



Fasedrejning i en kondensator og betragtninger vedrørende RC-led.

Følgende er nogle betragtninger, der gerne skulle føre frem til en forståelse af faseforskydningen mellem spænding og strøm i modstande og kondensatorer (og spoler) ved forskellige frekvenser.

Først betragtes en modstand, dernæst en kondensator, og til sidst en kombination:

Modstand:

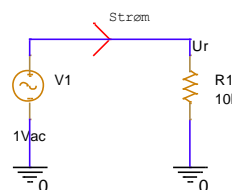
Hvis man tilslutter en sinus - spændingsgenerator direkte til en **modstand**, ses, at der går en vekselstrøm gennem modstanden.

Generatoren pumper ladningerne frem og tilbage. Det er de samme elektroner, der bare skubbes lidt frem og tilbage. Og de løber kun ganske kort, langt under 1 mm. Men alle elektroner skubber til de næste osv. lige som en række togvogne.

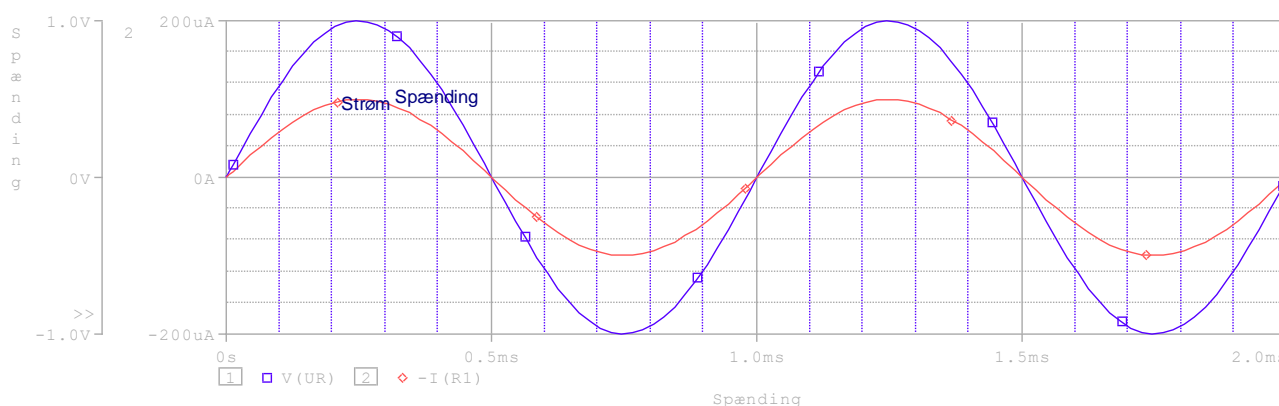
Dvs. at når sinus-spændingen er positiv, er strømmen positiv, og når sinus-spændingen er negativ, er strømmen også negativ.

Når spændingen er størst, vil strømmen også være størst.

Og i spændingens nulgennemgang, hvor spændingen jo er nul, vil strømmen også være nul.

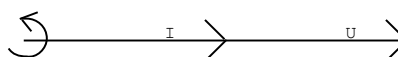


Man siger, at strøm og spænding er i fase. De er der samtidig.



Her er vist et plot af Spænding og tilhørende Strøm. De er i fase. Fasedrejning $\varphi = 0$.
Det ses, at frekvensen er 1 KHz, dvs. 1 hel svingning varer 1 mS

På vektordiagramform ser situationen således ud!





Vinklen mellem spænding og strøm kaldes fasedrejning, og benævnes med Φ , φ .
Vinklen mellem dem er 0 grader. Φ er = 0.

Kondensator

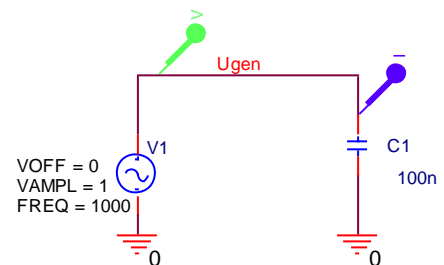
Nu sættes en ”uendelig god” sinus spændingsgenerator direkte til en kondensator. Der er ingen modstand i tilledningen, derfor vil kondensatorens spænding til enhver tid være den samme som generatorens.

Der er ingen modstand til at bremse ladningernes flow. Dvs. så snart, generatorens spænding ændres, vil kondensatoren være opladt til samme spænding.

U_C er altså altid lig med U_{gen} . Altså når U_{gen} er i max, er U_C også i max.

Men kondensatoren skal jo oplades / aflades for at spændingen over den kan ændres. Og både til opladning og til afladning kræves, at der flyttes ladninger.

Dvs. at der går en strøm.



Generatoren forbundet til en kondensator.

Dvs. at hvis den påtrykte spænding ændres, ændres kondensatorens spænding tilsvarende, og der må der gå en strøm. Og hvis spændingen skal ændres meget på kort tid, må der gå en ”stor” strøm.

Det betyder også, at hvis der ikke ændres på spændingen over kondensatoren, går der ingen strøm til kondensatoren.

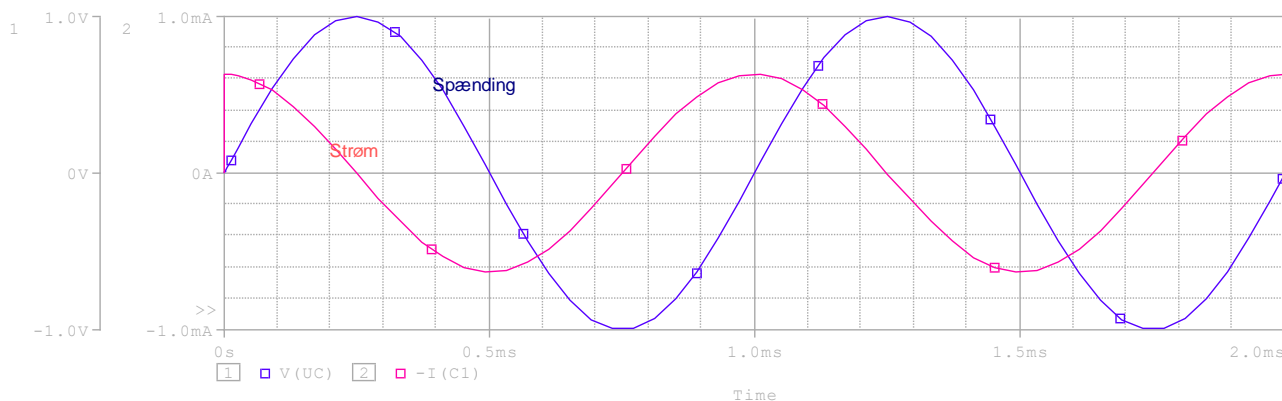
Dette sker jo hvis hældningen på den påtrykte sinus-spænding er 0. Dvs. at $\frac{d(U_C)}{dt} = 0$.
Og dette sker netop i sinusspændingens toppunkt og i dens bund.

Altså hvis sinusspændingen er i top, vil strømmen I_c være 0.

Omvendt – når generatorspændingen U_C krydser 0 Volt, er hældningen $\frac{d(U_C)}{dt}$ størst.

Derfor er spændingsændringen størst her, og derfor må strømmen til kondensatoren også her være størst her.

På en graf ser det ud som på følgende:



Graf for spænding og strøm i en kondensator. Det ses, at der er en fasedrejning $\Phi = 90$ grader.

Grafen for den påtrykte spænding er markeret med trekanter, strømmen med firkanter.

Efter et spændings-toppunkt falder spændingen, og kondensatoren må følgelig aflades. Altså er strømmen på vej ud af kondensatoren, hen mod generatoren.

