

bereikbaarheid. Voor dat soort uitbreidingen heb ik de rechterzijde van de print voorzien van een eilandjesveld, waar een dergelijk uitbreiding naar wens en eigen inzicht op kan worden gemonteerd.

Onderdelen die ik heb gebruikt en die bij Conrad verkrijgbaar zijn met bestelnummers:

181544 TDA 7052 1W audio  
177202 LM567  
335400 mini luidspreker 8 ohm  
459964 Wima MKS C 1 uF 63V  
459814 Wima C 0,33 uF 63V

De rest, behalve de display, kwam uit de junkbox en uit de grijpvoorraad. Een geprogrammeerde processor kan ik binnen de EEG leveren voor € 15,00 inclusief verzendkosten. Neem dan contact op, ook voor eventuele vragen, via e-mail met pa0wv@amsat.org.

73, Wim PA0WV (28 juni 2011)

[1] www.uba.be, pagina Techniek

“abaissée” (key down). Pour la facilité, une borne de contact est aussi disponible sur le circuit imprimé. Une partie du circuit imprimé est laissée libre pour ce genre d'extension des possibilités du décodeur.

Références des composants que j'ai utilisés et qui sont disponibles chez Conrad:

181544 TDA 7052 1W audio  
177202 LM567  
335400 mini haut parleur 8 ohm  
459964 Wima MKS C 1 uF 63V  
459814 Wima C 0,33 uF 63V

Le reste, à l'exception de l'afficheur, provenait de mes fonds de tiroir et stocks de composants. Je peux livrer un processeur programmé dans l'Union Européenne pour € 15,00, frais de port inclus. Pour toute information supplémentaire: pa0wv@amsat.org.

73, Wim PA0WV (28 juin 2011)

[1] www.uba.be, page Technique

## Inductie – Induction Deel 2 / 2<sup>ème</sup> Partie

Door/par ON5WF (MNS) – Vertaald door ON5EX

In het eerste deel hebben we gezien dat een elektrische stroom een magnetisch veld opwekt (proef van Oersted). Vervolgens werd beschreven hoe Faraday hieruit, na verschillende proefnemingen, een wet afleidde voor het effect van een veranderlijk magnetisch veld op een geleider. In dit tweede deel gaan we dieper in op dit magnetisch effect. Hierdoor zullen ook de begrippen wederzijdse inductie en zelfinductie aan bod komen.

**Heinrich Lenz (1804-1865). Duits natuurkundige van Germaans-Baltische afkomst (bron: Wikipedia)**



Dans la 1<sup>ère</sup> partie de cet article, nous avons vu qu'un courant électrique donnait lieu à un champ magnétique (expérience d'Oersted). Nous avons ensuite vu comment Faraday, après avoir effectué différentes expériences, en déduisit une loi caractérisant l'influence d'un champ magnétique variable sur un circuit conducteur. La deuxième partie de cet article sera consacrée plus particulièrement à l'étude de cette influence magnétique, ce qui nous amènera à introduire les notions d'inductance mutuelle et d'auto-inductance.

**Heinrich Lenz (1804-1865).**

Physicien allemand d'origine germano-balte (source: Wikipedia)

### 3. DE WET VAN LENZ

In 1834 heeft Heinrich Lenz, in die tijd hoogleraar aan de universiteit van Sint-Petersburg, de proeven van Faraday overgedaan en ze een nauwkeurige natuurkundige verklaring gegeven.

De wet van Lenz wordt verwoord als volgt: “De inductiestroom wekt in zijn eigen circuit een magnetische flux op die steeds de fluxverandering die aan de oorsprong ervan ligt, tegenwerkt”.

Nemen we als voorbeeld de eerste proef van Faraday waarbij de noordpool van de magneet naar de spoel toe wordt bewogen (zie deel 1, geval 1 van **figuur 7**). De magnetische flux die door de magneet in de spoel wordt opgewekt, neemt toe. Er ontstaat dan een inductiestroom in de spoel met een zodanige richting dat het magnetisch veld dat hij opwekt, tegengesteld is aan het magnetisch veld van de magneet, waardoor de magnetische fluxverandering in de spoel wordt tegengewerkt. In geval 2, waarbij de magneet wordt verwijderd van de spoel, vermindert de magnetische flux door de spoel. De richting van de inductiestroom is tegengesteld aan die van geval 1; het door de stroom opgewekte magnetisch veld versterkt dit van de magneet, wat dus opnieuw neerkomt op een compensatie van de fluxverandering.

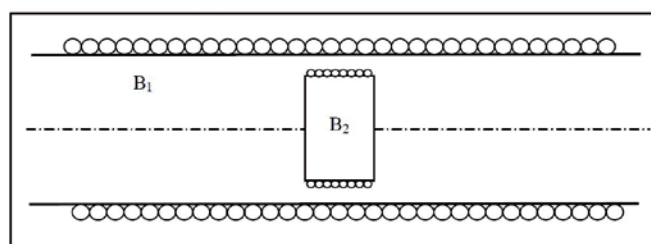
### 3. LA LOI DE LENZ

En 1834, alors qu'il était professeur à l'université de Saint Petersburg, Heinrich Lenz a refait les expériences de Faraday et leur a donné une interprétation physique très précise.

La loi de Lenz s'énonce comme suit: *Le courant induit produit à travers son propre circuit un flux magnétique qui tend toujours à compenser la variation de flux qui lui a donné naissance.*

Prenons par exemple le cas de la première expérience de Faraday, lorsque l'on approche le pôle nord de l'aimant de la bobine (situation 1 à la **figure 7**, 1<sup>ère</sup> partie). Le flux magnétique produit par l'aimant dans la bobine augmente. Un courant induit prend alors naissance dans cette bobine, avec un sens tel que le champ magnétique qu'il produit s'oppose au champ magnétique de l'aimant, ce qui tend à compenser la variation de flux magnétique dans la bobine. Dans la situation 2, on éloigne le pôle nord de l'aimant par rapport à la bobine. Dans ce cas, le flux magnétique à travers la bobine diminue et le courant induit a un sens contraire à celui du cas précédent; le champ magnétique produit par le courant vient renforcer celui de l'aimant, ce qui tend ici aussi, à compenser la variation de flux.

