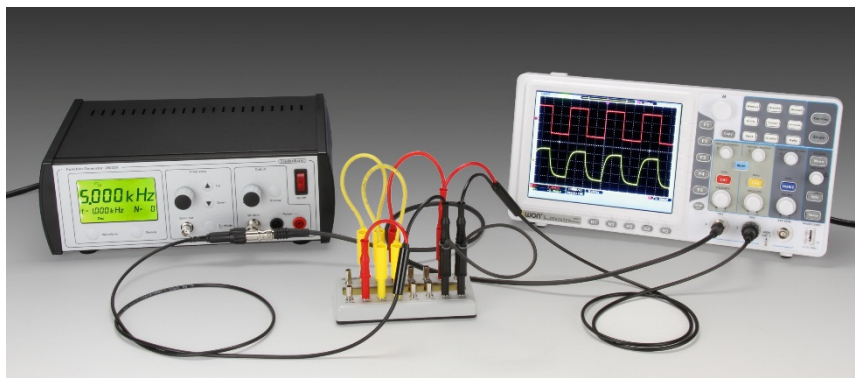


Nummer	136350	Emne	Vekselstrøm / elektronik	Foreslået til	gymA	p.	1/5
Version	2017-01-18 / HS	Type	Elevøvelse				



420600

## Formål

Opførslen af LCR lavpasfiltre undersøges gennem udmåling af frekvensgang og steprespons for en række af disse.

## Princip

Knækfrekvensen (faseresonansfrekvensen) bestemmes vha. oscilloskopet i XY-mode.

Frekvensgang: Amplituden af et sinusformet signal måles før og efter passage af filteret. Forholdet mellem de to amplituder afbildes grafisk med logaritmisk frekvensakse.

Steprespons: Et firkantsignal sendes ind i filteret og udgangssignalet iagttages på oscilloskop.

## Apparatur

LCR-kredsløb 420600 indeholder følgende komponenter:

- Resistorer (modstande):  
24,9 k $\Omega$  – 3,3 k $\Omega$  – 1,0 k $\Omega$  – 1,0 k $\Omega$  (1 %)
- Induktorer (spoler):  
4,7 mH – 1,8 mH (5 %)
- Kapacitorer (kondensatorer):  
2,2 nF – 1,0 nF (1 %)

Komponenterne er monteret med bøsninger for ledninger med sikkerhedsstik.

Resistorerne og kapacitorerne kan alle tåle at tilsluttes mindst 24 V DC eller AC kontinuert. Induktorerne tåler en strøm på maksimalt 200 mA kontinuert. Ingen af disse grænser overskrides i de opstillinger, som indgår i denne vejledning.

Forbindelserne til funktionsgenerator og oscilloskop kan med fordel ske med et specielt skærmet kabel (fra BNC-stik til sikkerhedsstik, varenummer 110002 – 2 stk.), mens forbindelsen mellem funktionsgenerator og oscilloskop kan udføres med et BNC T-stykke og et almindeligt coax-kabel (BNC til BNC, varenummer 110025).

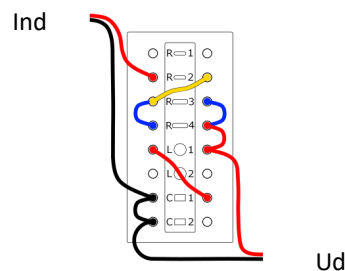
Da sikkerhedsstikkene på kablet 110002 ikke er af stabeltypen, skal disse kabler forbindes som det sidste i opstillingerne.

Af og til vil der mangle et sted at placere en nulleleder – det kan klares med en ekstra 25 cm sikkerhedsledning, som evt. kan placeres i en ubenyttet bøsning som vist på eksemplet til højre. (Komponenter, som kun har det ene ben forbundet, er ikke en del af kredsløbet.)

Skitserne i vejledningen anvender alle følgende farver:

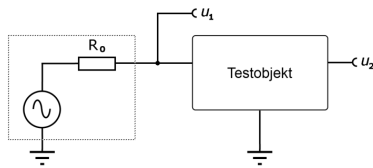
- Rød: Signalvej
- Sort: Nul
- Blå: Parallelforbindelse af komponenter
- Gul: Serieforbindelse af komponenter

Kredsløbets indgang er i alle tilfælde tegnet til venstre, udgangen til højre.



