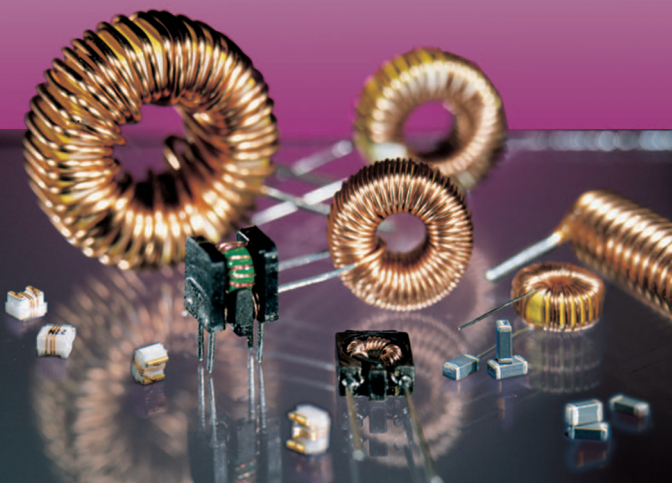


**Induktiivisuus**

**1**

# Induktiivisuuden ABC



## Osa 1: ABC

Induktiivisuuden ABC on ensimmäinen osa kolmesta oppaasta, joiden tarkoituksena on tehdä kelat ja niiden tekniset perusteet, rakenne ja sovellukset tutuksi.

## Osa 2: Sovellukset

Perusteita käsittelevän osan kaavat on tietoisesti rajattu suunnittelun tarpeisiin. Matemaattisista johdannoista on luovuttu.

## Osa 3: Komponentit

Toisessa osassa esitellään kelojen alakohtaisia sovelluksia. Kolmannessa osassa esitellään yleisimpiä komponentteja ja tarkastellaan eri tyyppien ominaisuuksia.

Johtavana ferriittien ja kelojen valmistajana myyntihenkilöstömme vastaa mielellään kysymyksiinne.

Nämä oppaat on tehty yhteistyössä parhaiden asiantuntijoiden kanssa.

Kuulemme mielellämme mielipiteenne tai korjausehdotuksenne näistä oppaista. Ottakaa yhteyttä. Puh 09-878 91 00, Fax 09-878 91 038 Jalo Härkönen.

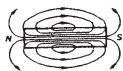
Kelat aiheuttavat useille suunnittelijoille paljon päänvaivaa. Tämä johtuu useista muuttujista, parametreista, jotka on huomioitava kelojen käytössä.

Tämä opas palauttaa mieleen tärkeimmät perusasiat. Kahdessa seuraavassa osassa esitellään kelojen optimaalisen käytön kannalta tarpeelliset ominaisuudet ja yleisimmät sovellukset.

<b>1. Peruslait .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Parametrit.....</b>	<b>5</b>
Induktanssin määrittely	
Impedanssi	
Ominaisresonanssitaajuus	
Häviöt (R)	
Hyvyysluku (Q-kerroin)	
Lämpöominaisuudet	
Mitoitusvirta (Rated current)	
<b>3. Sovellukset ja komponentit.....</b>	<b>12</b>

## 1. Kelojen peruslait

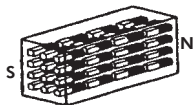
### Magneettisuus



tankomagneetti



järjestymätön



järjestynyt

Kelan toiminta perustuu magnetismiin.

Seuraavat ilmiöt ja lainalaisuudet ovat tuttuja koulun fysiikasta:

- Jokaisessa magneetissa on pohjoisnapa ja etelänapa (maapallo on suuri magneetti!)
- Jos magneetti katkaistaan, muodostuu kaksi uutta magneettia. Uusissa magneeteissa on pohjois- ja etelänapa. Magneetti voidaan jakaa atomaarisen pieneksi ominaisuuden katoamatta.
- Jokaista magneettia ympäröi magneettikenttä. Sitä kuvataan (magneetti)vuoviivoilla.
- On olemassa magneettisia aineita (esim. rauta) ja ei-magneettisia aineita (esim. alumiini).

Seuraavat tarkastelut pätevät vain (hyvin magneettivuota johtaville aineille) ferromagneettisille aineille.