**Fig. 9. Een spoel  $B_2$  wordt zo in het midden van een lange solenoïde  $B_1$ , geplaatst, dat hun assen samenvallen. We onderzoeken de in  $B_2$  geïnduceerde elektromotorische kracht als de stroom door  $B_1$  verandert volgens de grafiek van figuur 10.**



**Fig. 9. Une bobine  $B_2$  est placée au centre d'un long solénoïde  $B_1$ , de façon à ce que leurs axes coïncident. On s'intéresse à la force électromotrice induite dans  $B_2$  lorsque le courant varie dans  $B_1$  selon le graphique de la figure 10.**

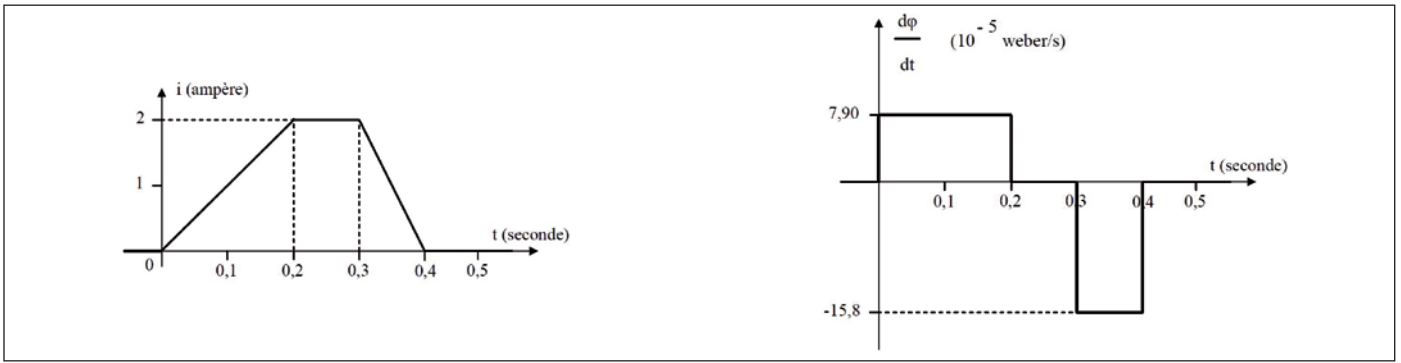


Fig. 10. De linkse grafiek toont het verloop in de tijd van de stroom door de spoel B<sub>1</sub>. De grafiek rechts toont de snelheid waarmee de magnetische flux in de spoel B<sub>2</sub> verandert in functie van de tijd.

Fig. 10. Le graphique gauche représente la variation dans le temps du courant dans la bobine B<sub>1</sub>. Le graphique droit représente la vitesse de variation du flux magnétique dans la bobine B<sub>2</sub> en fonction du temps.

**Voorbeeld 4**

Een lange solenoïde B<sub>1</sub> met diameter 3 cm bevat 200 windingen/cm. Een spoel B<sub>2</sub> met diameter 2 cm met 100 aaneengesloten windingen wordt zodanig in het midden van B<sub>1</sub> geplaatst, dat hun assen samenvallen (figuur 9). Door de spoel B<sub>1</sub> wordt een stroom gestuurd waarvan de waarde verandert volgens de grafiek in figuur 10. Bereken de elektromotorische kracht opgewekt in spoel B<sub>2</sub>.

**Exemple 4**

Un long solénoïde B<sub>1</sub> de 3 cm de diamètre comporte 200 spires/cm. Une bobine B<sub>2</sub> de 2 cm de diamètre et comportant 100 spires jointives, est placée au centre de B<sub>1</sub>, de manière à ce que leurs axes coïncident (figure 9). On fait passer dans la bobine B<sub>1</sub> un courant variant selon le graphique de la figure 10. Calculer la force électromotrice induite dans la bobine B<sub>2</sub>.

**Oplossing**

1° Als de stroom in de spoel B<sub>1</sub> stijgt van 0 naar 2 ampère, verandert het magnetisch veld van 0 naar (deel 1, formule (5)):

$$B = \mu_0 n i = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 20000 \cdot 2 = 50,27 \cdot 10^{-3} \text{ tesla}$$

De waarde van de overeenstemmende magnetische flux in B<sub>2</sub> (het veld in het centrum van de solenoïde wordt gelijkvormig verondersteld) bedraagt:

$$\Phi = B S_{B_2} = 50,27 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \frac{(0,02)^2}{4} = 50,79 \cdot 10^{-6} \text{ weber}$$

De stroom stijgt van 0 tot 2 ampère in 0,2 seconde. Derhalve is de snelheid van de magnetische fluxverandering in B<sub>2</sub>:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{15,79 \cdot 10^{-6}}{0,2} = 7,896 \cdot 10^{-5} \text{ weber/s}$$

Deze waarde is – in absolute waarde – ook deze van de opgewekte elektromotorische kracht in een winding van de spoel B<sub>2</sub>. De totale opgewekte elektromotorische kracht in spoel B<sub>2</sub> is dus (in absolute waarde) bij toenemende stroom:

$$u \text{ (i stijgend)} = \frac{d\Phi}{dt} N_{B_2} = 7,896 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 7,90 \cdot 10^{-3} \text{ volt}$$

2° Als de stroom herleid wordt naar nul, verandert de flux van de maximumwaarde naar nul in 0,1 seconde.

De snelheid waarmee de flux wijzigt, is dus:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{15,79 \cdot 10^{-6}}{0,1} = -15,79 \cdot 10^{-5} \text{ weber/s}$$

Het minteken in de bovenstaande formule stemt overeen met een vertraging, dus met een negatieve variatiesnelheid. Derhalve bedraagt de in B<sub>2</sub> opgewekte elektromotorische kracht, bij afnemende stroom:

$$u \text{ (i afnemend)} = \frac{d\Phi}{dt} N_{B_2} = -15,79 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = -15,8 \cdot 10^{-3} \text{ volt}$$

De richting van de elektromotorische kracht is dus bij afnemende stroom tegengesteld aan de richting ervan bij toenemende stroom.

**Joseph HENRY (1797–1878).**  
Amerikaans natuurkundige (bron: Wikipedia)



**Solution**

1° Lorsque le courant dans la bobine B<sub>1</sub> passe de 0 à 2 ampères, le champ magnétique passe de 0 à [relation (5), 1<sup>ère</sup> partie]:

$$B = \mu_0 n i = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 20000 \cdot 2 = 50,27 \cdot 10^{-3} \text{ tesla}$$

Le flux magnétique correspondant dans B<sub>2</sub> vaut, en supposant le champ uniforme dans le centre du solénoïde:

$$\Phi = B S_{B_2} = 50,27 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \frac{(0,02)^2}{4} = 50,79 \cdot 10^{-6} \text{ weber}$$

Le courant varie de 0 à 2 ampères en 0,2 seconde, la vitesse de variation du flux magnétique dans B<sub>2</sub> vaut alors:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{15,79 \cdot 10^{-6}}{0,2} = 7,896 \cdot 10^{-5} \text{ weber/s}$$

La valeur ci-dessus est aussi (en valeur absolue) celle de la force électromotrice induite dans une spire de la bobine B<sub>2</sub>. La force électromotrice totale induite dans la bobine B<sub>2</sub> vaut donc (en valeur absolue), lorsque le courant est croissant:

$$u \text{ (i croissant)} = \frac{d\Phi}{dt} N_{B_2} = 7,896 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 7,90 \cdot 10^{-3} \text{ volt}$$

2° Lorsque le courant est ramené à zéro, le flux passe de sa valeur maximum à zéro en 0,1 seconde.

