

Veeti Hartikainen

# REAKTIIVISET KOMPONENTIT

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta (ITC)  
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä  
Heinäkuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Veeti Hartikainen: Reaktiiviset komponentit  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma, sähkötekniikka  
Kesäkuu 2023

---

Tämän kandidaatintyön tarkoitus on selittää reaktiivisiin komponentteihin liittyvää teoriaa, esittää esimerkkejä niiden käyttötarkoituksista ja esiintyvyydestä erilaisissa elektronisissa laitteissa sekä antaa ymmärrystä Multisim-ohjelman sekä myDAQ-laitteen toiminnoista. Nämä työkalut ovat hyödyllisiä sähkötekniisten laitteiden suunnittelussa ja rakentamisessa.

Keskeisessä roolissa tässä kandidaatintyössä esiintyy kaksi esimerkkitehtävää, joista molemmat koostuvat kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa annetun virtapiirin toimintaa tarkastellaan Multisim-ohjelmalla, jolla virtapiirin halutut ominaisuudet saadaan simuloitua ja mitattua. Toisessa osassa sama virtapiiri rakennetaan fyysiselle levyille oikeita komponentteja apuna käyttäen. Rakennettua virtapiiriä saadaan sitten mitattua myDAQ-laitteen eri ominaisuuksia apuna käyttäen.

Tässä työssä käsiteltävien teorian ja esimerkkien käyttötarkoitukset on koostettu monista eri lähteistä, kuten eri verkkosivuilta ja tieteellisistä oppikirjoista. Tarkasteltu teoria on tiivistetty ja selitetty selkeästi, jotta teksti vaatisi mahdollisimman vähän alkutietoa ja sopii monille eri kandidaatintyön aiheesta kiinnostuneille henkilöille.

Esimerkkitehtävät on suunniteltu työn tekstin pohjalta, syventämään ja selventämään joitakin tekstissä esitettyjä asioita. Tehtävien suunnittelussa on myös pidetty mielessä niiden sopivuus aloitteleville Multisim-ohjelman ja myDAQ-laitteen käyttäjille. Kaikki näiden tehtävissä käytettävät oleelliset toiminnot on selitetty niin, että lukija ymmärtäisi, mikä toiminnon tarkoitus tehtävässä on ja miten toimintoa voisi käyttää muissakin samantyyppisissä tehtävissä.

Avainsanat: reaktiiviset komponentit, reaktanssi, käämit, kondensaattorit, myDAQ, Multisim

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. REAKTANSSI .....	2
3. KONDENSAATTORIT JA SÄHKÖKENTÄT .....	4
3.1 Kondensaattorin rakenne .....	4
3.2 Kondensaattorien teoria .....	5
3.3 Kondensaattorien sähkökenttä .....	8
3.4 Kondensaattorien käyttötapauksia .....	9
3.5 Esimerkkitehtävä kondensaattoreista .....	11
4. KÄÄMIT JA MAGNEETTIKENTÄT .....	13
4.1 Käämin rakenne .....	13
4.2 Käämin teoria .....	14
4.3 Käämin magneettikenttä .....	16
4.4 Käämien käyttötapauksia .....	19
4.5 Esimerkkitehtävä käämeistä .....	20
5. YHTEENVETO .....	21
LÄHTEET .....	22
LIITE 1A .....	24
LIITE 1B .....	25
LIITE 2A .....	35
LIITE 2B .....	36

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Vaihtosähkö (engl. Alternating current)
DC	Tasasähkö (engl. Direct current)
EDLC	Sähköinen kaksikerroksinen kondensaattori (engl. Electric double layer capacitor)