Jokainen ferromagneetti koostuu lukemattomista pienistä magneettielementeistä, jotka suuntautuvat magneettikentän vaikutuksesta.

Jos kaikki magneettielementit ovat magneettikentän suuntaisia puhutaan materiaalin **kyllästyminen**.

Jos ulkoinen magneettikenttä poistetaan voi tapahtua kaksi ilmiötä:

- a) Magneettisuus katoaa:
  - Puhutaan magneettisesti pehmeästä aineesta.
- b) Aine jää magneettiseksi:
  - Puhutaan magneettisesti kovasta aineesta.

Ferromagneettisten aineiden tärkeä ominaisuus on **permeabiliteetti**. Jos ferromagneettinen aine laitetaan magneettikenttään, huomataan voimaviivojen keskittyvän aineeseen.

Ferromagneettinen aine johtaa hyvin kenttäviivoja. Sähköinen vastus on vastaava ilmiö. Permeabiliteetti kuvaa siis magneettista johtokykyä tai läpipäästökykyä.

Permeabiliteetti riippuu magneettikentän voimakkuudesta, taajuudesta, materiaalista ym. tekijöistä. Kelan käyttötarkoitukselta riippuen valitaan tietyn permeabiliteetin omaava sydänaine. Sydänaineen permeabiliteettiä kuvataan **suhteellisella permeabiliteetillä** ( $\mu_r$ ).

Laskuissa tarvitaan **absoluuttinen permeabiliteetti**

Se on magneettisen vakion  $\mu_0$

$$(4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m})$$

ja suhteellisen permeabiliteetin  $\mu_r$  tulo:

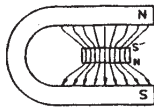
$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Sähkön kulkiessa johtimessa sen ympärille muodostuu magneettikenttä.

Magneettikenttään voidaan varastoida energiaa. Teknisesti se voidaan toteuttaa käämeillä, jotka koostuvat yhdestä tai useammasta kierroksesta käämilankaa. Kela tarkoittaa samaa asiaa.

Keloja eli käämejä on eri tyyppisiä: Ilmasydänkela (ilman ferriittiä), kela, jossa on rautajauhe- tai ferriittisydän, rengas-sydänkela, sauvakela, ym.

## Permeabiliteetti



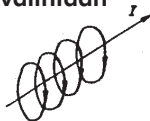
Tyypillisiä permeabiliteettejä  $\mu_r$ :

- rautajauhe ...50...90;
- nikkeli-sinkki ...300...800;
- mangaani-sinkki ....1000

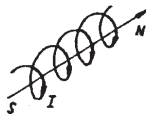
• **suhteellinen permeabiliteetti**

• **absoluuttinen permeabiliteetti**

2. Muuttujat optimaalisen komponentin valintaan



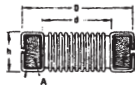
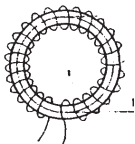
• **käämi = kela**



**vihje:** Würth Elektronikin oppaissa annetaan kaikki tarpeelliset parametrit optimaalisen induktiivisen komponentin valitsemiseksi

## 2.1. Kelan arvojen laskenta

### Induktanssi



SMD-rakennetyyppi on suosittu pienen kokonsa takia. Käämittyjen SMD-kelojen ohella monikerrostekniikkaan perustuvat kelat ovat tulleet yhä suosituimmiksi.

Kaikki kelat toimivat tavalla, jota voidaan kuvata seuraavilla määritelmillä.

Jos käämiin kytketään jännite, indusoituu siihen vastajännite. Käämin virran muutos aiheuttaa muutosta vastustavan jännitteen, itseinduktiojännitteen.