La vitesse de variation du flux vaut alors:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{15,79 \cdot 10^{-6}}{0,1} = -15,79 \cdot 10^{-5} \text{ weber/s}$$

Le signe moins dans la relation précédente correspond à une diminution et donc à une vitesse de variation négative. Par conséquent, la force électromotrice induite dans B<sub>2</sub> vaut, lorsque le courant est décroissant:

$$u \text{ (i décroissant)} = \frac{d\Phi}{dt} N_{B_2} = -15,79 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = -15,8 \cdot 10^{-3} \text{ volt}$$

Cette force électromotrice induite est donc de sens opposé à celle induite lors de la croissance du courant.

**Joseph HENRY (1797–1878).**  
Physicien américain (source: Wikipedia)

**4. INDUCTIE**

**4.1. Wederzijdse inductie**

Volgens figuur 11 is een spoel B<sub>1</sub> verbonden met een spanningsbron U via een veranderlijke weerstand R. In de schakeling vloeit een stroom i<sub>1</sub> die een magnetische flux φ<sub>1</sub> opwekt. Wanneer een tweede spoel B<sub>2</sub> in

**4. L'INDUCTANCE**

**4.1. L'Induction mutuelle**

Considérons le système de la figure 11 dans lequel une bobine B<sub>1</sub> est raccordée à une source de tension U par l'intermédiaire d'une résistance variable R. Un courant i<sub>1</sub> circule dans ce circuit, donnant lieu à

Fig. 11. Een spoel  $B_1$  waar-  
door men een veranderlijke  
stroom kan laten vloeien,  
is magnetisch gekoppeld  
met een spoel  $B_2$  verbonden  
met de klemmen van een  
galvanometer.

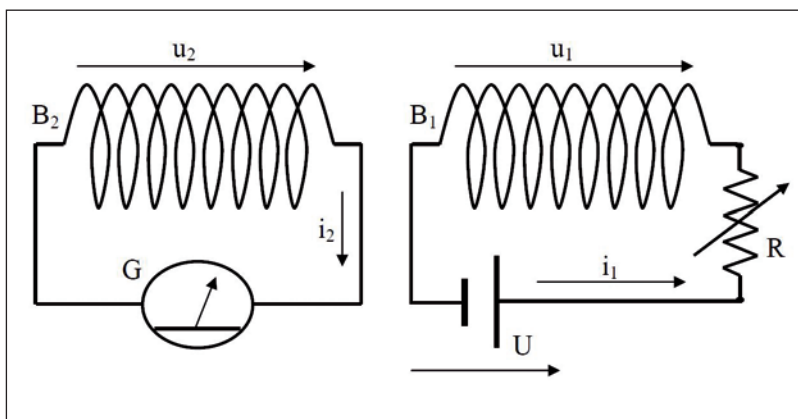


Fig. 11. Une bobine  $B_1$  dans  
laquelle on peut faire passer un  
courant variable, est couplée  
magnétiquement à une bobine  
 $B_2$  branchée aux bornes d'un  
galvanomètre.

de nabijheid van  $B_1$  wordt  
geplaatst, dan doorkruist  
een deel van de flux  $\phi_1$ ,  
 $\phi_{12}$  geheten, het oppervlak  
bepaald door de doors-  
nede van de spoel  $B_2$ . Deze  
flux  $\phi_{12}$  bewerkstelligt een  
koppeling tussen  $B_1$  en  $B_2$ .

Als men de stroom  $i_1$  in de spoel  $B_1$  verandert, wijzigt de flux  $\phi_{12}$  met  
hetzelfde ritme. Volgens de wet van Faraday ontstaat er een geïnducee-  
erde elektromotorische kracht  $u_2$  aan de klemmen van  $B_2$ :

$$u_2 = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (8)$$

In de formule (8) is  $N_2$  het aantal windingen van  $B_2$  (we gaan er hier van  
uit dat de flux  $\phi_{12}$  dezelfde is voor alle windingen van  $B_2$ ).

$\frac{d\phi_{12}}{dt}$  is de snelheid waarmee de flux  $\phi_{12}$  verandert. De opgewekte  
elektromotorische kracht zal een stroom  $i_2$  doen vloeien, aangetoond  
door de uitwijking van de galvanometer G.

Voorzover er zich geen ferromagnetische materialen in de nabijheid  
van de spoelen bevinden, is de flux rechtstreeks evenredig met de  
stroom en kan de formule (8) geschreven worden als volgt, waarbij  $M_{12}$   
de evenredigheidsfactor wordt genoemd:

$$u_2 = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = -\frac{d(N_2\phi_{12})}{dt} = -\frac{d(M_{12}i_1)}{dt} = -M_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (9)$$

De in de spoel  $B_2$  opgewekte elektromotorische kracht is dus rechtstreeks  
evenredig met de snelheid van de verandering van de stroom  $i_1$  in de  
spoel  $B_1$ .

Het verschijnsel waarbij een veranderlijke stroom in  $B_1$  een elektromo-  
torische kracht opwekt in  $B_2$  wordt **wederzijdse inductie** genoemd, en  
de evenredigheidsfactor  $M_{12}$  **wederzijdse inductantie**. De wederzijdse  
inductantie wordt uitgedrukt in **henry**, uit eerbetoen aan Joseph Henry,  
die als één onder de eersten het inductieverschijnsel bestudeerde.  
Vermits  $N_2\phi_{12} = M_{12}i_1$  kan de **formule 9** ook worden geschreven als:

$$M_{12} = \frac{N_2\phi_{12}}{i_1} \quad (10)$$

Men kan dus stellen dat de wederzijdse inductie gelijk is aan de totale  
flux doorheen alle windingen van  $B_2$ , per stroomeenheid door  $B_1$ .

Volgens de formule (9) stemt een wederzijdse inductantie van 1 henry  
overeen met een elektromotorische kracht van 1 volt, opgewekt in  
 $B_2$  als gevolg van een verandering van de stroom  $i_1$  van 1 ampère per  
seconde in  $B_1$ . Dus:

$$1\text{H} = \frac{1\text{V}}{1\text{A/s}} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \quad (11)$$

Als de rollen in de **figuur 11** worden omgekeerd, zodat de spoel  $B_2$   
op de spanningsbron is aangesloten en  $B_1$  met de galvanometer is  
verbonden, neemt men een gelijkaardige wederzijdse inductie tussen  
de beide spoelen waar, gekenmerkt door een wederzijdse inductantie  
 $M_{21}$ . In het algemeen geldt:

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (12)$$

De grootheid  $M$  is de wederzijdse inductantie van het systeem van de  
twee spoelen  $B_1 - B_2$ .