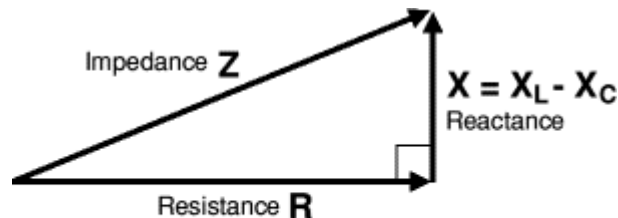
# 1. JOHDANTO

Kaikki komponentit voidaan jaotella passiivisiin ja aktiivisiin komponentteihin. Näiden erona on se, että passiiviset komponentit vaikuttavat piirin toimintaan muuntamalla saamansa energian johonkin toiseen muotoon, esimerkiksi vastus muuttaa energian lämmöksi, kondensaattori sähkökentäksi ja käämi magneettikentäksi. Aktiiviset komponentit puolestaan generoivat uusia signaaleja, kuten paristot, operaatiovahvistimet tai transistorit. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan passiivisten komponenttien alakategoriaa reaktiivisia komponentteja. Reaktiivisia komponentteja ovat käämit ja kondensaattorit. Reaktiivisille komponenteille ominaista on niiden kyky varastoida energiaa toisin kuin resistiiviset komponentit, jotka purkavat energiaa lämpönä. Erittäin yleinen käyttökohte reaktiivisille komponenteille on erilaiset taajuussuotimet reaktanssin taajuusriippuvuuden takia, mutta niille löytyy monia muitakin käyttökohteita niiden aiheuttamien sähkö- tai magneettikenttien ansiosta. Työn tarkoituksena on myös muodostaa kaksi käytännön tehtävää, jotka voi itse tehdä. Tehtävien tarkoituksina on syventää teoriaosioissa opittua asiaa. Tehtävien teossa käytetään hyväksi Multisim-ohjelmaa, sekä myDAQ-laitetta, jotka ovat hyviä työkaluja sähköisten piirien suunnittelemiseen.

Seuraavassa luvussa käsitellään reaktanssia ja sen eroavaisuutta resistanssiin. Sen jälkeisessä luvussa kolme käsitellään kondensaattoria. Ensiksi luvussa kolme esitellään kondensaattorin rakenne, sitten käydään läpi kondensaattorin toimintaan liittyvää teoriaa sekä kondensaattorille ominaisia kaavoja. Tämän jälkeen esitellään sähkökentät ja miten ne liittyvät kondensaattorin toimintaan, jonka jälkeen käydään läpi muutamia käyttötarkoituksia kondensaattoreille. Viimeisessä luvun kolme alakappaleessa on esitelty kondensaattoreihin liittyvän esimerkkitehtävän tarkoitus sekä opastettu hieman, miten myDAQ:iä ja Multisimia käytetään tehtävän ratkaisemiseksi. Luvun neljä rakenne on sama kuin luvun kolme, mutta käämeille ja sähkökenttää käsittelevän kappaleen sijaan on luvussa neljä käämin magneettikenttää käsittelevä kappale. Luku viisi on yhteenveto, jonka jälkeen löytyvät työssä käytetyt lähteet. Lähteiden jälkeen ovat liitteet, mistä löytyvät esimerkkitehtävät sekä niiden ratkaisut.

## 2. REAKTANSSI

Reaktanssi on sähkötekniikan yksikkö, joka kuvaa piirissä kulkevan virran vastustusta kapasitanssin tai induktanssin toimesta [1]. Toisin kuin resistanssi, reaktanssi vaatii muuttuvan jännitteen tai virran. Tämän voi saavuttaa esimerkiksi vaihtovirralla tai katkaisimella, jolla virran voi päästää läpi tai katkaista piiristä [2]. Reaktanssi myös eroaa resistanssista siten, että kun vaihtuva virta kulkee reaktiivisen komponentin läpi, energia varastoituu komponenttiin ja se purkautuu sähkö- tai magneettikentän muodossa riippuen siitä, onko komponentti induktiivinen vai kapasitiivinen [1]. Resistanssi aiheuttaa energian purkautumisen lämpönä. Reaktanssi ei pelkästään muuta virran ja jännitteen suhdetta, vaan se myös vaikuttaa virran ja jännitteen väliseen vaihe eroon. Tästä syystä reaktanssi on kompleksiluku.