Hvis strømmen hen til kondensatoren regnes positiv ses, at efter et spændingstopunkt er strømmen til kondensatoren negativ. Og grafen for strømmen må krydse nul-linjen.

Den skifter retning, hvilket ses af at den krydser nullinjen.

Og i spændingens nulgennemgang er dens hældning størst, (enten positiv eller negativ), og derfor er spændingsændringen størst og der skal flyttes flest elektroner pr tidsenhed ud af eller ind i kondensatoren. Følgelig må strømmen være størst her.

Altså må der, som der ses på grafen, være en forskydning mellem strøm og spænding på 90 grader.

Og strømmen er 90 grader før spændingen. (En hel svingning er jo 360 grader).

På grafen ovenfor af U_c og I_c , med tiden ud ad X-aksen, vil først I_c krydse 0 [V] på vej ned, og 90 grader senere krydser U_c 0 [V] på vej nedad. U_c er altså 90 grader bagefter I_c .

Eller I_c er 90 grader foran U_c . Fasedrejningen Φ , $\phi = 90$ grader.

Huskeregul:

For at huske at strømmen er foran spændingen i en kondensator, kan man bruge navnet ELICE. Omkring C`et ses at "I" er før "E".

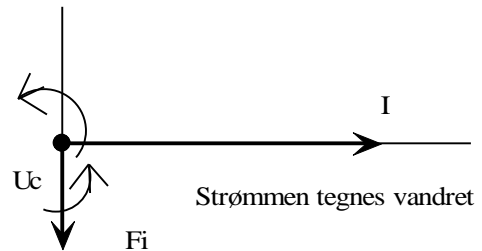
Egentlig bruges U for spændingen, men tidligere brugtes E. Derfor burde hun hedde ULICU.

(Reglen kan også bruges for en spole, der betegnes med bogstavet L. Her ses, at U er før L, og I efter L. Altså her er spændingen 90 grader før strømmen!)



På vektorform ser strøm og spænding i en kondensator således ud.

Vektorerne drejer venstre om. Man står et sted og venter, og den første vektor, der ankommer, er strømmen. 90 grader efter kommer spændingen. Fasedrejningen eller faseforskydningen er 90 Grader.



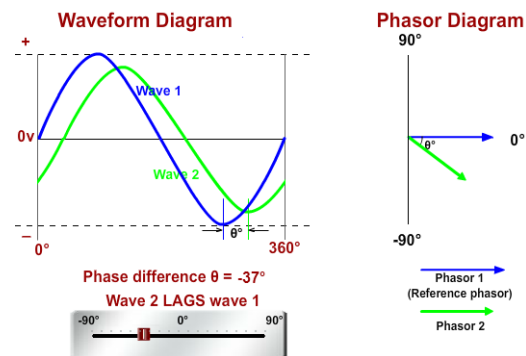
Strømmen i en kondensator er 90 grader forud for spændingen over den.

I dagligdagen kender vi fx faseforskydning fra årstiderne. Det er ikke koldest ved 21. december, der er den korteste dag. Og det er ikke varmest til Sct. Hans. Temperaturen er forskudt bagud et par måneder.

Og vores døgnrytme er forskudt. Vi står jo ikke op og udnytter de første lyse timer. Og vi er vågne til sent aften.

Englænderne er forskudt bagud i forhold til os, men forud i forhold til USA !!

Se evt. en animation:



http://www.learnabout-electronics.org/ac_theory/ac_ccts_53.php

Kondensatorens ”modstand” ved AC.

En kondensators modstand ved DC er uendelig.

Når kondensatoren er opladt, går der jo ikke mere strøm. Kun hvis der er en lækmodstand, vil der gå en lille strøm.

Men ved AC bliver kondensatoren hele tiden opladt og afladt. Dvs. der går en strøm til og fra kondensatoren.

Ved samme spænding, fx 12 V_{pp} AC, er det samme ladningsmængde, der hele tiden skal transporteres til og fra kondensatoren, - uanset frekvens.

Generatoren pumper blot ladninger rundt i kredsløbet, frem og tilbage!



Ladningerne ankommer til den ene plade, og ophobes, samtidig med at der fra den anden plade forlader samme mængde ladninger, efterladende ”huller”.

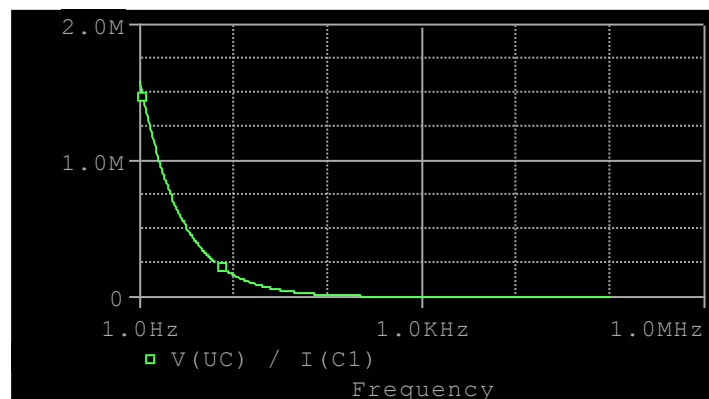
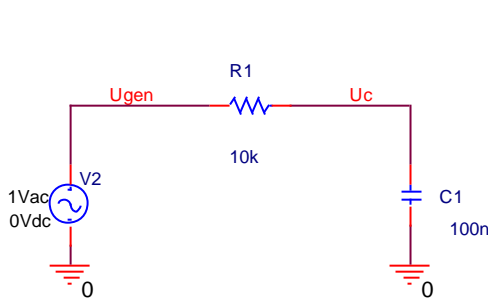
Ved højere frekvens skal samme ladningsmængde transporteres hurtigere frem til og tilbage fra kondensatoren for at opnå samme spænding. Dvs. der er kortere tid til at oplade kondensatoren, idet $U_c = \frac{Q}{C}$. Kondensatorens spænding er lig med dens ladning Q delt med kondensatorens størrelse i Farad.

En hurtigere ladningstransport er jo ensbetydende med en større strøm. Og en større strøm svarer til en mindre modstand. Altså ved stigende frekvens virker kondensatoren som en mindre modstand.

En kondensators modstand ved vekselspænding kan beregnes med : $X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c} [\Omega]$

Men fordi strøm og spænding ikke er i fase, kaldes kondensatorens modstand ikke modstand, men **Impedans**. Den benævnes med et X, og fordi det er en capacitor, med index c, altså Xc.

ORCAD kan vise en graf, ved at få den til at vise en graf for U / I ved et frekvenssweep.



Hvorfor kan strøm gå gennem en kondensator ??

En kondensator er to ledende plader adskilt af et dielectricum (en isolator). Derfor kan strøm ikke passere gennem den. Men hvis strømmen er AC kan det observeres, at noget ækvivalent til strømmen passerer!

Hvis en kondensator påtrykkes en sinus-spænding, vil polariteten af spændingen målt ved input-terminalerne på kondensatoren svinge mellem positive og negative spændinger.

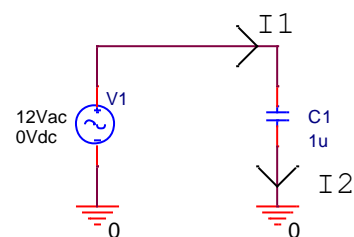
Den – vekslende – spænding vil bevirke, at der sker en opladning og afladning – og opladning med modsat polaritet med en given frekvens. Altså går der en strøm til – og fra kondensatoren.



Hvis den påtrykte spænding går positiv, bliver elektroner opmagasineret på den kondensator-plade, spændingen er tilsluttet. Og da elektroner frastøder andre elektroner, bliver elektroner frastødt på den anden plade.