## Måleprincip, frekvensgang

Opstillingen herunder viser funktionsgeneratoren tilsluttet et testobjekt, f.eks. et filter.



Signalerne på filterets ind- og udgang betegnes hhv.  $u_1$  og  $u_2$ .

Signalet fra generatoren skal være sinusformet. Tegningen viser eksplicit, at generatoren har en udgangsimpedans, som her er  $50 \Omega$ , da vi benytter den normale udgang.

De to spændinger iagttages på et oscilloskop. Med et moderne digitaloscilloskop kan man direkte aflæse spændingernes størrelse. Hvis ikke dette er muligt, kan man måle peak-to-peak spændingen på skærmen. (Det er ikke nødvendigt at omregne til f.eks. effektivspændingen – blot man fastholder samme type spændingsangivelse hele vejen.)

Når begge spændingerne  $u_1$  og  $u_2$  måles som funktion af frekvensen  $f$ , kan måleobjektets frekvenskarakteristik bestemmes som

$$A(f) = \frac{u_2}{u_1}$$

Pointen er her, at ved at se på *forholdet* mellem spændingerne, er det underordnet, om størrelsen af  $u_1$  skulle variere lidt på grund af et spændingsfald over  $R_0$ .

Grafen for A afbildes ofte i et dobbeltlogaritmisk koordinatsystem.

Et *lavpasfilter* er et kredsløb, der tillader passage af signaler med frekvenser, der er lavere end en vis grænse, mens mere højfrekvente signaler dæmpes.

Et *højpasfilter* virker lige modsat.

Alle filtre vil i praksis have en mere eller mindre blød karakteristisk; der bliver ikke pludseligt "lukket af" ved en bestemt frekvens.

De simpleste filtre består blot af en resistor (R) og en kapacitor (C). Det viser sig, at man kan lave filtre med en skarpere afskæring ved også at benytte en induktor (L) i filteret.

Med de komponenter, der er på brættet, kan vi sammensætte mange forskellige LCR lavpasfiltre – i denne øvelse vælger vi fire kombinationer, som repræsenterer fire markant forskellige tilfælde.

## Måleprincip, resonansfrekvens

Resonansfrekvensen  $f_0$  for en LCR svingningskreds eller filter er den frekvens, hvor indgangsspænding og -strøm er i fase. Mere præcist kaldes denne frekvens for *faseresonansfrekvensen*.

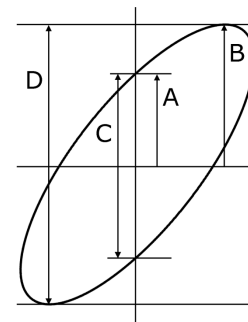
I måleopstillingen på næste side, hvor  $u_2$  måles over en kapacitor, vil  $u_1$  og  $u_2$  have en faseforskel på  $90^\circ$  ved frekvensen  $f_0$ .

(For en kapacitor er spændingen forsinket  $90^\circ$  i forhold til strømmen.)

Når oscilloskopet sættes i XY mode, og de to indgange tilføres sinusformede signaler med samme frekvens, vil skærbilledet være en ellipse – evt. som specialtilfælde en ret linje eller en cirkel.

Faseforskellen  $\varphi$  mellem de to signaler bestemmes ved at aflæse afstandene C og D (eller A og B) på skærmen – se figuren herunder.

(Måling af A og B kræver, at man er omhyggelig med at y-signalet har korrekt 0-punkt.)

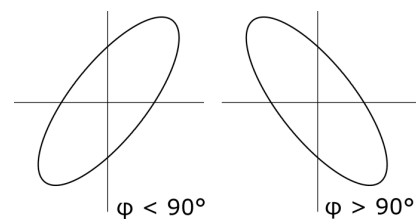


Der gælder følgende:

$$\sin(\varphi) = \frac{A}{B} = \frac{C}{D}$$

Hvis faseforskellen bliver større end  $90^\circ$ , vil ellipsens storakse dreje fra 1. og 4. kvadrant over i 2. og 3. kvadrant – se figur herunder.

For  $\varphi = 90^\circ$  bliver ellipsen symmetrisk om y-aksen.