$$\text{Impedance, } Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

**Kuva 1.** Impedanssin, reaktanssin ja resistanssin riippuvuus [3]

Impedanssi on piirin virran kokonaisvastustus. Kuten kuvasta 1 näkyy, reaktanssi on impedanssin imaginääriosia ja resistanssi on impedanssin reaaliosta. Kuvassa myös näkyy reaktanssin kaava [3]:

$$X = X_L - X_C \quad (1)$$

Missä  $X_L$  on induktiivinen reaktanssi ja  $X_C$  on kapasitiivinen reaktanssi. Induktiivinen reaktanssi ja kapasitiivinen reaktanssi voidaan laskea ohmin lakia muistuttavista kaavoista 2 ja 3:

$$X_L = \frac{U_{max}}{I_{max}} = \frac{u_{eff}}{i_{eff}} \quad (2)$$

$$X_C = \frac{U_{max}}{I_{max}} = \frac{u_{eff}}{i_{eff}} \quad (3)$$

Kaavat eivät käytännössä eroa toisistaan, teoriassa ne eroavat siten, että induktiivisessa reaktanssissa jännite on  $90^\circ$  virtaa edellä ja kapasitiivisessa reaktanssissa jännite on  $90^\circ$  virtaa jäljessä. Kaavat eroavat ohmin laista siten, että näissä yleensä verrataan virran ja jännitteen maksimi- tai tehollisarvoja, virran ja jännitteen välisen vaihe-eron takia, mutta muutkin arvot käyvät, kunhan pidetään huolta, että virran ja jännitteen arvot on otettu sinifunktion samasta kohtaa, koska tärkeää on arvojen suhde. Jos virran ja jännitteen

arvot mitataan samaan aikaan, tulee väärä arvo vaihe-eron takia. Induktiivisen reaktanssin voi myös laskea seuraavasta kaavasta 4;

$$X_L = 2\pi fL \quad (4)$$

missä  $f$  on vaihtovirran taajuus ja  $L$  on käämin induktanssi. Kapasitiivinen reaktanssi lasketaan saman kaltaisesta kaavasta 5;

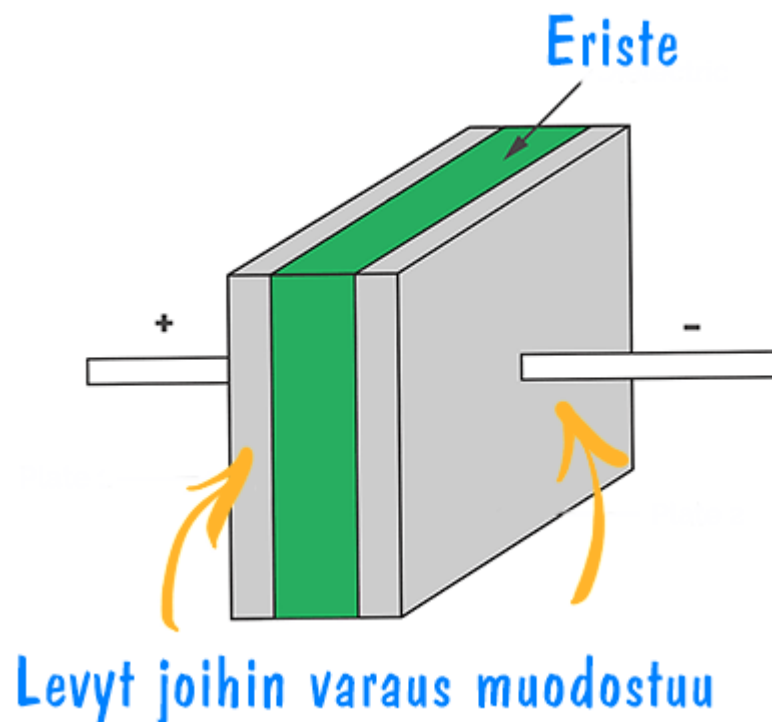
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (5)$$

missä  $C$  on kondensaattorin kapasitanssi. [3]