Hvis den påtrykte spænding går positiv, bliver elektroner opmagasineret på den øverste kondensator-plade. Og da elektroner frastøder andre elektroner, bliver elektroner frastødt på den anden plade.

I2 er altså lige så stor som I1.



Man kan også sige, at elektroner løber til den ene side af en kondensator, og andre forlader den anden side, efterladende huller. Det ser altså ud som om, strømmen kan gå ”gennem” en kondensator.

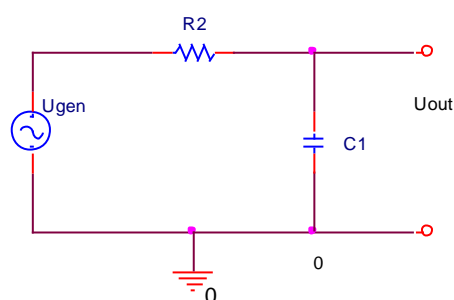
Den øjeblikke-energi, der til enhver tid er opmagasineret i en kondensator, er $W_C = \frac{1}{2} CU^2$ [Joule].

RC-LED

Nu ses på en serieforbindelse af en modstand og en kondensator, - et såkaldt RC-led. Herved fås en mellemting mellem en ren ohmsk belastning og en kapacitiv belastning. Alt afhængig af frekvensen. Modstandens størrelse er uafhængig af frekvensen, men som vi har set, er kondensatorens modstand, dvs. dens impedans modstandsafhængig.

Det er en serieforbindelse, derfor er strømmen altid af samme størrelse i modstanden og i kondensatoren.

Den påtrykte spænding deler sig mellem modstanden og kondensatoren, og idet kondensatorens modstand er frekvensafhængig, må der også være et frekvensafhængigt forhold mht. spændingsdelingen.



Generatoren påtrykker RC-leddet en sinus-spænding.

Strømmen I er ens i de to komponenter. Når der går en strøm i den ene, går der også strøm i den anden. Der kan ikke ophobes ladninger! Strøm ophobes ikke. Der kan måles lige stor strøm hele vejen rundt i kredsløbet.

Størrelsen af strømmen I er afhængig af modstanden, generatoren ser ind i. Og modstanden er igen afhængig af generatorens frekvens, idet kondensatorens modstand X_C jo er frekvensafhængig.



Hvis en ” blandings-modstand ” ikke er ren ohmsk, kaldes den for en **impedans**.

Ved ren ohmsk belastning ville strøm og spænding være i fase. Dvs. at når spændingen er på sit højeste, er strømmen det også. Og når spændingen er 0, er strømmen også 0. Fasedrejningen ϕ er 0 grader. (Dette er vist tidligere)

I vektordiagrammet afsættes ved ren ohmsk belastning både strøm og spænding ud af samme akse vandret til højre og vinklen mellem dem er 0 grader.

Men nu er der en **”ikke ohmsk”** komponent med. Dvs. at strøm og spænding ikke længere er i fase.

I et vektordiagram – se nedenfor - afsættes den, der er ”ens”, altid vandret til højre. I en serieforbindelse er det strømmen, der er ens – eller fælles. Strømmen går jo gennem begge komponenter samtidigt.

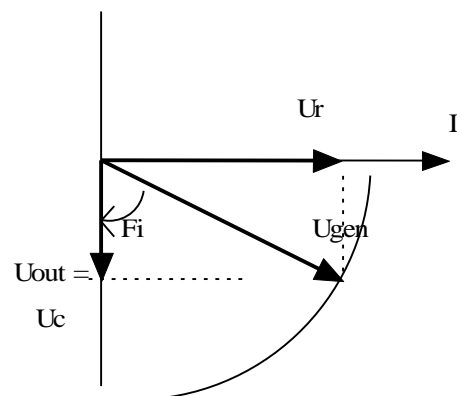
Spændingen over modstanden U_R er altid i fase med strømmen og afsættes ud ad X-aksen i fase med strømmen. I kondensatoren er – som vi har set - strømmen I_C 90 grader foran spændingen U_C - og det betyder jo også, at spændingen er bagud for strømmen. 90 grader bagud.

Vektordiagrammet drejer mod uret. Man ”står” så et sted, og ser, hvad der først kommer forbi. Derfor må U_C afsættes lodret nedad, altså 90 grader bagud for strømmen.

Generatorspændingen U_{Gen} er den geometriske sum af U_R og U_C . Strømmen er altså foran den påtrykte generatorspænding.

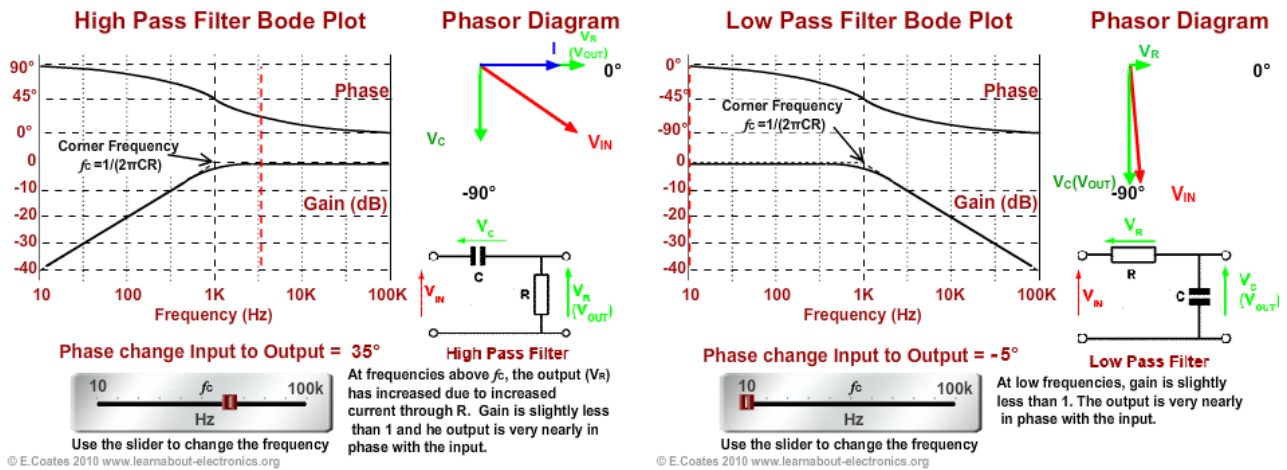
U_{OUT} , der er lig U_C , er bagud i forhold til generatorspændingen, altså haves en faseforskydning bagud eller ”en negativ faseforskydning”.

Faseforskydningen for U_{out} er vinklen mellem U_{gen} og U_{OUT} og kaldes for ” ϕ ”.



Vektordiagram for U_R , U_C og U_{GEN} i et RC-led.

Se evt. en Animation:



http://www.learnabout-electronics.org/ac_theory/filters82.php#lpf

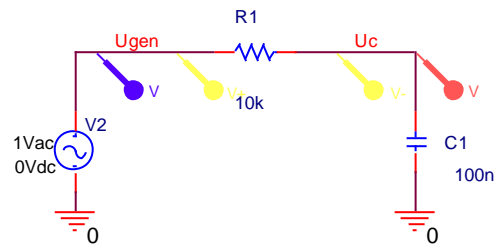
U_{gen} er den påtrykte spænding. Dennes længde ændres ikke ved forskellige frekvenser. Den bestemmes jo af generatoren. Men fordelingen af spændingen over R og X_C ændres ved forskellige frekvenser. U_C bliver mindre ved højere frekvenser. Dvs. at vektoren U_{gen} vandrer / drejer fra næsten lodret cirkelformet op mod vandret mod højre omkring Origo ved stigende frekvens.

ORCAD kan igen hjælpe os.