Si le courant  $i_1$  varie dans la bobine  $B_1$ , le flux  $\phi_{12}$  variera suivant le  
même rythme. Selon la loi de Faraday, une force électromotrice induite  
 $u_2$  apparaîtra aux bornes de  $B_2$ :

$$u_2 = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (8)$$

Dans la relation (8),  $N_2$  est le nombre de spires de  $B_2$  (on suppose ici  
que le flux  $\phi_{12}$  est le même pour toutes les spires de  $B_2$ ).

$\frac{d\phi_{12}}{dt}$  est la vitesse de variation du flux  $\phi_{12}$ . Cette force électromotrice  
induite donnera lieu à un courant  $i_2$  se manifestant par une déviation  
du galvanomètre G.

Pour autant qu'aucun matériau ferromagnétique ne se trouve dans le  
voisinage des bobines, le flux est directement proportionnel au courant  
et la relation (8) peut alors s'écrire comme suit, en appelant  $M_{12}$  le  
facteur de proportionnalité:

$$u_2 = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = -\frac{d(N_2\phi_{12})}{dt} = -\frac{d(M_{12}i_1)}{dt} = -M_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (9)$$

La force électromotrice induite dans la bobine  $B_2$  est donc directement  
proportionnelle à la vitesse de variation du courant  $i_1$  dans la bobine  $B_1$ .

Le phénomène de production d'une force électromotrice induite dans  
 $B_2$  par un courant variable dans  $B_1$  est appelé **induction mutuelle** et  
le facteur de proportionnalité  $M_{12}$  est appelé **inductance mutuelle**.  
L'inductance mutuelle s'exprime en **henry**, en hommage à Joseph Henry  
qui a été un des premiers à étudier le phénomène d'induction. D'après  
la **relation (9)**, on peut écrire, puisque  $N_2\phi_{12} = M_{12}i_1$

$$M_{12} = \frac{N_2\phi_{12}}{i_1} \quad (10)$$

On peut donc dire que l'inductance mutuelle est égale au flux total  
produit à travers toutes les spires de  $B_2$ , par unité de courant circulant  
dans  $B_1$ .

D'après la relation (9), une inductance mutuelle de 1 henry correspond à  
une force électromotrice de 1 volt induite dans  $B_2$ , suite à une variation  
de courant  $i_1$  de 1 ampère par seconde dans  $B_1$ . Donc:

$$1\text{H} = \frac{1\text{V}}{1\text{A/s}} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \quad (11)$$

Si l'on inverse les rôles dans la **figure 11**, c'est-à-dire si c'est la bobine  
 $B_2$  qui est branchée sur la source de tension et la bobine  $B_1$  sur le galva-  
nomètre, on observera un phénomène semblable d'induction mutuelle  
entre les deux bobines, caractérisé par une inductance mutuelle  $M_{21}$ .  
D'une façon générale, on a:

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (12)$$

La grandeur  $M$  est l'inductance mutuelle du système des deux bobines  
 $B_1 - B_2$ .

#### Opmerking 4

De wederzijdse inductantie kan in aanzienlijke mate verhoogd worden door binnen de spoelen een ijzeren kern te plaatsen (of een kern uit een stof met gelijkaardige magnetische eigenschappen).

#### Voorbeeld 5

De wederzijdse inductantie berekenen van het spoelensysteem van het voorbeeld 4.

#### Oplossing

De waarde van het magnetisch veld opgewekt door de spoel  $B_1$  is:

$$B_1 = \mu_0 n_1 i_1$$

In deze formule is  $n_1$  het aantal windingen per lengteëenheid van  $B_1$ .

De flux  $\varphi_{12}$  die de doorsnede van de spoel  $B_2$  doorkruist, is:

$$\varphi_{12} = B_1 S_2 = \mu_0 n_1 i_1 S_2$$

Volgens formule (10) en rekening houdende met (12), is de wederzijdse inductantie van het systeem  $B_1 - B_2$ :

$$M = \frac{N_2 \varphi_{12}}{i_1} = N_2 \mu_0 n_1 S_2 = \mu_0 n_1 N_2 S_2$$

Met de cijferwaarden van het voorbeeld 4 bekomt men:

$$M = \mu_0 n_1 N_2 S_2 = 4 * \pi * 10^{-7} * 20000 * 100 * \frac{\pi * (0,02)^2}{4} = 0,790 * 10^{-3} \text{ H}$$

hetzij 0,790 mH.

#### 4.2. Zelfinductie

In de opstelling van **figuur 11** wekken de magnetische fluxveranderingen voortgebracht door de spoel  $B_1$  een elektromotorische kracht op in spoel  $B_2$ . Sterker nog: spoel  $B_1$  baadt in zijn eigen magnetische flux en zal ook een elektromotorische kracht ondergaan. In dit geval gaat het niet om wederzijdse inductie, maar om **zelfinductie**.

Als we aannemen dat de flux  $\varphi_1$  voortgebracht door de spoel  $B_1$  gelijk is doorheen alle windingen van de spoel (dit is het geval bij een spoel met zeer dicht aaneengesloten windingen), dan bedraagt de elektromotorische kracht  $u_1$  opgewekt in  $B_1$ :

$$u_1 = -N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = -\frac{d(N_1 \varphi_1)}{dt} \quad (13)$$

In lucht is de totale flux  $N_1 \varphi_1$  rechtstreeks evenredig met de stroom  $i_1$  in de spoel  $B_1$ . De formule (13) kan dus – met  $L$  de evenredigheidscoëfficiënt – geschreven worden als volgt:

$$u_1 = -\frac{d(N_1 \varphi_1)}{dt} = -\frac{d(L i_1)}{dt} = -L \frac{di_1}{dt} \quad (14)$$

Op algemene wijze, zal de inductantie  $L$  van een spoel met  $N$  windingen, waardoor een stroom  $i$  vloeit (en waarbij eenzelfde flux  $\varphi$  alle spoelwindingen doorkruist), gelijk zijn aan:

$$L = \frac{N\varphi}{i} \quad (15)$$

De formule (15) is van toepassing voor eender welke spoel, maar de totale flux  $N\varphi$  valt moeilijker te bepalen. De coëfficiënt  $L$  wordt de **zelfinductantie** of eenvoudiger, de **inductantie** van de spoel  $B_1$  genoemd, uitgedrukt in henry zoals de wederzijdse inductantie. In afwezigheid van ferromagnetisch materiaal in de nabijheid van de spoel, wordt de inductantie van deze spoel louter bepaald door haar meetkundige kenmerken.

**NAGAOKA (1865–1950).**  
Japans natuurkundige (bron: Wikipedia)



#### Remarque 4

L'inductance mutuelle entre deux bobines peut être augmentée dans de grandes proportions en plaçant à l'intérieur des bobines un noyau en fer (ou constitué d'un matériau aux propriétés magnétiques semblables).

#### Exemple 5

Calculer l'inductance mutuelle du système de bobines de l'exemple 4.

