



M.H. Trompstraat 6  
3601 HT Maarssen  
The Netherlands

Tel: + 31 (0) 346 284004

Fax: + 31 (0) 346 283691

Email: [info@totech.nl](mailto:info@totech.nl)

Web: [www.totech.nl](http://www.totech.nl)

CoC: 30169033

VAT: NL001961734B19

## ***Cursus "Spoelen en Transformatoren".***

### ***Inleiding.***

In veel elektronische apparatuur komt men "inductieve componenten" tegen. Hierbij kan men denken aan: signaaltransformatoren, spoelen in filters, transformatoren en (opslag)spoelen in schakelende voedingen (switched mode power supplies), schakelende inverters (Electronic Ballast, DC/AC converters, lasapparaten), common mode en differential mode spoelen/transformatoren ter verkrijging van EMC, spoelen in RF netwerken, spoelen in inductieve antennes (RFID, veldsensoren), etc.

Er is een grote verscheidenheid aan uitvoeringsvormen, te denken valt aan: meer- of enkellaag luchtspoelen, spoelen met ferriet- of (poeder) ijzerkern, spoelen en transformatoren in de vorm van gedrukte bedrading op de print, etc.

Ondanks dat spoelen en transformatoren in veel elektronische circuits te vinden zijn, ontbreekt het vaak aan kennis om de juiste keuzes te maken. Sommige ontwerpers ervaren spoelen als een bijzonder lastig iets. Dit kan zelfs zover gaan, dat men het gebruik van spoelen omzeilt, terwijl een inductieve component commercieel en technisch gezien op zijn plaats zou zijn.

Gebruikt u inductieve componenten in uw ontwerp, bent u betrokken bij het ontwerp, de specificatie of selectie van spoelen en transformatoren? Zo ja, dan is de cursus "spoelen en transformatoren" iets voor u.

De cursus "Spoelen en Transformatoren" behandelt Magnetisme, Spoelen en Transformatoren op een praktisch theoretische manier met uw toepassing in het achterhoofd. Als u inductieve componenten gebruikt in vermogenstoepassingen, dan wordt u niet "lastig gevallen" met het ontwerp van inducties op basis van Microstrip Lines. In geval van inductieve antennes (bijv. 13.56 MHz RFID readers) kunnen magnetische materialen (ferrieten, en ferrometalen) veelal minder diepgaand behandeld worden.

### **Voor wie is deze cursus bedoeld?**

Deze cursus is bedoeld voor eenieder die tijdens het werk te maken heeft met het ontwerpen, selecteren en specificeren van spoelen en transformatoren en/of meten en opwekken van magnetische velden.

### **Leerdoelen.**

Na het volgen van deze cursus:

- Bent u bekend met magnetisme en (zelf)inductie.
- Bent u bekend met het elektrisch veld en diëlektrische materialen (onder andere t.b.v. veiligheid)
- Kent u de in de praktijk gebruikte begrippen.
- Bent u bekend met de wijze van specificeren van kernmaterialen.
- Heeft u inzicht in de eigenschappen van "echte" spoelen (dus met parasitaire effecten)
- Kunt u spoelen en transformatoren (met of zonder ferrietkern) ontwerpen met een beperkt aantal iteratieslagen.
- Bent u bekend met veiligheidsaspecten (indien spoelen toegepast worden in vermogenselektronica, wordt niet uitputtend behandeld).

### **Vereiste voorkennis?**

Cursisten dienen een MBO (met wiskunde) of HBO denkniveau te hebben. Cursisten dienen bekend te zijn met:

- Algebra en goniometrische functies
- Complexe Rekenwijze ( $a+jb$ ,  $|Z|$ ,  $\text{Arg}(Z)$ , etc)
- Idee achter integreren/differentiëren
- 2D voorstellingen van 3D problemen

Er wordt weinig gebruik gemaakt van differentiaalrekening. De cursus kan zelfs zonder differentiaalrekening gegeven worden. De cursus wordt in het Nederlands of Engels gegeven.

Is uw rekenvaardigheid niet (meer) voldoende? Dat is geen probleem. Voorafgaande aan de cursus kan een introductie rekenen gegeven worden. Afhankelijk van het einddoel kan hierin complexe rekenwijze, differentiëren en integreren opgenomen worden.

### **Opzet van de cursus:**

Deze cursus maakt gebruik van het "Course & Go" principe. Het accent ligt op uw toepassing van inductieve componenten. Alleen die zaken die voor u van belang zijn worden behandeld.