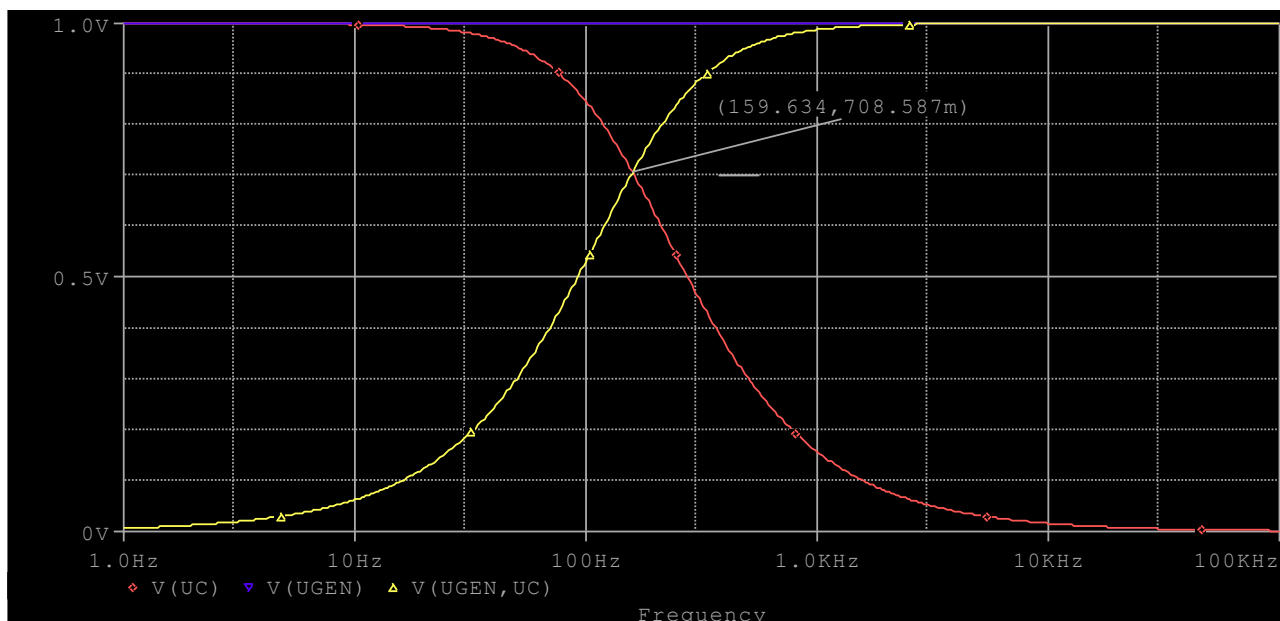
De gule markere er en spændings-difference-markere.



Eller vælg "Add Trace" og indtast U_{gen} minus U_C .

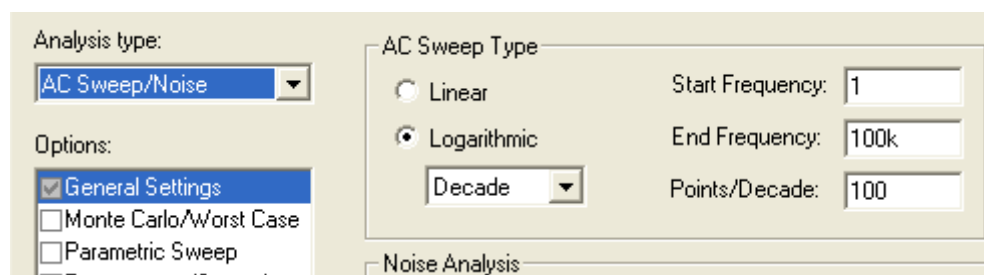


Graferne ser således ud.:



Bemærk, at hvis man umiddelbart adderer U_r og U_c , får man mere end den påtrykte spænding. Det går dog ikke, da de ikke er i fase. De skal adderes vektorielt!

I opsætningen af simuleringen vælges et AC-sweep, og der angives startfrekvens og slutfrekvens.



Ved meget lave frekvenser er X_C meget stor, og næsten hele generatorspændingen kan måles over kondensatoren. Modstandens værdi er lille i forhold til X_C . Vektoren U_{gen} er næsten lodret. Strømmen I må være lille!

Det stemmer jo også godt med at ved en lav frekvens er kondensatorens impedans (modstand) stor.

Stiger frekvensen, falder X_C , og vektoren U_{gen} drejer mod højre. Spændingen over X_C falder mens den stiger over modstanden. I må også blive større.

Ved en bestemt frekvens er kondensatorens X_C faldet til samme værdi som modstandens ohmske størrelse. X_C og R er lige store, og derfor også delta U_C og delta U_R . I er jo den samme i både modstand og kondensator. Sammenlagt vektorielt er de lig med den påtrykte spænding U_{gen} . Dvs. at U_{gen} må gå 45 grader ned mod højre.

Altså ses, at jo større U_C er i forhold til U_R , jo mindre vinkel. Den største U_C fås ved den laveste frekvens, hvor modstanden i kondensatoren jo er meget stor. Jo mere frekvensen stiger, jo mindre bliver impedansen i kondensatoren, og jo mindre bliver delta U_C - og vinklen ϕ stiger.



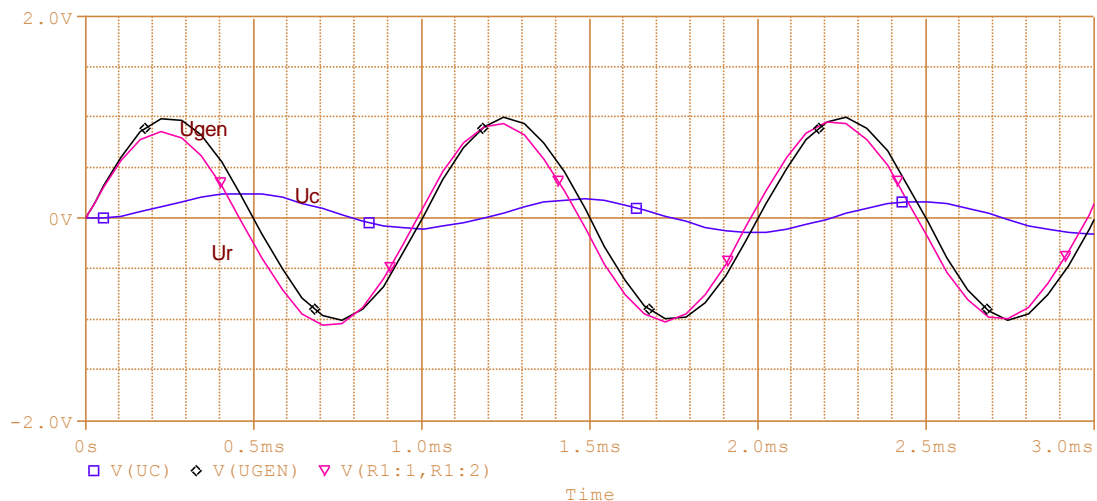
Den frekvens, hvor X_c er faldet til samme værdi som modstanden, kaldes overgangsfrekvensen, eller knækfrekvensen, eller f_0 .

Ved overgangsfrekvensen eller knækfrekvensen f_0 er kondensatorens modstand faldet til samme værdi som modstandens værdi, og U_c og U_R er lige store, og vinklen vil være 45 grader.