#### Solution

Le champ magnétique produit par la bobine  $B_1$  vaut:

$$B_1 = \mu_0 n_1 i_1$$

Dans cette relation,  $n_1$  est le nombre de spires par unité de longueur de  $B_1$ .

Le flux  $\varphi_{12}$  traversant la section de la bobine  $B_2$  vaut:

$$\varphi_{12} = B_1 S_2 = \mu_0 n_1 i_1 S_2$$

Selon la relation (10) et en tenant compte de (12), l'inductance mutuelle du système  $B_1 - B_2$  vaut:

$$M = \frac{N_2 \varphi_{12}}{i_1} = N_2 \mu_0 n_1 S_2 = \mu_0 n_1 N_2 S_2$$

Avec les valeurs numériques de l'exemple 4, on obtient:

$$M = \mu_0 n_1 N_2 S_2 = 4 * \pi * 10^{-7} * 20000 * 100 * \frac{\pi * (0,02)^2}{4} = 0,790 * 10^{-3} \text{ H}$$

hetzij 0,790 mH.

#### 4.2. L'auto-induction

Dans l'expérience de la **figure 11**, les variations de flux magnétique produites par la bobine  $B_1$  induisent une force électromotrice dans la bobine  $B_2$ . A fortiori, la bobine  $B_1$  qui baigne dans son propre flux magnétique, sera aussi le siège d'une force électromotrice induite. Dans ce cas, on ne parle pas d'induction mutuelle mais d'**auto-induction**.

Si on suppose que le flux  $\varphi_1$  produit par la bobine  $B_1$  est le même à travers toutes les spires de cette bobine (cas d'une bobine très serrée), la force électromotrice  $u_1$  induite dans  $B_1$  vaudra:

$$u_1 = -N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = -\frac{d(N_1 \varphi_1)}{dt} \quad (13)$$

Dans l'air, le flux total  $N_1 \varphi_1$  est directement proportionnel au courant  $i_1$  dans la bobine  $B_1$ . La relation (13) peut donc s'écrire, en appelant  $L$  le coefficient de proportionnalité:

$$u_1 = -\frac{d(N_1 \varphi_1)}{dt} = -\frac{d(L i_1)}{dt} = -L \frac{di_1}{dt} \quad (14)$$

D'une façon générale, pour une bobine de  $N$  spires traversée par un courant  $i$ , l'inductance  $L$  de cette bobine vaudra (si un même flux  $\varphi$  traverse toutes les spires de la bobine):

$$L = \frac{N\varphi}{i} \quad (15)$$

La relation (15) reste valable pour une bobine quelconque, mais le flux total  $N\varphi$  sera plus compliqué à calculer. Le coefficient  $L$  est appelé **auto-inductance** ou plus simplement **inductance** de la bobine  $B_1$ . Tout comme l'inductance mutuelle, l'inductance s'exprime en henry. En l'absence de matériau ferromagnétique dans le voisinage de la bobine, l'inductance de cette bobine ne dépend que des caractéristiques géométriques de celle-ci.

**NAGAOKA (1865–1950).**  
Physicien japonais (source: Wikipedia)



### Voorbeeld 6

Bereken de inductantie van een solenoïde met diameter 3 cm en 300 aaneengesloten windingen verdeeld over een lengte  $l = 30$  cm.

### Oplossing

Aangenomen dat het magnetisch veld gelijkvormig is binnen de hele spoel, bedraagt de flux  $\varphi$  door een spoelwinding:

$$\varphi = BS = \mu_0 niS = \mu_0 \frac{N}{l} iS$$

De totale flux bedraagt:

$$N\varphi = \mu_0 \frac{N^2}{l} iS$$

Tenslotte bekomt men voor de inductantie:

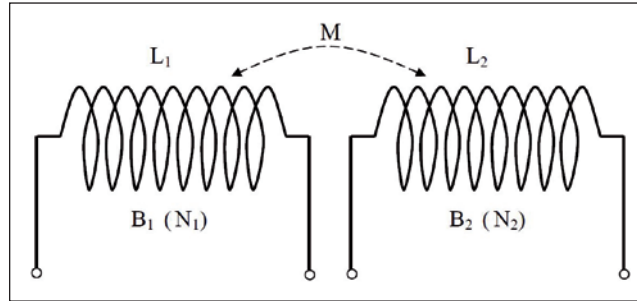
$$L = \frac{N\varphi}{i} = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{300^2}{0,3} \cdot \frac{\pi \cdot (0,03)^2}{4} = 0,267 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Hetzij 267  $\mu\text{H}$ . Berekening met de formule van Nagaoka geeft:

$$L (\mu\text{H}) = \frac{D(\text{cm})^2 N^2}{100 \cdot l(\text{cm}) + 45 \cdot D(\text{cm})} = \frac{3^2 \cdot 300^2}{100 \cdot 30 + 45 \cdot 3} = 258 \mu\text{H}$$

### 4.3. Uitdrukking van de wederzijdse inductie in functie van de inductantie van de spoelen

Fig. 12. Twee gekoppelde spoelen  $B_1$  en  $B_2$ ;  $B_1$  bevat  $N_1$  windingen en  $B_2$   $N_2$  windingen. We zoeken het verband tussen de wederzijdse inductie  $M$  en de inductanties  $L_1$  en  $L_2$  van de spoelen



Beschouwen we de twee spoelen  $B_1$  en  $B_2$  van de figuur 12. Men kan zich afvragen welk verband er bestaat tussen de wederzijdse inductantie  $M$  van de beide spoelen en hun inductanties  $L_1$  en  $L_2$ . Laten we aannemen

dat de twee spoelen volmaakt gekoppeld zijn; dit betekent dat de volledige flux  $\varphi_1$  opgewekt door  $B_1$  (als er een stroom doorheen vloeit) alle windingen van  $B_2$  doorkruist en vice versa ( $\varphi_{12} = \varphi_1$  en  $\varphi_{21} = \varphi_2$ ). In deze omstandigheden bereikt de wederzijdse inductantie  $M$  van beide spoelen de maximumwaarde  $M_{\max}$ .

