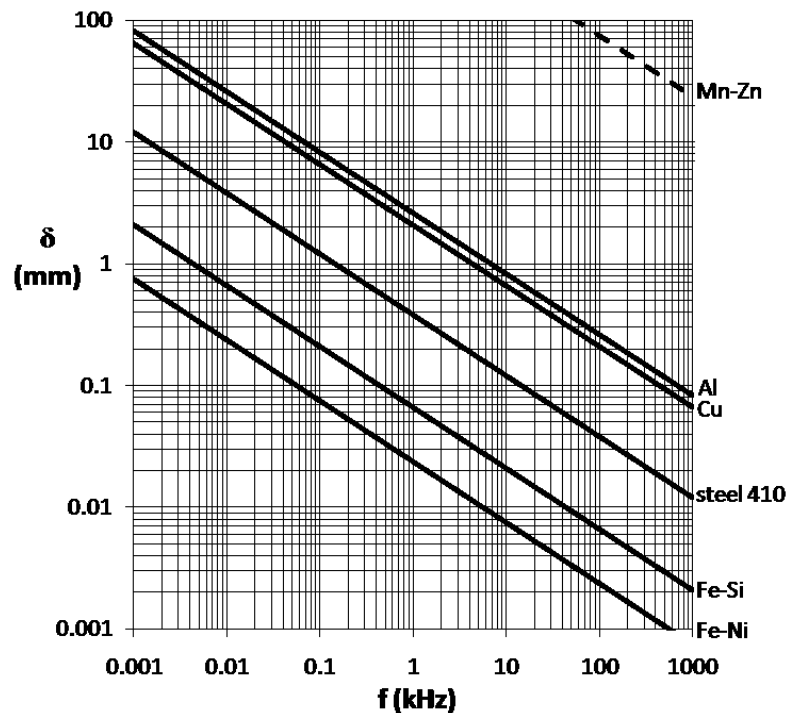
μ_r = relatieve permeabiliteit; in vacuüm en lucht is dit 1.

R_L = straal van een lus

R_D = straal van de draad (die een cirkelvormige doorsnede heeft)

Y = constante; $Y = 0$ bij sterk skineffect en $Y = 0,25$ bij homogene stroomdichtheid

De constante Y wordt bepaald door hoe sterk het skineffect is. Dit is het verschijnsel dat wisselstromen met hoge frequenties alleen aan de buitenkant van geleiders lopen. Hiernaast is de skindiepte δ tegen de frequentie f uitgezet voor verschillende geleiders.



Teslaspoelen hebben een resonantiefrequentie van 500 kHz of hoger. Bij 500 kHz is de skindiepte bij koper minder dan 0,1 mm. Uit deze kleine waarde kun je concluderen dat het skineffect bij een teslaspoel sterk aanwezig is. Voor Y moet dan 0 genomen worden.