U_{out} ses i vektordiagrammet at være U_{gen} gange $\cos(45)$, som også er $\frac{U_{Gen}}{\sqrt{2}}$, eller U_{gen} gange 0,707.

$$\tan(\varphi) = \frac{\text{Modstående}}{\text{Hosliggende}} = \frac{U_R}{U_C} = \frac{R}{X_C}$$

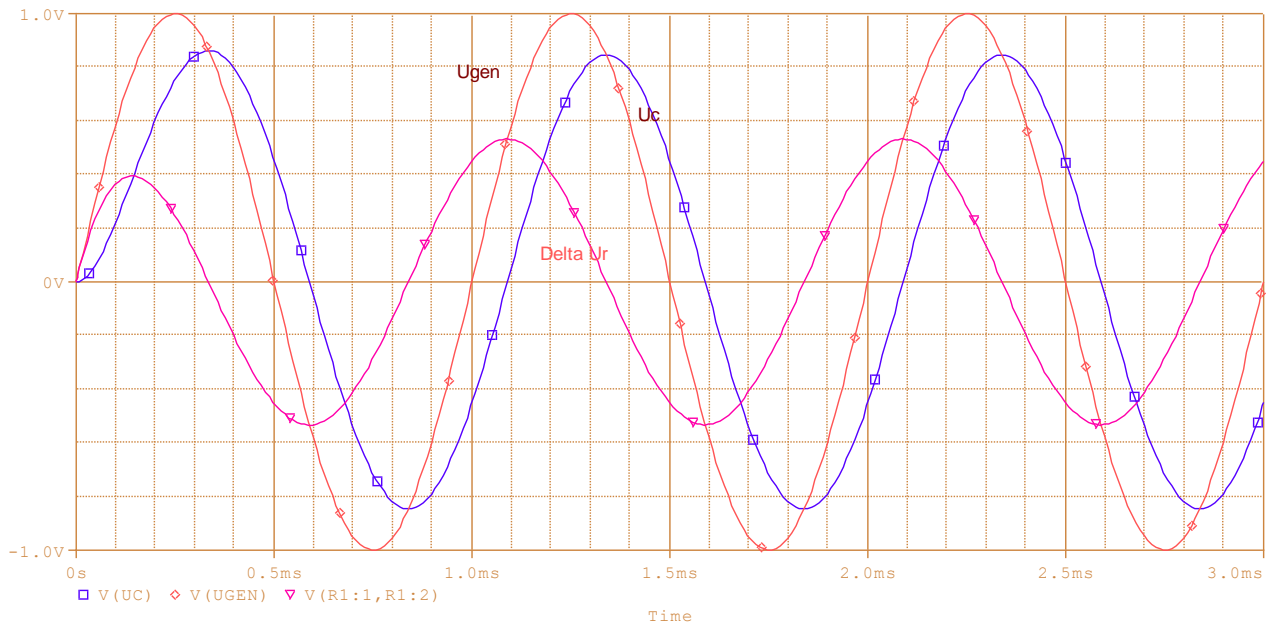
$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{U_R}{U_C}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$$



RC-led, $R = 10 \text{ KOhm}$, $C = 100 \text{ nF}$, Det ses, at $U_c + U_r = U_{gen}$.

Ved valgte komponenter og frekvens er ΔU_{X_c} lav, som det ses. ΔU_R er næsten lig U_{gen} .

Med andre komponentværdier findes følgende:



RC-led, $R = 10 \text{ KO}\Omega$, $C = 10 \text{ nF}$. Det ses, at summen af U_c og U_r er lig U_{gen} . Kondensatoren er nu kun 10 nF , dvs. at en større del af spændingen nu ligger over kondensatoren.

Ved hjælp af to grafer, kaldet et Bodeplot, får man et fint billede af situationen ved forskellige frekvenser. Den ene graf er for systemets forstærkning, dvs. U_{out} / U_{in} . Forstærkningen er ganske vist under 1, dvs. det er en dæmpning, men kan godt opfattes som en forstærkning.

Grafen har logaritmisk X-akse, og forstærkningen afbildes i dB (decibel). Forstærkningen i dB findes som
$$dB = 20 \cdot \log_{10} \frac{U_{out}}{U_{in}}$$

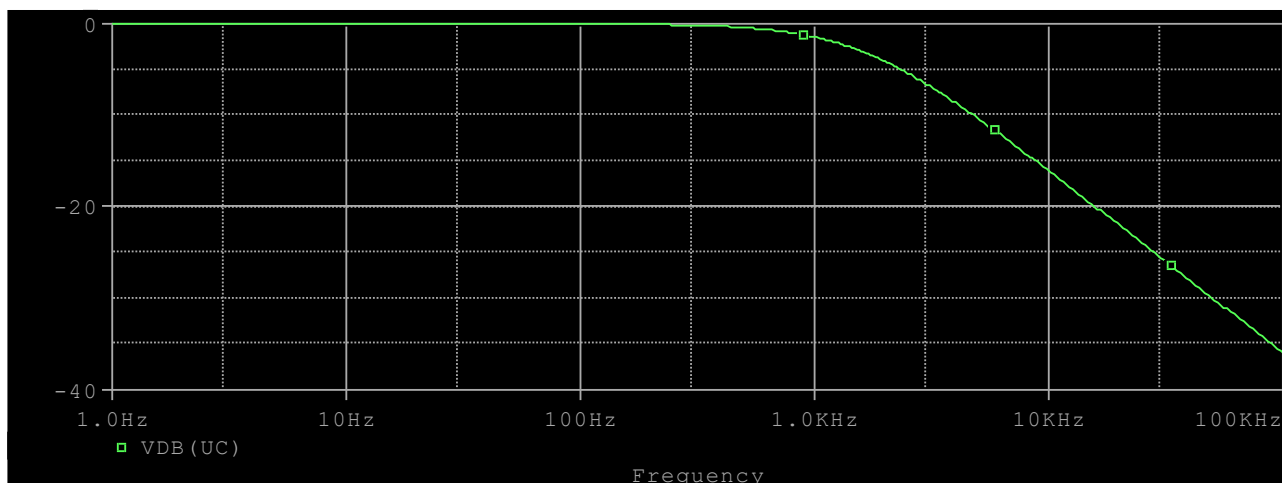
Den anden graf viser fasedrejningen, igen med frekvensen afbildet logaritmisk ud ad X-aksen.

Sammenlignes grafen ovenover med Bodeplottet nedenfor, ses, at ved f_0 , der hvor vi har knækket, er forstærkningen ifølge ovenstående faldet til 0,707 gange U_{gen} selv om det ikke tegnes. Der tegnes med rette linjer.

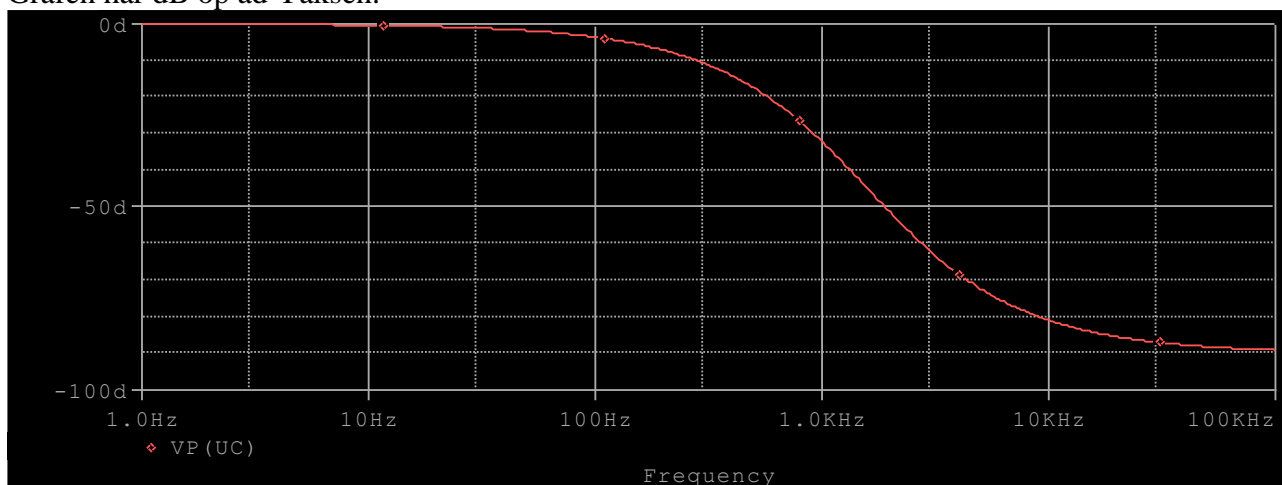
0,707 omregnet til dB er -3,01 eller blot -3 dB. I knækket siges også, at man har nået 3 dB grænsen.

$$dB = 20 \cdot \log_{10}(A') = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{OUT}}{U_{Gen}} \right)$$

Følgende graf er et Bode plot af er RC-led:



Grafen har dB op ad Yaksen.