We sturen een stroom  $i_1$  van 1 ampère door spoel  $B_1$ .  $\varphi_1$  is de door  $B_1$  opgewekte flux. In dit geval geldt, in functie van de formules (10), (12) en (15):

$$M_{\max} = \frac{N_2 \varphi_1}{i_1} = N_2 \varphi_1 \quad L_1 = \frac{N_1 \varphi_1}{i_1} = N_1 \varphi_1 \quad (16)$$

Idem bij het sturen van een stroom  $i_2$  van 1 ampère door  $B_2$ :

$$M_{\max} = \frac{N_1 \varphi_2}{i_2} = N_1 \varphi_2 \quad L_2 = \frac{N_2 \varphi_2}{i_2} = N_2 \varphi_2 \quad (17)$$

Vermenigvuldiging van de eerste formule van (16) met de eerste van (17) en de tweede van (16) met de tweede van (17) geeft:

$$M_{\max}^2 = N_1 N_2 \varphi_1 \varphi_2 \quad L_1 L_2 = N_1 N_2 \varphi_1 \varphi_2 \quad (18)$$

Hieruit kan onmiddellijk het verband tussen  $M_{\max}$  en  $L_1$  en  $L_2$  worden afgeleid:

$$M_{\max}^2 = L_1 L_2 \quad \text{of} \quad M_{\max} = \sqrt{L_1 L_2} \quad (19)$$

De wederzijdse inductantie is afhankelijk van de koppingsgraad de spoelen en varieert tussen  $M = 0$  en  $M = M_{\max}$ ; de maximumwaarde stemt overeen met het meetkundig gemiddelde van de twee inductanties  $L_1$  en  $L_2$ . De koppingscoëfficiënt  $k$  van twee spoelen wordt gedefinieerd als volgt:

$$k = \frac{M}{M_{\max}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (20)$$

De formule (20) toont aan dat de koppingscoëfficiënt varieert tussen 0 (geen koppeling) en 1 (volmaakte koppeling).

### Exemple 6

Calculer l'inductance d'un solénoïde de 3 cm de diamètre et comportant 300 spires jointives réparties sur une longueur  $l = 30$  cm.

### Solution

En supposant le champ magnétique uniforme dans toute la bobine, le flux  $\varphi$  à travers une spire de la bobine vaut:

$$\varphi = BS = \mu_0 niS = \mu_0 \frac{N}{l} iS$$

Le flux total vaut:

$$N\varphi = \mu_0 \frac{N^2}{l} iS$$

Finalement, on obtient pour l'inductance:

$$L = \frac{N\varphi}{i} = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{300^2}{0,3} \cdot \frac{\pi \cdot (0,03)^2}{4} = 0,267 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Soit 267  $\mu\text{H}$ . Un calcul effectué avec la formule de Nagaoka donne:

$$L (\mu\text{H}) = \frac{D(\text{cm})^2 N^2}{100 \cdot l(\text{cm}) + 45 \cdot D(\text{cm})} = \frac{3^2 \cdot 300^2}{100 \cdot 30 + 45 \cdot 3} = 258 \mu\text{H}$$

### 4.3. Expression de l'inductance mutuelle en fonction de l'inductance des bobines

Fig. 12. Deux bobines  $B_1$  et  $B_2$  couplées;  $B_1$  comporte  $N_1$  spires et  $B_2$  en comporte  $N_2$ . On cherche la relation entre l'inductance mutuelle  $M$  et les inductances  $L_1$  et  $L_2$  des bobines.

Considérons les deux bobines  $B_1$  et  $B_2$  de la figure 12. On peut se demander quelle est la relation entre l'inductance mutuelle  $M$  des deux bobines et les inductances  $L_1$  et  $L_2$  de ces bobines. Supposons

que ces deux bobines soient parfaitement couplées; cela veut dire que tout le flux  $\varphi_1$  produit par  $B_1$  (lorsqu'elle est traversée par un courant) traverse les spires de  $B_2$  et vice versa ( $\varphi_{12} = \varphi_1$  et  $\varphi_{21} = \varphi_2$ ). Dans ces conditions, l'inductance mutuelle  $M$  des deux bobines est à sa valeur maximum  $M_{\max}$ .

Faisons passer un courant  $i_1$  de 1 ampère dans la bobine  $B_1$  et soit  $\varphi_1$  le flux produit par  $B_1$ . Nous pouvons alors écrire, en fonction des relations (10), (12) et (15):

$$M_{\max} = \frac{N_2 \varphi_1}{i_1} = N_2 \varphi_1 \quad L_1 = \frac{N_1 \varphi_1}{i_1} = N_1 \varphi_1 \quad (16)$$

De même, en faisant passer un courant  $i_2$  de 1 ampère dans  $B_2$ :

$$M_{\max} = \frac{N_1 \varphi_2}{i_2} = N_1 \varphi_2 \quad L_2 = \frac{N_2 \varphi_2}{i_2} = N_2 \varphi_2 \quad (17)$$

En multipliant la première relation de (16) par la première de (17) et la deuxième de (16) par la deuxième de (17) on obtient:

$$M_{\max}^2 = N_1 N_2 \varphi_1 \varphi_2 \quad L_1 L_2 = N_1 N_2 \varphi_1 \varphi_2 \quad (18)$$

On en déduit immédiatement la relation entre  $M_{\max}$  et  $L_1$  et  $L_2$ :

$$M_{\max}^2 = L_1 L_2 \quad \text{of} \quad M_{\max} = \sqrt{L_1 L_2} \quad (19)$$

L'inductance mutuelle de deux bobines peut varier, selon le degré de couplage des bobines, entre  $M = 0$  et  $M = M_{\max}$ ; elle est au maximum égale à la moyenne géométrique des deux inductances  $L_1$  et  $L_2$ . On définit le coefficient de couplage  $k$  de deux bobines par la relation:

$$k = \frac{M}{M_{\max}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (20)$$

La relation (20) montre que le coefficient de couplage varie entre 0 (couplage nul) et 1 (couplage parfait).

**Opmerking 5**

De koppeling tussen twee spoelen kan in aanzienlijke mate worden verhoogd door de spoelen op een gemeenschappelijke kern van ferromagnetisch materiaal te plaatsen.

**4.4. Inductanties in serie**

We besluiten dit artikel met de studie van de inductantie equivalent met twee inductanties in serie. We beschouwen het geval van twee spoelen B<sub>1</sub> en B<sub>2</sub> in serie geplaatst (figuur 13) en waartussen een be-

Fig. 13. Twee spoelen L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> staan in serie. We stellen de totale inductantie van de schakeling in vraag.

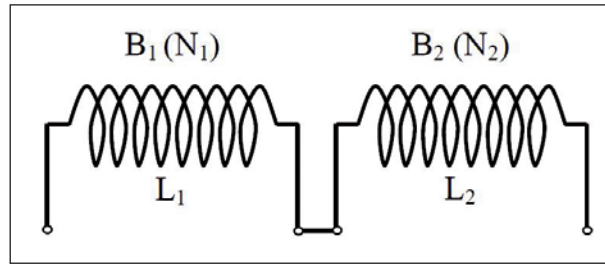


Fig. 13. Deux bobines d'inductances L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> connectées en série. On s'intéresse à l'inductance totale du système.

paalde koppeling bestaat volgens hun koppelingscoëfficiënt k (formule 20). De twee spoelen bevatten respectievelijk N<sub>1</sub> en N<sub>2</sub> windingen en worden gekenmerkt door hun inductanties L<sub>1</sub> en L<sub>2</sub>; merk op dat L<sub>1</sub> en L<sub>2</sub> de inductanties van de afzonderlijke spoelen voorstellen (zonder wederzijdse koppeling). We willen de equivalente inductantie L<sub>eq</sub> berekenen van het systeem B<sub>1</sub> en B<sub>2</sub>.