En faseforskel på 0 eller  $180^\circ$  giver en ret linje – hhv. voksende eller aftagende. (For større faseforskelle end  $180^\circ$  vil man igen se en ellipse, og holder man hovedet koldt, kan værdien stadigvæk bestemmes. Så store faseforskelle vil vi dog ikke opleve i denne øvelse.)

Da fasen kan opfattes som en vinkel, anvender man ofte betegnelsen *fasedrejning* frem for faseforskel.

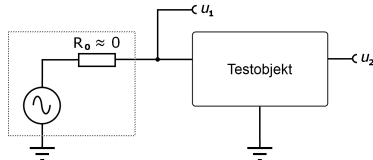
Begge signaler er sinusformede, så  $50 \Omega$ -udgangen på funktionsgenerator 250350 benyttes.

Vi vil definere filterets overgangsfrekvens eller knækfrekvens til at være faseresonansfrekvensen.

## Måleprincip, steprespons

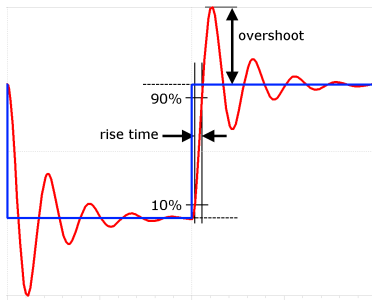
Denne måling foregår med opstillingen tilsluttet power-udgangen på funktionsgeneratoren og kurveformen sat til firkanter.

Med de komponentværdier, vi benytter, vil en frekvens på f.eks. 5 kHz være passende. Dermed kan vi bruge funktionsgeneratorens power-udgang med dens forsvindende lille udgangsimpedans.



Hvis oscilloskopet har mulighed for at udskrive skærmumps, kan disse direkte benyttes som måleresultat – ellers må man tage et foto eller tegne skærbilledet af på kvadreret papir.

På tegningen herunder forestiller den blå kurve indgangssignalet, mens den røde forestiller et muligt udgangssignal.



De to måleparametre, som vi vil koncentrere os om, er hhv. rise time og overshoot:

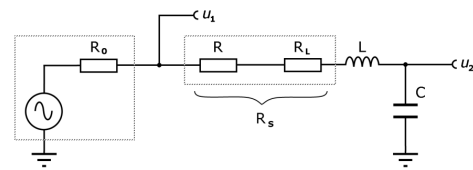
**Rise time** er den tid, det tager for signalet at gå fra 10 % til 90 % af det endelige spændingsspring på udgangen.

**Overshoot** er størrelsen af en eventuel spændingsspids, som overstiger den endelige værdi af udgangsspænding. Angives i procent af spændingsspringets størrelse.

Opstår der som vist på figuren en dæmpet svingning efter spændingsspringet, taler man om *ringning*.

Vær opmærksom på, at et digitaloscilloskop ofte kan måle rise time, men at målingen kan være ugyldig, hvis der optræder ringninger – kontroller altid med akseenhederne og din sunde fornuft.

## 1) LCR lavpasfilter – frekvensgang



I måleopstillingen herover har vi igen til venstre funktionsgeneratoren med udgangsimpedansen  $R_0$ . Signalet fra generatoren tilføres indgangen på et såkaldt lavpasfilter, bestående af en resistor, en induktor og en kapacitor.

Vi ser, at såvel den ydre resistans  $R$  som spolens egen resistans  $R_L$  er i serie med den rene induktor  $L$ . Summen af disse vil vi betegne  $R_S$ .

Da vi måler den faktiske størrelse af  $u_1$ , skal  $R_0$  derimod ikke betragtes som en del af filteret.

Kredsløbet ligner meget en seriesvingningskreds, blot er det her spændingen over kapaciteten, der er udgangssignalet. Den skarpe resonans dæmpes af resistoren.

Vi vil definere en såkaldt *Q-faktor*, som viser sig at have stor betydning for filterets opførsel. (Dette vil specielt vise sig i den følgende del).

$$Q = 2\pi f_0 \cdot \frac{L}{R_S} = \frac{1}{R_S} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Med faste valg af induktor og kapacitor kan  $Q$  ændres ved at vælge  $R$  (og dermed  $R_S$ ) passende. Vi vil benytte  $L = 4,7$  mH,  $C = 2,2$  nF, og værdierne  $500 \Omega$ ,  $2000 \Omega$ ,  $2914 \Omega$  og  $5300 \Omega$  for  $R$ . Disse opnås ved passende serie- og parallelforbindelse af de resistorer, der er tilgængelige.