Het is wenselijk, doch niet vereist, dat u kunt beschikken over een computer met daarop een circuit simulatieprogramma dat beschikt over tijddomein- en kleinsignaalanalyse. Een SPICE derivaat is zeer geschikt (eventueel een "demo" of "light" versie). De docent maakt gebruik van B2 SPICE A/D V4 Professional (Beige Bag software).

### **Cursusinhoud:**

#### *Inleiding velden en aanverwante begrippen*

In dit deel wordt het concept van velden behandeld en verwante begrippen (scalair en vectorveld, veldsterkte, veldlijnen, potentiaal, flux, fluxdichtheid, continuïteit van flux en discontinuïteit van veldsterkte, lijn- en kringintegralen, (an)isotropie, etc). De uitleg wordt ondersteund met voorbeelden uit de elektrotechniek en stromingsleer.

#### *Het elektrisch veld*

Het elektrisch veld wordt behandeld in verband met parasitaire effecten van inductieve componenten en elektrische veiligheid.

E, D, J en  $J_D$  veld, relaties tussen veldgerelateerde grootheden (E, D,  $\epsilon$ , etc) en component-gerelateerde grootheden (Q,U, I, capaciteit, etc), veldverdeling in isolatielagen met verschillende samenstelling, elektrische doorslag en gedeeltelijke doorslag (Partial Discharge).

#### *Het magnetisch veld I, (homogeen medium, spoel van één winding)*

Het magnetisch veld wordt behandeld op nagenoeg gelijke manier als het elektrische veld, uitgaande van een spoel met één winding (Magnetische veldlijnen, koppel/kracht werking [Kompasnaald], Flux, B-veld, H-veld, fluxdichtheid, permeabiliteit). Net als in geval van het elektrisch veld, wordt een directe relatie gelegd tussen veldgerelateerde grootheden (H, B,  $\mu$ , etc) en componentgerelateerde grootheden (V-s-product, I, magnetische spanning [integraal H·dl], Zelfinductie,  $R_m$ , etc) zodat men inzicht krijgt in de invloed van geometrie op zelfinductie.

Tot slot wordt in dit deel ingegaan op materiaalovergangen (bijv lucht/ferriet) en wordt een begin gemaakt met het bepalen van (zelf)inductie.

#### *Het magnetisch veld II, (superpositie van velden, meerdere windingen)*

In dit deel wordt dieper ingegaan op hoe het veld er ruimtelijk uitziet en waarom: Biot en Savart wet, principe bepaling magnetisch veld aan de hand van stroomverdeling en superpositie van velden, zelfinductievermeerdering, Magnetisch moment, krachtwerking ( $F = q \cdot v \cdot B$ ,  $E = v \cdot B$ ,  $F = I \cdot l \cdot e \cdot B$ ), opgeslagen energie. Tot slot wordt de veldverdeling van diverse constructies behandeld (lussen, korte en lange draden, lange rechte spoel, toroïde).

### *Magnetische materialen (zowel hard als zacht)*

Magnetische materialen wordt uitgelegd aan de hand van microscopische magneetjes met zeker magnetisch moment en zekere weerstand tegen verdraaien. Er wordt niet ingegaan op de metallurgische aspecten.

De volgende begrippen komen aan bod: groot- en kleinsignaal hysteresislus, permeabiliteit, complexe permeabiliteit ( $\mu'$ ,  $\mu''$ , impedantiepermeabiliteit), verzadigingsveldsterkte, coërcitieve veldsterkte, remanent en permanent magnetisme, magnetostrictie, disaccommodatie, invloed van voormagnetisatie (DC stroom), kernverliezen, invloed van temperatuur op materiaaleigenschappen, eigenschappen en toepassingsgebieden van diverse kernmaterialen (Ferriet, amorphous metal, gelamineerde kernen, poederijzer).

### *Inductie, zelfinductie en gebruikte begrippen in relatie tot spoelen*

AC gedrag van spoel bestaande uit een winding, Principe van (wederzijdse) inductie, flux koppelfactor, effect van meer windingen op flux en zelfinductie, kortgesloten windingen, skineffect, proximity effect, AC & DC zelfinductie, Q-factor, eigenresonantie, schijnbare zelfinductie, etc.

Behandeling van diverse standaardformules om zelfinductie uit te kunnen rekenen. Daar waar het wiskundig gezien niet te gecompliceerd is, worden formules afgeleid of aannemelijk gemaakt (zelfinductie lange rechte spoel, toroïde, spoelen op E-kernen [met en zonder luchtspleet], strip dicht bij grondvlak, printsporen, tweedraadsgeleiders, etc).