Og fasedrejningen!

Bodeplot og fasedrejning fra simuleringsprogrammet ORCAD.

Øverst V_{DB} , (U_{dB}) er et Bodeplot af forstærkningen, og nederst VP , (U_{Phase}) er udgangsspændingens fasedrejning i forhold til indgangsspændingen.

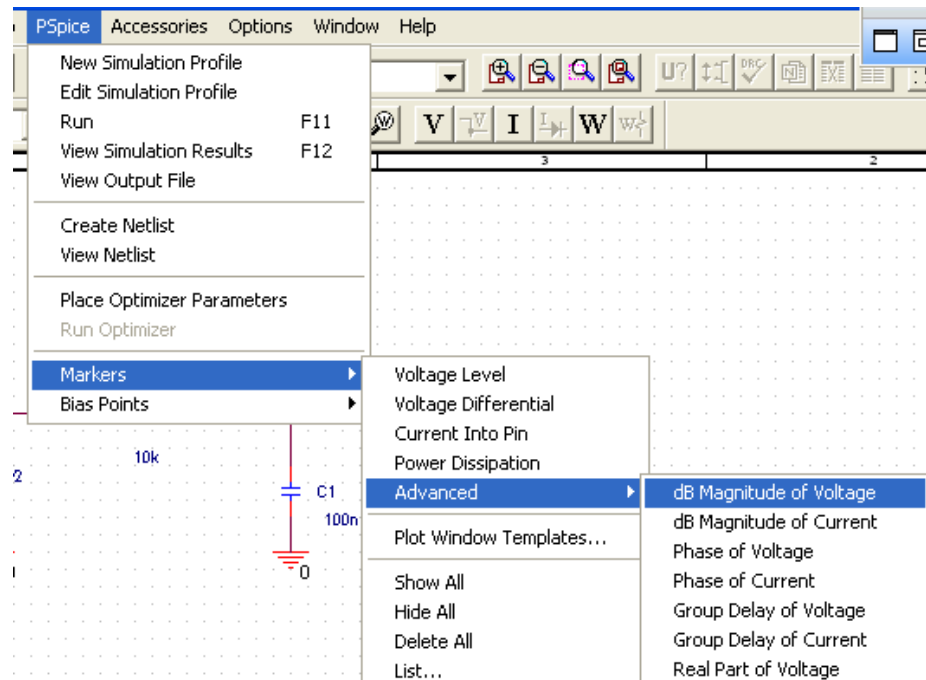


I ORCAD findes specielle markeres til at fremstille et Bodeplot.

Generatorens AC-spænding skal default være 1 V.

Er den en anden værdi, må man selv vælge "Trace, Add Trace" og skrive en ligning for grafen.

$$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{out}}{U_{in}} \right)$$





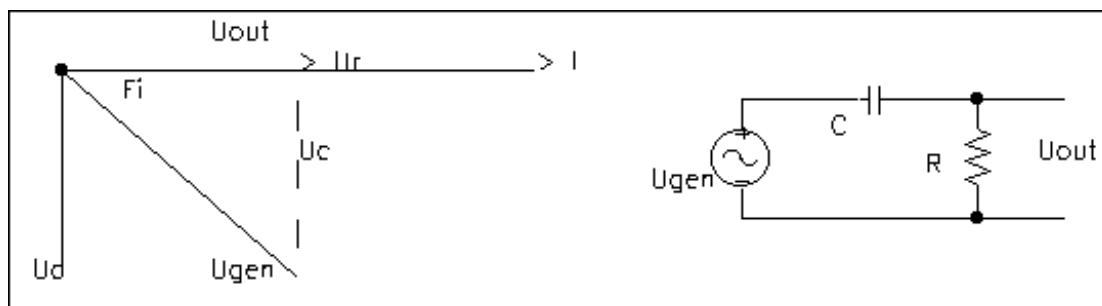
Højpas-led (CR-led)

I et højpasled er strømmen I også ens. Det er jo stadig en serieforbindelse.

U_R er i fase med strømmen, og I_C 90 grader foran U_C .

U_{gen} , som er den geometriske sum af delta U_R og delta U_C , er bagud i forhold til strømmen, dvs. strømmen er foran U_{gen} .

U_{out} tages nu over U_R og er således foran generatorspændingen. ϕ_i er altså positiv og er vinklen fra U_{gen} til U_R .



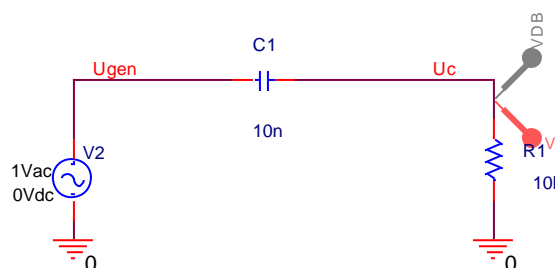
Vektordiagram for et CR-led. Uout er foran generatorspændingen.