Vi opnår med disse komponentvalg følgende fire tilfælde (acceptér i første omgang blot navnene):

**Underdæmpet:**  $R = 500 \Omega$   $R_S = 509 \Omega$   $Q = 2,9$

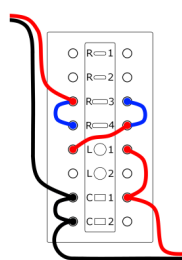
**Flad respons**  $R = 2000 \Omega$   $R_S = 2009 \Omega$   $Q = 0,73 \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$

**Kritisk dæmpet:**  $R = 2914 \Omega$   $R_S = 2923 \Omega$   $Q = 0,50 \approx \frac{1}{2}$

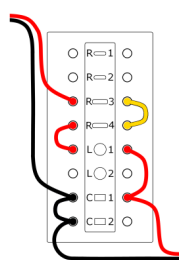
**Overdæmpet:**  $R = 5300 \Omega$   $R_S = 5309 \Omega$   $Q = 0,28$

( $2914 \Omega$  opnås ved parallelkobling af resistorerne på  $24,9$  k $\Omega$  og  $3,3$  k $\Omega$ .)

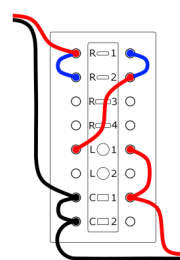
$5300 \Omega$  opnås ved serieforbindelsen ( $1+1+3,3$ ) k $\Omega$ .)



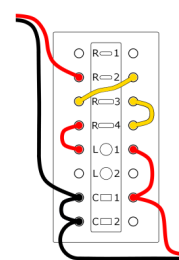
Underdæmpet



Flad respons



Kritisk dæmpet



Overdæmpet

Gennemfør følgende måleprogram for hvert af de fire tilfælde:

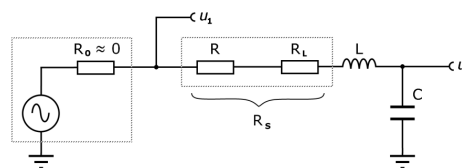
Bestem  $f_0$ , hvor fasedrejningen er  $90^\circ$ .

Mål med oscilloskopet indgangsspændingen  $u_1$  og udgangsspændingen  $u_2$  ved  $f_0$  – samt ved følgende frekvenser:

5, 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300 kHz

Afbild  $u_2/u_1$  som funktion af frekvensen. Benyt en logaritmisk frekvensakse. Kommentér udseendet.

## 2) LCR lavpasfilter – steprespons



Måleopstilling er omtrent den samme som i det foregående eksperiment; den eneste ændring er, at vi benytter funktionsgeneratorens power-udgang, hvor man kan se bort fra  $R_0$ . Signalet fra generatoren tilføres indgangen på lavpasfilteret. Indstil generatoren på firkanter og frekvensen 5 kHz.

Indstil oscilloskopet, så både indgangssignalet  $u_1$  og udgangssignalet  $u_2$  kan ses på skærmen.

Vi skal igen undersøge betydningen af Q-faktoren, som blev defineret ovenfor.

Benyt de samme komponentværdier som før

For hvert af de fire tilfælde skal oscilloskopbilledet kopieres, fotograferes eller tegnes.

Mål i alle fire tilfælde *rise time* og *overshoot*.

Kommentér – gerne i sammenhæng med resultaterne fra eksperiment 1.

## Teori

Knækfrekvensen (faseresonansfrekvensen) er med særdeles god tilnærmelse givet ved

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$$

Q-værdien defineres som

$$Q = 2\pi f_0 \cdot \frac{L}{R_s} = \frac{1}{R_s} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Frekvenskarakteristik for lavpasfilter

$$A_{lowpass}(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

## Databehandling

Både den målte og den teoretiske frekvenskarakteristik kan bekvemt afbildes ved at bruge et regneark.

Begge akser sættes til at være logaritmiske. Dette fremhæver nogle pointer omkring filternes opførsel.