Zonder koppeling tussen de spoelen (k = 0) is de equivalente inductantie, zoals bij een serieschakeling van twee weerstanden:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \quad (21)$$

Bestaat er wel een koppeling tussen B<sub>1</sub> en B<sub>2</sub>, dan zal de flux opgewekt door B<sub>1</sub> (als er een stroom doorheen vloeit) de flux opgewekt door B<sub>2</sub> versterken of verzwakken, en wederkerig. Laten we aannemen dat de twee spoelen in de figuur 13 coaxiaal zijn en in gelijke richting gewikkeld. In dat geval zullen de fluxen van beide spoelen elkaar wederzijds versterken. Bij tegengestelde wikkelrichting zullen de fluxen elkaar verzwakken. Om deze versterking of verzwakking uit te drukken, moeten we een teken geven aan de koppelingscoëfficiënt k; k kan dus variëren tussen -1 (volledige verzwakking) en +1 (volledige versterking). Als k bijvoorbeeld > 0, kunnen we het teken van k op 3 manieren wijzigen:

- 1° de wikkelrichting van een van de spoelen veranderen (geval 1 in figuur 14)
- 2° de verbindingen van één van de spoelen omwisselen (geval 2 in figuur 14).
- 3° één van de spoelen 180° draaien t.o.v. van de andere spoel (geval 3 in figuur 14); in dit geval varieert k – althans in theorie – voortdurend van -1 tot +1.

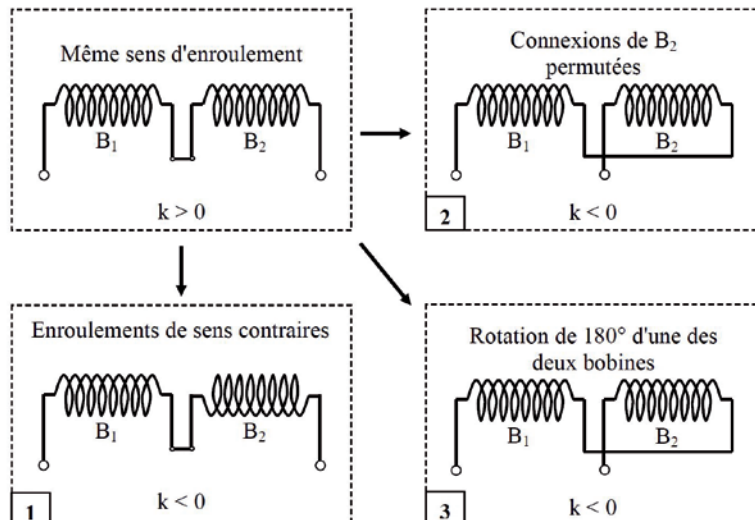
Om de equivalente flux te berekenen in het systeem van de twee spoelen, moeten we eerst de totale flux door elke spoel berekenen. Voor B<sub>1</sub> geldt:

$$\varphi_{total B_1} = \varphi_1 + \varphi_{21} = \varphi_1 + k\varphi_2 \quad (22)$$

In de formule (22) is  $\varphi_1$  de flux opgewekt door B<sub>1</sub> en is  $\varphi_{21} = k\varphi_2$  het gedeelte van de flux opgewekt door B<sub>2</sub> dat de windingen van B<sub>1</sub> doorkruist. Naar analogie geldt voor B<sub>2</sub>:

$$\varphi_{total B_2} = \varphi_2 + \varphi_{12} = \varphi_2 + k\varphi_1 \quad (23)$$

Fig. 14. Drie manieren om het teken van de koppelingscoëfficiënt k tussen de spoelen B<sub>1</sub> en B<sub>2</sub> te veranderen.



$$\varphi_{total B_1} = \varphi_1 + \varphi_{21} = \varphi_1 + k\varphi_2 \quad (22)$$

Dans la relation (22),  $\varphi_1$  est le flux produit par B<sub>1</sub> et  $\varphi_{21} = k\varphi_2$  est la partie du flux produit par B<sub>2</sub> qui traverse les spires de B<sub>1</sub>. De même, nous avons pour B<sub>2</sub>:

$$\varphi_{total B_2} = \varphi_2 + \varphi_{12} = \varphi_2 + k\varphi_1 \quad (23)$$

Fig. 14. Trois façons de modifier le signe du coefficient de couplage k entre les deux bobines B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>.

**Remarque 5**

Le couplage entre deux bobines peut être fortement augmenté en plaçant les bobines sur un noyau en matériau ferromagnétique commun.

**4.4. Inductances en série**

Nous terminerons cet article par l'étude de l'inductance équivalente à deux inductances en série. Nous considérons ici le cas de deux bobines B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub> connectées en série (figure 13) et entre lesquelles peut exister un

couplage défini comme ci-dessus par son coefficient k [relation (20)]. Ces deux bobines comportent respectivement N<sub>1</sub> et N<sub>2</sub> spires et sont caractérisées par leurs inductances L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub>; il faut bien noter que L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> sont les inductances des bobines considérées séparément l'une de l'autre (c'est-à-dire dans le cas où aucun couplage n'existe entre les deux bobines). Nous désirons calculer l'inductance équivalente L<sub>eq</sub> du système constitué par B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>.

Si le couplage entre les deux bobines est nul (k = 0), on a simplement, comme dans le cas de deux résistances en série:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \quad (21)$$

Dans le cas où le couplage entre B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub> n'est pas nul, le flux produit par B<sub>1</sub> (lorsqu'elle est traversée par un courant) va renforcer ou atténuer le flux produit par B<sub>2</sub> et réciproquement. Supposons que les deux bobines de la figure 13 soient coaxiales et que leurs enroulements soient dans le même sens. Dans ce cas, les flux produits par les bobines vont se renforcer mutuellement. Si les enroulements sont en sens contraires, les flux vont s'atténuer. Pour tenir compte de ce renforcement ou de cette atténuation, nous devons donner un signe au coefficient de couplage k; k peut donc varier ici entre -1 (atténuation totale) et +1 (renforcement total). Si k est par exemple > 0, nous pouvons changer le signe de k de trois façons:

- 1° changer le sens de l'enroulement d'une des deux bobines (cas n° 1 de la figure 14).
- 2° permuter les connexions d'une des deux bobines (cas n° 2 de la figure 14).
- 3° faire tourner une des deux bobines de 180° par rapport à l'autre (cas n° 3 de la figure 14); dans ce cas, k varie de façon continue de -1 à +1 (du moins théoriquement).