## 3. KONDENSAATTORIT JA SÄHKÖKENTÄT

### 3.1 Kondensaattorin rakenne

Kondensaattorit koostuvat yksinkertaisimmillaan kahdesta johtavasta pinnasta, joita erottaa eristemateriaali [4, p. 70].



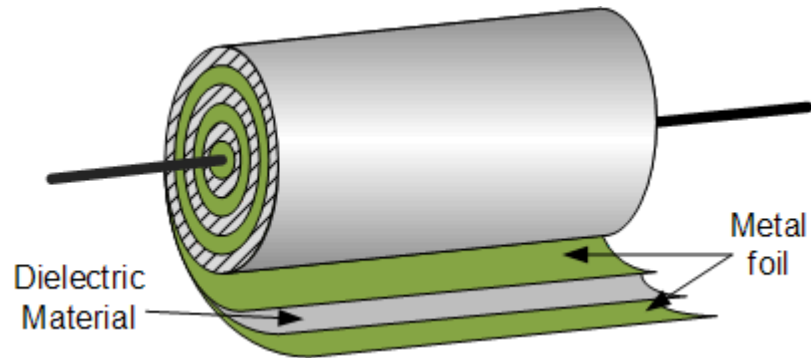
**Kuva 2.** Rinnakkaislevykondensaattori [5]

Kuvassa 2 on yksinkertainen versio kondensaattorista, jota kutsutaan myös rinnakkaislevykondensaattoriksi. Kaikille kondensaattoreille pätee alla oleva kaava, jota on helppo käyttää tämän kaltaisille kondensaattoreille:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (6)$$

missä  $C$  on kondensaattorin kapasitanssi,  $A$  levyjen vastakkaisten osioiden jaettu pinta-ala,  $d$  levyjen välinen etäisyys,  $\epsilon_0$  tyhjiön permittiivisyys ja  $\epsilon_r$  eristemateriaalin suhteellinen permittiivisyys. Kaavasta voi myös päätellä kondensaattorien sarja- ja rinnankytkentöjen laskemisen. Kun kaksi kondensaattoria laitetaan rinnankytkentään, kondensaattorien yhteinen pinta-ala kasvaa, jolloin kapasitanssi lisääntyy, ja kun ne laitetaan sarjaan, kondensaattorien levyjen yhteinen etäisyys kasvaa, jolloin kapasitanssi laskee. Tällä tavoin laskeminen kannattaa vain silloin, kun muut parametrit ovat yhtä suuret. Sarja- ja rinnankytkentöjen kaavat löytyvät luvusta 3.2.





**Kuva 3.** Sylinterikondensaattori [6]

Sylinterikondensaattorin voi tehdä kahdella tapaa: joko sijoittamalla pienempi sylinteri isomman sylinterin sisälle ja erottamalla ne taas eristeellä tai asettamalla kaksi folioarkkia päällekkäin ja erottelemalla ne paperiarkilla tai muulla sähköisesti eristävällä materiaalilla. Tämän jälkeen kaikki arkit rullataan sylinteriksi ja rulla asetetaan putkilon sisään, joka voi olla esimerkiksi metallia tai paperia [6] [7]. Ensimmäiselle mainituista tavoista löytyy kapasitanssin kaavaksi kaavan 7 mukainen lauseke:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (7)$$

[7]. Missä L on sylinterin pituus, a on sisemmän sylinterin säde ja b on koko sylinterin säde. [6]

Kondensaattoreilla voi siis olla erilaisia rakenteita, mutta perusidea on sama. Positiiviseksi varautuva levy ja negatiiviseksi varautuva levy erotetaan toisistaan eristeellä, joka estää sähkövirran kulun ja saa aikaan sähkökentän syntymisen.