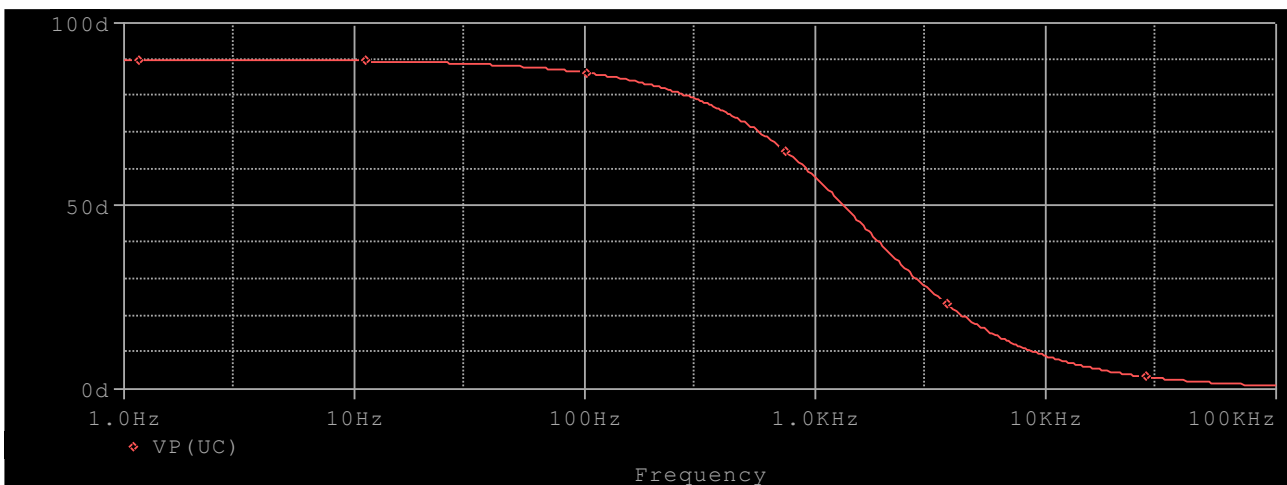
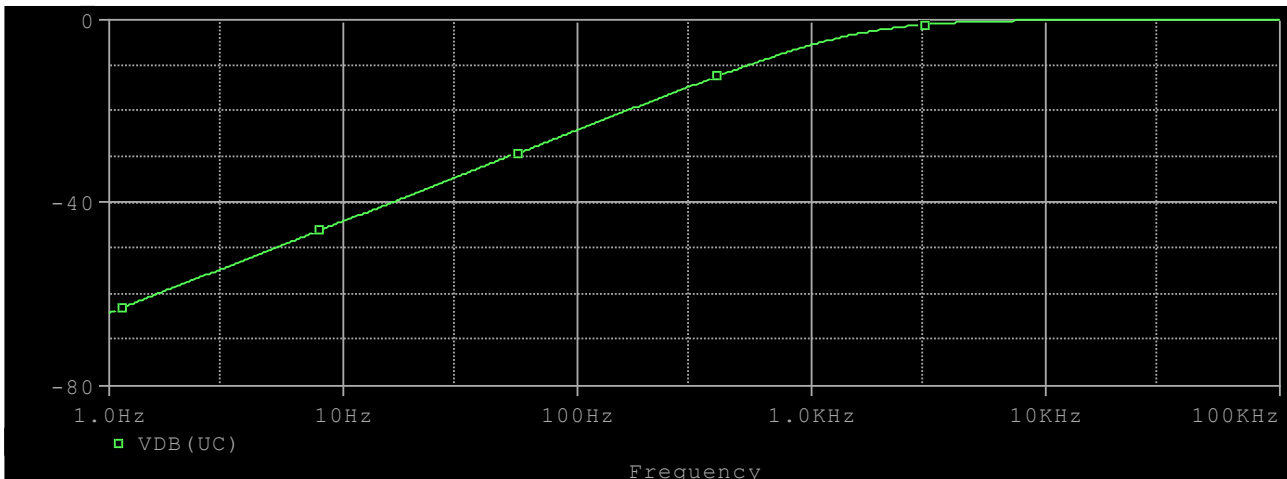
Det ses af vektordiagrammet at jo højere frekvens, jo mindre X_C og dermed U_C , jo mindre vinkel ϕ_i , og jo større bliver U_R .

Ved meget lave frekvenser er X_C meget stor i forhold til R , heraf er U_C også stor i forhold til U_R , og fasedrejningen er næsten 90 grader. U_{gen} er jo konstant, og deles vektorielt af X_C og R .

Ved høje frekvenser er kondensatoren næsten kortsluttet, derfor er U_C lille i forhold til U_R , og fasedrejningen er næsten 0 grader.

Ved lave frekvenser er X_C stor, og der kommer næsten ikke noget ud på U_{out} . Ved meget høje frekvenser er kondensatoren næsten kortsluttet, og derfor er U_{out} næsten den samme som U_{gen} . Høje frekvenser passerer altså næsten uhindret gennem kredsløbet, og deraf navnet "Højpasled".





Bodeplot af et højpasled og tilhørende fasedrejning vist med simuleringssprogrammet ORCAD.

VDB er Bodeplot af forstærkningen i dB, som selvfølgelig er under 0 dB.

0 dB er lig 1 ganges forstærkning. VP er udgangsspændingens fasedrejning.

Spole !

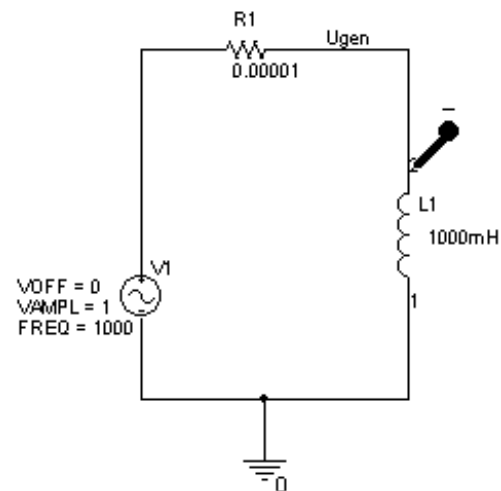
Forbindes en ideel sinus spændingskilde direkte til en spole, vil spolens spænding til enhver tid være den samme som generatorens.



Kredsløbet kunne se således ud. Der skal i simuleringen med ORCAD forbindes en modstand i serie, ellers vil strømmen blive uendelig stor, idet der ikke er modstand i en ideel spole.

Det er der selvfølgelig i virkeligheden, idet spolen er viklet af kobbertråd med lidt modstand.

Er spolens ohmske resistans 0 Ohm, må strømmens størrelse stige, blot generatorens spænding er over 0 Volt, og den må blive ved med at vokse, indtil Ugen på et tidspunkt falder til 0 Volt.



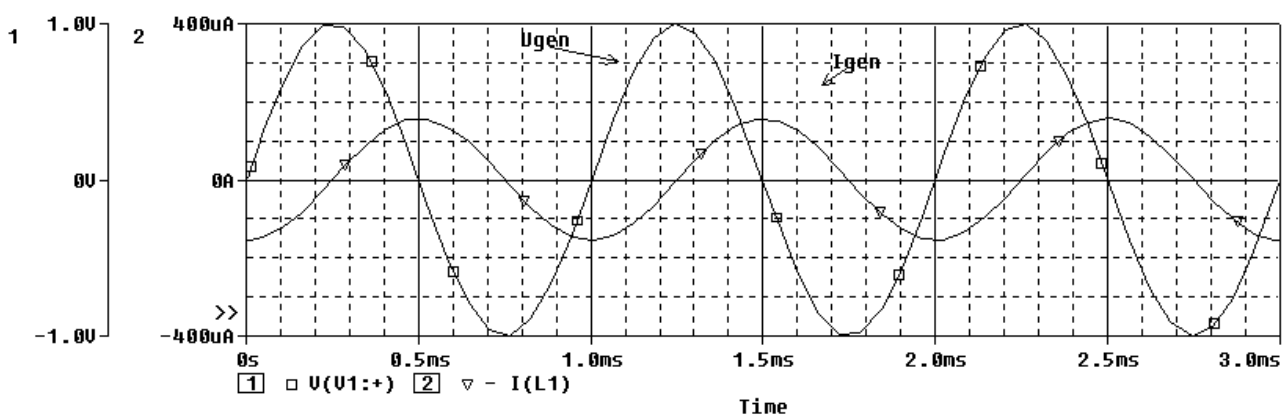
Strømmen vil stige hurtigere, hvis Ugen er stor, og mindre, hvis Ugen er lille.

Dvs. at hvis Ugen er i top, vil stigningen i strømmen være størst, og $\frac{di}{dt}$ er størst.

Falder Ugen til 0 Volt, bliver strømmen hverken større eller mindre. Hældningen på strømgraphen er 0, dvs. vandret og $\frac{di}{dt} = 0$.. Dette er fordi $R_{spole} = 0$, og der er følgelig ikke noget til at bremse strømmen.

Først når generatorens spænding er under 0 Volt, vil I_L blive bremset op, og strømmen i spolen begynder at blive mindre.

Dvs. at strømmens største positive værdi må være i det øjeblik, spændingen krydser 0 Volt på vej mod negativ.



Tegnes en graf over U_L og I_L , vil U_L krydse 0 for nedadgående der hvor I_L er størst. Dvs. 90 grader før I_L .



Strømmen i spolen kan ikke ændres momentant. Dette ville kræve en uendelig høj spænding.

Energien opmagasineret i en spole er $W_{Spole} = \frac{1}{2} LI^2$. Altså kunne strømmen i spolen ændres momentant, ville også dens energi-indhold kunne ændres momentant!