Induktanssi on kelan ominaisuus, joka määritellään seuraavasti: Induktiojännite riippuu seuraavista tekijöistä

- kierrosluku **N**

- absoluuttinen permeabiliteetti  $\mu$
- sydämen tai käämin geometria:

- magneettivuon lävistämä kelan poikkileikkauspinta-ala **A**
- (keski)sydämeniivan pituus **l**

Näistä suureista laskettua itseinduktio-kerrointa sanotaan induktanssiksi:

$$L = \frac{\mu \cdot A \cdot N^2}{l} \quad [\text{Henry: } 1\text{H} = 1\text{ Vs/A}]$$

Esimerkki:

#### **viereinen rengassydän**

Poikkileikkauspinta-ala

$$A = \frac{1}{2} \cdot (D - d) \cdot h$$

$$\text{Keskiviivan pituus } l = \frac{D+d}{2} \pi$$

Käytännön arvoja: 10 cm pitkän johtimen induktanssi on n. 100 nH;  
ilmasydänkela 2000 nH asti;

monikerroskela 10 nH ... 100  $\mu$ H;  
 sylinterimäiset kelat 1  $\mu$ H ... 1 mH;  
 häiriönpoistokuristimet 10  $\mu$  ... 10 mH.  
 Induktanssin tai kierrosluvun  
 määrittämiseksi yhdistetään sydämen  
 geometriset tiedot ja permeabiliteetti  
 permeanssiksi ( $A_L$ -arvo).

$A_L$ -arvo riippuu kelan kierrosluvusta N:

$$A_L = \frac{L}{N^2} \text{ [nH]}$$

Annetusta  $A_L$ -arvosta voidaan laskea kelan  
 kierrosluku tarvitsematta tietää sydämen  
 geometriaa:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Esimerkki:

Haluttu induktanssi on 100  $\mu$ H; sydämen  
 $A_L$ -arvo on 250 nH/N<sup>2</sup>

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{100\,000}{250}} = 20$$

Kelassa on oltava 20 kierrosta, jotta  
 saadaan 100  $\mu$ H induktanssi.

Kelan vastusarvo vaihtojännitteellä poik-  
 keaa tasavirtavastuksesta. Vaihtojännit-  
 teeseen kytketyn kelan napojen välistä  
 vaihtojännitevastusta kutsutaan  
 impedanssiksi (Z).

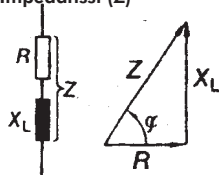
$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$$

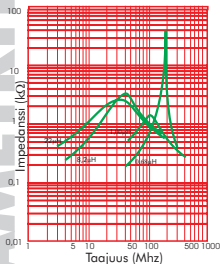
Impedanssi (Z) riippuu taajuudesta ja on  
 häviövastuksen (R) ja ideaalisen kelan (L)  
 reaktanssin ( $X_L$ ) geometrinen summa.

$A_L$ -arvo

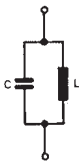
## 2.2 Impedanssi

Impedanssi (Z)





### 2.3 Ominaisresonanssitaajuus



**vihje:** kelaa käytetään ominaisresonanssitaajuuden alapuolella

### 2.4 Häviöt (R)

Reaktanssi  $X_L$  määritellään seuraavasti:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Huomioita: Reaktanssi kasvaa taajuuden kasvaessa. Ideaalilla kelalla tämä pätee äärettömään taajuuteen asti. Suurilla taajuuksilla rajoittavia tekijöitä ovat taajuudesta riippuva permeabiliteetti, kelan rakenne ja kapasitanssi.

Impedanssi putoaa nopeasti ominaisresonanssitaajuuden jälkeen, kelan induktiivinen ominaisuus katoaa.

Jokaisella kelalla on kämikierrosten tai useiden kerrosten vaikutuksesta kapasitiivinen ominaisuus. Tätä kapasitanssia kuvataan sijaiskytkennässä kondensaattorilla (C). Tämä kondensaattori ja kela muodostavat rinnakkaisresonanssipiirin. Varastoitunut energia heilahtelee ominaistajuudella kelan magneettikentän ja kondensaattorin sähkökentän välillä. Ulkopuolista energiaa ei tarvita (ideaalinen kela).

Jos kela toimii resonanssitaajuuden yläpuolella, muuttuu se yhä kapasitiivisemmäksi. Käytännössä pyritään toimimaan reilusti alle ominaisresonanssitaajuuden.

Jännitteen ja virran  $90^\circ$  vaihe-erosta johtuen reaktanssissa  $X_L$  ei kulu pätötehoa (lämpöhäviö).