Pour calculer l'inductance équivalente du système formé par les deux bobines, nous devons d'abord calculer le flux total dans chacune des deux bobines. Nous avons, pour B<sub>1</sub>:

Derhalve is de equivalente inductantie:

$$L_{eq} = \frac{N_1 \phi_{total B_1}}{i} + \frac{N_2 \phi_{total B}}{i} \quad (24)$$

In de formule (24) is  $i$  de stroom door de spoelen. Door vervanging in (24) van de totale fluxen door de formules in (22) et (23), bekomt men:

$$L_{eq} = \frac{N_1 \phi_1}{i} + \frac{N_1 k \phi_2}{i} + \frac{N_2 \phi_2}{i} + \frac{N_2 k \phi_1}{i} \quad (25)$$

$$\text{Vermits } L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{i}, L_2 = \frac{N_2 \phi_2}{i}$$

$$\text{en } M = \frac{N_1 k \phi_2}{i} = \frac{N_2 k \phi_1}{i},$$

kan (25) worden uitgedrukt als volgt:  $L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M$  (26)

Of nog,

$$\text{daar } M = kM_{max} = k\sqrt{L_1 L_2} : L_{eq} = L_1 + L_2 + 2k\sqrt{L_1 L_2} \quad (27)$$

In het geval van twee coaxiale spoelen kan de equivalente inductantie variëren, volgens het teken van  $k$ , van:

$$L_{eq_{min}} = L_1 + L_2 - 2\sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{bij } k=-1) \quad (28)$$

$$\text{tot } L_{eq_{max}} = L_1 + L_2 + 2\sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{bij } k=+1) \quad (29)$$

Voor  $k = 0$  (geen koppeling tussen de twee spoelen), vinden we de formule (21) terug. Bij twee gelijke spoelen ( $L_1 = L_2 = L$ ), varieert de totale inductantie van  $L_{eq_{min}} = 0$  (bij  $k = -1$ ) tot  $L_{eq_{max}} = 4$  (bij  $k =$

$+1$ ). Dit is het werkingsprincipe van een **variometer**, een opstelling van twee coaxiale spoelen waarvan één  $180^\circ$  kan draaien ten opzichte van de tweede spoel. In de praktijk zullen door fluxverliezen de hierboven vermelde grenswaarden niet worden bereikt. Eveneens te vermelden is dat de variometer niet het beste middel is om een veranderlijke inductantie te bekomen: de lengte van de geleider blijft constant voor eender welke inductantiewaarde; dit brengt een degradatie van de kwaliteitsfactor van de spoel met zich als de inductantie verkleint.

De studie van twee spoelen in parallel is ingewikkelder door het feit dat de stromen in elk van de spoelen afhankelijk zijn van de inductanties, op hun beurt afhankelijk van de stromen. De bekomen verandering van de equivalente inductantie is beduidend minder dan in het vorige geval (in theorie van 0 tot de kleinste waarde van de twee inductanties).

**ONS5WF (on5wf@uba.be)**

#### BIBLIOGRAFIE

1. P. Berché, "Pratique et théorie de la TSF", Publications et éditions françaises de la TSF et Radiovision 1934.
2. E. Gillon, "Cours d'électrotechnique", Dunod 1961.
3. D. Halliday & R. Resnick, "Physics Part 2", Wiley 1962.
4. J. Quinet & A. Petitclerc, "Théorie et pratique des circuits de l'électronique et des amplificateurs Tome 1", Dunod 1968.
5. R. M. Eisberg & L. S. Lerner, "Physics Foundations and Applications", International Student Edition 1982.
6. G3YNH, "From Transmitter to Antenna", Inductors and transformers. [www.g3ynh.info/zdocs/index.html](http://www.g3ynh.info/zdocs/index.html).

L'inductance équivalente vaut alors:

$$L_{eq} = \frac{N_1 \phi_{total B_1}}{i} + \frac{N_2 \phi_{total B}}{i} \quad (24)$$

Dans la relation (24),  $i$  est le courant traversant les bobines. En remplaçant dans (24) les flux totaux par leurs expressions (22) et (23), on obtient:

$$L_{eq} = \frac{N_1 \phi_1}{i} + \frac{N_1 k \phi_2}{i} + \frac{N_2 \phi_2}{i} + \frac{N_2 k \phi_1}{i} \quad (25)$$

$$\text{Compte tenu du fait que } L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{i}, L_2 = \frac{N_2 \phi_2}{i}$$

$$\text{et } M = \frac{N_1 k \phi_2}{i} = \frac{N_2 k \phi_1}{i},$$

(25) peut s'écrire:  $L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M$  (26)

Ou encore,

$$\text{puisque } M = kM_{max} = k\sqrt{L_1 L_2} : L_{eq} = L_1 + L_2 + 2k\sqrt{L_1 L_2} \quad (27)$$

Dans le cas de deux bobines coaxiales, l'inductance équivalente peut varier, selon le signe de  $k$ , de

$$L_{eq_{min}} = L_1 + L_2 - 2\sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{bij } k=-1) \quad (28)$$

$$\text{à } L_{eq_{max}} = L_1 + L_2 + 2\sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{bij } k=+1) \quad (29)$$

Pour  $k = 0$  (pas de couplage entre les deux bobines), on retrouve bien la relation (21). Si les deux bobines sont identiques ( $L_1 = L_2 = L$ ), l'inductance totale variera de  $L_{eq_{min}} = 0$  (pour  $k = -1$ ) tot  $L_{eq_{max}} = 4$

(pour  $k = +1$ ). C'est le principe du **variomètre**, un assemblage de deux bobines coaxiales dont l'une peut tourner de  $180^\circ$  par rapport à l'autre. Dans la pratique, à cause des fuites de flux, on n'atteint pas les limites données ci-dessus. Il faut noter également que le variomètre n'est pas le meilleur procédé pour obtenir une inductance variable. En effet, la longueur de conducteur reste la même quelque soit la valeur de l'inductance; cela entraîne une dégradation du facteur de qualité de la bobine lorsque l'inductance diminue.

Le cas de deux inductances couplées en parallèle est plus compliqué à étudier du fait que les courants dans chacune des deux inductances dépendent de ces inductances qui elles-mêmes dépendent de ces courants. La variation d'inductance équivalente que l'on obtient n'est pas aussi importante que dans le cas précédent (théoriquement, de 0 à la valeur de la plus petite des deux inductances).

**ONS5WF (on5wf@uba.be)**

#### BIBLIOGRAPHIE

1. P. Berché, "Pratique et théorie de la TSF", Publications et éditions françaises de la TSF et Radiovision 1934.
2. E. Gillon, "Cours d'électrotechnique", Dunod 1961.
3. D. Halliday & R. Resnick, "Physics Part 2", Wiley 1962.
4. J. Quinet & A. Petitclerc, "Théorie et pratique des circuits de l'électronique et des amplificateurs Tome 1", Dunod 1968.
5. R. M. Eisberg & L. S. Lerner, "Physics Foundations and Applications", International Student Edition 1982.
6. G3YNH, "From Transmitter to Antenna", Inductors and transformer <http://www.g3ynh.info/zdocs/index.html>.