En spoles godhed Q

En spoles godhed, Q for Quality, er forholdet mellem den modstand, der skyldes spolens reaktion på ændring i strømmen, og den modstand, der er i den tråd, spolen er viklet af. Jo mindre modstand i vindingerne, jo bedre Q.

$$Q = \frac{Z_L}{R_{Serie}} = \frac{\omega L}{R_S} = \frac{2\pi f L}{R_S}$$

Q er altså afhængig af frekvensen.

Er seriemodstanden meget lille, er Q stor.

Parallelforbindelse af en kondensator og modstand set vektorielt.

Tegnes vektorer for en parallelforbindelse findes diagrammet til højre.

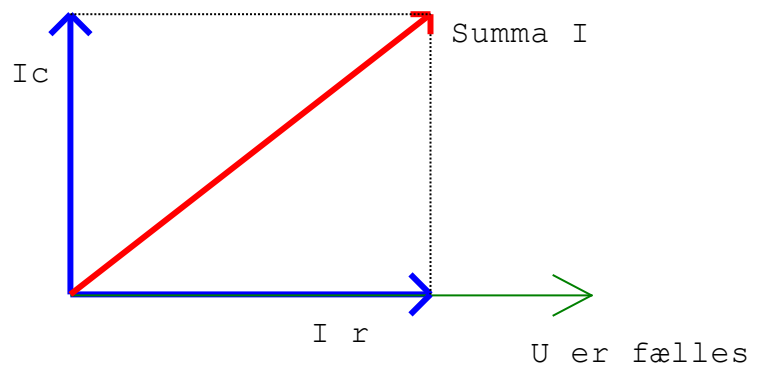
U er fælles, og afsættes mod højre.
IR er i fase med U, afsættes mod højre.

IC er 90 grader foran UC, derfor opad.

ΣI ved den frekvens, hvor IC og

IR er lige store, er steget til $\frac{I_R}{\cos(45)} = \frac{I_R}{0,707}$

For parallelforbindelsen fås: $R_{Parallel} = \frac{U}{\Sigma I} = \frac{U}{\frac{I_R}{0,707}} = \frac{U \cdot 0,707}{I_R}$





Det ses altså, at parallelforbindelsen er faldet til 0,707 gange modstandens værdi ved den frekvens, hvor størrelsen af $|X_C| = |R|$.

Parallelforbindelse udregnet med kompleks regning:

I det følgende gennemgås udregning af parallelforbindelse med kompleks regning.

I en parallelforbindelse haves, at $\sum R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

Altså – hvis den ene er en kondensator: $\frac{R \cdot (-jX_C)}{R - jX_C}$ Dette bliver: $\frac{-jX_C R}{R - jX_C}$

Det er ikke smart at have et komplekst tal i nævneren, derfor ganges i tæller og nævner med den komplekst konjugerede.:

$$\frac{-jX_C R \cdot (R + jX_C)}{(R - jX_C) \cdot (R + jX_C)} \Rightarrow$$

$$\frac{-jX_C R \cdot (R + jX_C)}{R^2 + X_C^2} \Rightarrow$$

I kompleks regning er det sådan, at $j \cdot j$ er lig -1 !! Derfor fås:

$$\frac{X_C^2 \cdot R - jX_C R^2}{R^2 + X_C^2} \Rightarrow$$

Dette reduceres til

$$\frac{X_C R (X_C - jR)}{R^2 + X_C^2}$$

Der undersøges nu for den frekvens, der gør X_C til samme værdi som R , altså den frekvens, hvor modstanden i kondensatoren er faldet til samme værdi som R .

Dvs.: $X_C = R$

Dette indsættes i ligningen ovenfor: Og der fås:

$$\frac{R^2}{R^2 + R^2} \cdot (R - jR) \Rightarrow \varphi = \text{tg}^{-1} - \left(\frac{R}{R} \right) \varphi = -45 \text{ grader}$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{R^2 + R^2}$$

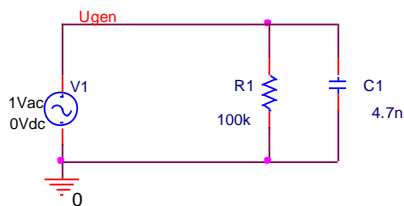


$$\frac{1}{2} \sqrt{2 \cdot R^2}$$

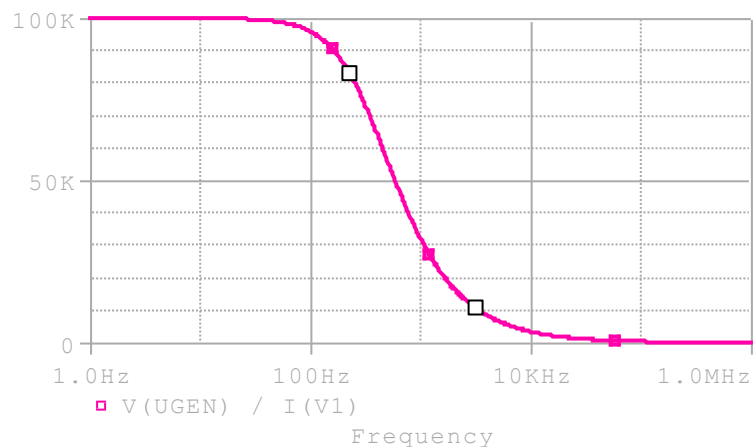
$$\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot R = 0,707 \cdot R$$

Altså, i en parallelforbindelse af en modstand og en kondensator findes ved den frekvens, hvor $X_c = R$ at samlede parallel-modstand er faldet til 0,707 gange oprindelig modstand.

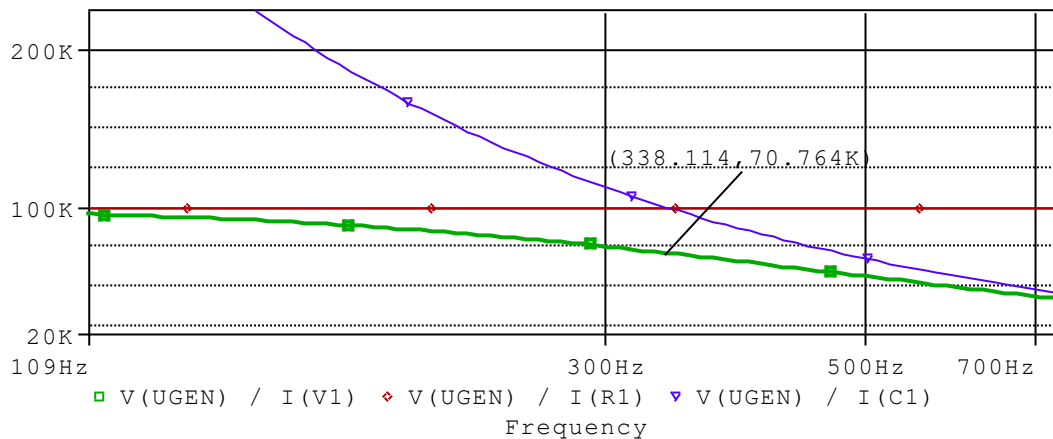
Udregningen verificeres vha. simulering med ORCAD:



Til højre ses grafen for parallelmodstanden. Grafen er tegnet som $V(Ugen)/I(V1)$



Undersøges R , X_c og $R//X_c$ hver for sig, fås følgende grafer:



Den blå graf er X_c , Den brune er R , der jo ikke ændrer sig over frekvensen. Og den grønne er $R//C1$.

Det ses, at ved den frekvens, hvor X_c og R skærer hinanden, dvs. er ens, er parallelforbindelsens værdi 70,7 kOhm.