Kelan häviöt voi yhdistää häviövastukseksi (R), joka on kytketty sarjaan

ideaalisen kelan ( $L$ ) kanssa. Näin muodostuu todellisen kelan sijaiskytkentä.

Koska häviö  $R$ :ssä riippuu taajuudesta, teknisissä tiedoissa ilmoitetaan tasavirtavastus ( $R_{DC}$ ). Se riippuu käytetystä lankamateriaalista, kelan mallista ja mitataan yksinkertaisella vastusmittauksella huoneenlämpötilassa.

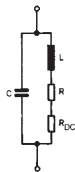
Tasavirtavastuksen  $R_{DC}$  suuruus vaikuttaa suoraan kelan lämpenemiseen. Mitoitusvirran jatkuvaa ylittämistä tulisi siksi välttää.

Tasavirtavastuksen aiheuttamien häviöiden lisäksi kelan häviöitä kasvattavat seuraavat taajuudesta riippuvat osat:

- häviöt sydänmateriaalissa (magnetoitumattomuus- ja pyörrevirtahäviöt)
- Virranajoituksen aiheuttama häviö johtimissa
- lähellä olevien käämien magneettikentän lähivaikutuksen aiheuttama häviö
- säteilyhäviöt
- magneettisen suojauksen aiheuttamat häviöt

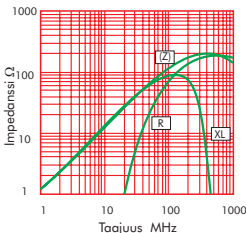
Kaikki osahäviöt voidaan yhdistää häviövastukseksi ( $R$ ). Häviövastus määrää kelan hyvyden.

Valitettavasti häviövastusta  $R$  ei voi määrittää matemaattisesti. Siksi kela mitataan koko taajuusalueella. Mittauksista saadaan yksittäiset komponentit  $X_L(f)$ ,  $R(f)$  ja  $Z(f)$ . Niistä voidaan määrittää kelan hyvyysluku ( $Q$ -kerroin).



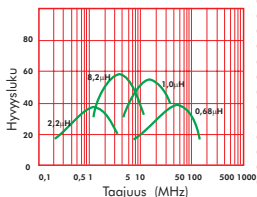
### vihje:

kela, jonka häviö on suuri nimitetään ferriitiksi, tarkempi selitys sivulla 10



## 2.5 Hyvyyssuku (Q)

### Hyvyyssuku- taajuus-kuvaaja



#### vihje:

selektiiviseen suotiimeen (kapea kaista) tarvitaan kela, jolla on suuri hyvyyssuku.

#### ferritiin ja kelan ero

Häviövastuksessa R lämmöksi muuttuva ulkoa syötetty energia ei varastoidu magneettikenttään. Mitä suurempi tämä häviö on, sitä huonommin kela toimii energiavarastona. Siksi kelan hyvyyttä kuvaava hyvyyssuku määritellään seuraavasti:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R}$$

Ilmasydänkeloilla hyvyyssuku voi olla jopa 400 (ei häviöitä sydänmateriaalissa). Ferriittisydänkeloilla saavutetaan hyvyyssuku 150 ja monikerroskeloilla 60.

Hyvyyssuku-taajuus-kuvaajan avulla voidaan valita sovellukseen paras kela.

Huomioita: Hyvyyssuku nousee maksimiarvoonsa ja laskee sen jälkeen. Maksimiarvoon asti kelan vastuksen R häviöt pysyvät pieninä. Maksimin jälkeen häviöt suurenevat merkittävästi, myös induktanssi vaihtelee ferriittimateriaalin epälineaarisuuden vuoksi. Pienihäviöinen käyttöalue on hyvyyssuvun käännepesteseen asti. Jos kelaä käytetään suuremmalla taajuudella kasvavat häviöt erittäin nopeasti.

Hyvyyssuku voidaan määrittellä myös käänteisesti:  $\tan \delta = 1/Q$   
( $\delta$ =häviökerroin).

Würth Elektronikin kielenkäytössä kelat ja SMD-ferritiit erotetaan selvästi. Ferritiit EMC-käyttöön on rakennettu periaatteessa samalla tavalla kuin kelat. Sydänmateriaalia (NiZn) voidaan käyttää korkeisiin taajuuksiin asti myös keloilla.