### *Magnetische circuits en transformatoren*

Dit hoofdstuk is volledig gewijd aan spoelen en transformatoren op kernmateriaal. Aan bod komt: Wet van Hopkinson, nullast zelfinductie, spreidingszelfinductie, kernverzadiging, magnetische weerstand, effect van luchtspleten (maximale stroom, tolerantie op zelfinductie, lineariteit, etc), DC door transformator, nuttig gebruik van lekflux (lektransformator), spoelen voor filters, spoelen voor energieopslag, meetmethoden ter bepaling van transformatorparameters. De te behandelen voorbeelden en meetmethoden worden in overleg met de klant bepaald.

In dit deel wordt ook aandacht besteed aan veiligheid (basisbegrippen isolatie [enkel, dubbel, versterkt], overspanningsklassen, foutsituaties, minimale isolatieafstand en kruipafstand, Partial Discharge, thermische overbelasting, thermische beveiligingen).

### *Parasitaire effecten en verwante begrippen*

Correctie op berekening van luchtspleten (fringing effect), Lek buiten de kern om, verliezen t.g.v. lekflux uit luchtspleet, wikkelmethode t.b.v. lage spreidingszelfinductie en proximity-verliezen, modellering en meting t.b.v. simulatie.

### *Spoelen t.b.v. EMC en ontkoppeling.*

Basisprincipes ontkoppeling (Differential en Common Mode), inschakelverschijnselen (transients en ringing) en hoe deze te beperken, selectie geschikte materialen.

Het cursusmateriaal bestaat uit een combinatie van speciaal voor deze cursus gemaakt materiaal (ong. 250 pagina's), documentatie van producenten van magnetische materialen (denk hierbij aan Ferroxcube, Epcos, Vacuumschmelze, TDK, Magnetics) en application notes, etc.

De cursus kan worden afgesloten met een examen.

### **Extra onderwerpen**

#### *Vermogenselektronica*

Omdat spoelen en transformatoren veelvuldig gebruikt worden in vermogenselektronica, kan de cursus uitgebreid worden met een module vermogenselektronica (op basis van speciaal gemaakt materiaal, bestaande uit lopende tekst en afbeeldingen (totaal 80 pagina's) ). Aan bod komen: single-ended, half bridge en full bridge topologie, resonant, quasi-resonant en volledig resonante topologie (ZCS en ZVS), dissiperende en energie terugleverende snubbers, EMC aspecten (onder andere in frequentieregelaars [VFD] voor draaistroom motoren).

#### *Lange leidingeffecten.*

Daar waar hoge flanksteilheid aanwezig is, kunnen "lange leiding effecten" optreden. Zelfs bij schakelfrequenties in orde van 20 kHz kunnen vreemde situaties ontstaan (bijv. spanningspieken bij frequentieregelaars). De cursus kan uitgebreid worden met een module transmissielijnen welke speciaal gericht is op vermogenselektronica.

#### *Gekoppelde kringen.*

Magnetische energieoverdracht komt men steeds vaker tegen. Hierbij wordt veelvuldig resonantie gebruikt. Er is een module beschikbaar welke ingaat op energie overdracht d.m.v. gekoppelde kringen.

### **Locatie, Datum en Aantal Deelnemers.**

Deze cursus wordt on-site gegeven. Dit kan zowel binnen als buiten kantooruren. Dit cursusconcept is intensief met veel terugkoppeling. Het aantal deelnemers is daardoor beperkt tot 8 personen.

De benodigde tijd is afhankelijk van: instapniveau cursisten, aantal cursisten, overeengekomen programma en gewenste eindniveau. U dient te denken aan 5..12 dagen.

### **Prijs**

Zoals hiervoor genoemd, is de cursusduur afhankelijk van diverse factoren. Daardoor kan een vaste prijs niet gegeven worden. Voor Budgetteringsdoeleinden kan het volgende aangehouden worden:

De totaalprijs is opgebouwd uit (allen excl. BTW):

- vast deel van E 600,--
- vast deel van E 50,-- per persoon
- variabel deel van E85,-- per uur (bestaande uit de cursus)
- variabel deel t.b.v. speciale wensen (bijv. extra documentatie, voorbereiden practica, etc).
- Examen (indien gewenst), in orde van E 900,--
- verplaatsingskosten.

### **Geïnteresseerd?**

Neemt u dan contact op met TeTech. TeTech neemt uw behoeften graag met u door om tot een passende cursus te komen.

Deze cursus bestrijkt slechts een klein deel van de expertise van TeTech. TeTech kan ook uw opleidingswensen vervullen op het gebied van Elektronicaontwerp (Systeem- & Componentniveau) en Signaalbewerking.

Versie: december 2019.