Det foreslås at bruge ét koordinatsystem til alle måleserier (komponentsammensætninger) i eksperimentet.

## Diskussion og evaluering

Prøv at beskrive de fire filteres opførsel i ord. Hvad betyder knækfrekvensen og Q-værdien for opførslen?

Hvad er den teoretiske værdi for  $A(f_0)$  ?

Kommentér de navne, som blev givet for de fire tilfælde.

Sammenlign de teoretiske og målte frekvenskarakteristikker.

Er der afvigelser? Kan disse evt. blot skyldes tolerancen (1-5 %) på komponenterne?

## Noter til læreren

### Benyttede begreber

Frekvenskarakteristik  
Knækfrekvens  
Serieforbindelse  
Parallelforbindelse  
Steprespons  
Rise Time  
Overshoot

### Matematiske forudsætninger

Logaritmisk koordinatsystem  
(Brug af regneark)

### Om apparaturet

1 k $\Omega$  resistorerne tåler 1 W.  
Øvrige resistorer 0,6 W.  
(Disse effekter overstiges ikke ved anvendelse af almindelige 0-24 V strømforsyninger.)

Kapacitorerne tåler mindst 250 V.

Spolerne har en maksimal strømstyrke på 240 mA (4,7 mH) hhv. 210mA (1,8 mH).

Da spolerne er viklet på ferritkerne, vil der optræde et mætningsfænomen, hvor induktansen falder med voksende strøm. For at minimere denne effekt, anbefaler vi, at spidsstrømmen holdes under 200 mA.

### Didaktiske overvejelser

Decibel berøres ikke, men kan naturligvis inddrages, om det måtte ønskes.

Det behandles derfor heller ikke eksplicit, at LCR filtre har en flankestejlhed på 12 dB / oktav.

Ud fra både de teoretiske og de målte frekvenskarakteristikker bør eleverne dog kunne opdage eksistensen af en fast flankestejlhed.

Vær opmærksom på, at der kan mødes andre definitioner på knækfrekvensen end den her benyttede.

Disse målinger kan f.eks. kombineres med eksperimenterne 136310 RC Lavpasfiltre og 136320 RC Højpasfiltre.

Arbejder man også med 136330 Svingningskredse eller 136340 LCR båndpas- og båndstopfiltre, er det vigtigt at bemærke de to *forskellige* værdier for faseforskellen (målt på oscilloskopet), som indikerer resonans: I denne øvelse aflæses spændingen  $u_2$  over en kapacitor – i 136330 og 136340 måles over hele svingningskredsen.

## Detaljeret apparaturliste

### Specifikt for eksperimentet

420600 LCR-opstilling

### Større udstyr

250350 (eller 250250) Funktionsgenerator

400150 Oscilloskop, digitalt 60 MHz  
eller

400100 Oscilloskop, PC, 60 MHz

### Standard laboratorieudstyr

110002 Kabel, BNC – to sikkerhedsstik (2 stk.)

111100 BNC T-stykke

110025 Coaxkabel HQ 100 cm BNC/BNC 50 Ohm

105710 Sikkerhedskabel 25cm, sort

105711 Sikkerhedskabel 25cm, rød (2 stk.)

105712 Sikkerhedskabel 25cm, gul (2 stk.)

105713 Sikkerhedskabel 25cm, blå (2 stk.)

## Reklamationsret

*Der er to års reklamationsret, regnet fra fakturadato. Reklamationsretten dækker materiale- og produktionsfejl.*

*Reklamationsretten dækker ikke udstyr, der er blevet mishandlet, dårligt vedligeholdt eller fejlmonteret, ligesom udstyr, der ikke er repareret på vort værksted, ikke dækkes af garantien.*

*Returnering af defekt udstyr som garantireparation sker for kundens regning og risiko og kan kun foretages efter aftale med Frederiksen. Med mindre andet er aftalt med Frederiksen, skal fragtbetøbet forudbetales. Udstyret skal emballeres forsvarligt. Enhver skade på udstyret, der skyldes forsendelsen, dækkes ikke af garantien. Frederiksen betaler for returnering af udstyret efter garantireparationer.*

© Frederiksen Scientific A/S

*Denne brugsvejledning må kopieres til intern brug på den adresse hvortil det tilhørende apparat er købt. Vejledningen kan også hentes på vores hjemmeside*