EMC-ferriittien hyvyysluku on pieni eli häviöt ovat suuret. Ominaisuudet ovat tarkoituksellisia ja absorboivat EMI-häiriötä. Niiden induktanssi on pieni.

Kelojen hyvyysluvun olisi oltava mahdollisimman suuri eli häviöiden mahdollisimman pieniä. Myös induktanssin olisi oltava vakio laajalla alueella.

Esitetty jako ferriitteihin ja keloihin Würth Elektronikin kielenkäytössä ulottuu myös uuteen komponenttiluetteloon. Osassa 1 ovat ferriitit ja osassa 4 edellämainitun määritelmän mukaiset kelat.

Ferromagneettisydämisten kelojen induktanssi muuttuu lämpötilan muuttuessa.

Jos kelojen stabiilisuuden on oltava suuri, (esim. mittaustekniikka), valitaan tarkoitukseen kela, jonka lämpötilariippuvuus on pieni. Siis induktanssin muutos  $\Delta L$  nimellisinduktanssiin  $L$  verrattuna on pieni. Ohessa vastaava kuvaaja.

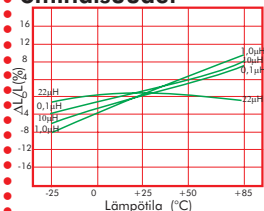
Mitoitusvirta, jonka kela voi johtaa on määriteltä tarkasti eri tuoteryhmille.

Mitoitusvirran maksimiarvo on se arvo, jolla

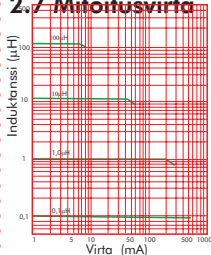
- induktanssin arvo ylittää määrätyn toleranssirajan (esim. WE-MI 10 %)
- komponentin lämpenemä ylittää 20° C.

Virran määritelmä selitetään tarkemmin osassa 3.

## 2.6 Lämpö- ominaisuudet



## 2.7 Mitoitusvirta



## 3. Sovellukset ja komponentit

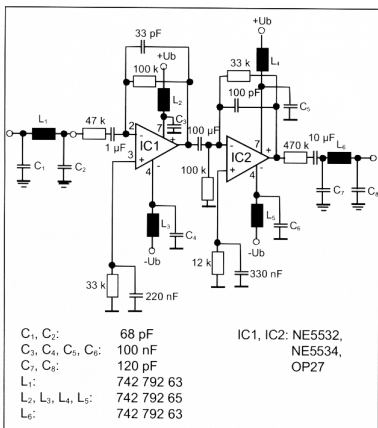
### 3.1 Sovellukset

### 3.2 Suosituttuja komponentteja

Osat 2 ja 3 muodostavat yhden kokonaisuuden. Esittelemme käytännön sovelluksia, jotka on valittu asiakkaidemme avustuksella ja yhteistyössä asiantuntijoiden kanssa. Yhdessä kirjassessa ilmestyvät osat 2 ja 3 viittaavat toisiinsa siten, että kytkentäesimerkkiin sopivat komponentit ja niiden tekniset tiedot löytyvät heti.

Lukuisat esimerkit - kuten oheinen esimerkkikuva – auttavat suunnittelussa. Kaikki kytkentäesimerkit perustuvat käytäntöön, eivätkä minimointiperiaatteen kuten joissakin julkaisuissa.

Osassa 3 esitellään tarkemmin seuraavat komponentit käytännön kytkentöihin perustuen:



- suojattu monikerros-SMD-kela WE-MI
- keraaminen SMD-kela WE-KI
- keraaminen monikerros-SMD-kela WE-MK
- SMD-ferriitit
- vastuksen muotoinen kela WE-WI
- sylinterimäinen kela WE-TI
- häiriönpoistokuristin WE-ZB
- kaksikäminen kela WE-VB
- häiriönpoistokuristin WE-FI
- SMD-kuristin WE-PD
- sauvasydänkuristin WE-SD
- SMD-korkeataajuuskela WE-HI
- ferriitihelmet ja -renkaat