### 3.2 Kondensaattorien teoria

Kun varautumaton kondensaattori yhdistetään tasajännitelähteeseen, jännitelähteen positiivinen napa vetää puoleensa elektroneja kondensaattorin levyltä, joka on yhteydessä positiiviseen napaan ja siirtää saman verran elektroneja kondensaattorin toiselle levyille. Koska kondensaattorien levyjen välissä on eriste, elektronit eivät siirry suoraan levyltä levyille eristeen läpi, vaan kytkentään syntyy virta, joka saa aikaan kaikki piirissä olevat elektronit kiertämään piiriä. Kun elektronit saapuvat negatiivisesti varautuneelle levyille, ne eivät pääse kiertämään enempää, sillä eriste estää elektronien kulun. Kun levyjen välinen jännite on yhtä suuri kuin lähdejännite, eivät kondensaattorin levyt enää lataudu, sillä kondensaattorin jännite kumoaa jännitelähteen jännitteen. [8]

Levyt eivät lataudu heti, vaan levyjen latautumisaika riippuu piirin ominaisuuksista kaavan 8 mukaan. [9]

$$V_C = V_S(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (8)$$

Kaava soveltuu RC-piirille, joka koostuu sarjakytkestä jännitelähteestä, kondensaattorista ja vastuksesta. Kaavassa  $t$  on aika,  $R$  on vastuksen resistanssi,  $C$  on kondensaattorin kapasitanssi,  $V_s$  on jännitelähteen jännite ja  $V_c$  on kondensaattorin jännite. Kaavasta huomataan, että mitä isompi resistanssi ja mitä suurempi kapasitanssi on, sitä kauemmin kestää kondensaattorilla varautua. Jos piirissä ei siis olisi yhtään resistanssia, kondensaattori latautuisi välittömästi täyteen, mutta tämä ei käytännössä ole mahdollista, sillä jännitelähteellä on sisäresistanssi ja johdoilla on omat pienet resistanssit. Kun aikaa on kulunut tarpeeksi, kondensaattori siis toimii kuten avoin piiri, kun se on kytketty tasajännitelähteeseen. Tämän takia kondensaattoria ei yleensä käytetä piireissä, joissa on pelkästään tasajännitettä, vaan kondensaattorien parhaat ominaisuudet käyvät ilmi, kun niiden läpi oleva jännite muuttuu. Tämä muutos voi ilmetä virran katkaisuna ja virran kytkeytymisenä, mutta yleisimmin tämä muuttuva jännite on vaihtojännitteen muodossa. Kondensaattorille on johdettu alla oleva kaava. [4, p. 77]

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

Kaavan 9 mukaan kondensaattorin läpi kulkeva virta riippuu kondensaattorin kapasitanssista ja jännitteen muutoksesta aikaa kohden. Tästä voi päätellä saman johtopäätöksen kuin kaavasta 8, että kun kondensaattori on kytkettynä tasajännitelähteeseen, kondensaattorin läpi ei kulje virtaa, koska jännite ei muutu. Mutta silloin kun kondensaattorin yli oleva jännite on sinimuotoista vaihtojännitettä, kondensaattorin yli kulkee kosinimuotoinen, tai  $90^\circ$  jännitettä jäljessä oleva vaihtovirta. Tämä voidaan todistaa kaavan 9 avulla:

$$I = C \cdot \frac{d}{dt} V(\sin(\omega t + \beta)) = \omega C \cdot V \cos(\omega t + \beta) = \omega C \cdot V \sin(\omega t + \beta + 90^\circ) \quad (10)$$

Kaavassa 10 esitetään äsken kuvailtu asia.  $\beta$  on kaavassa vaihekulma. Kondensaattorin varaukselle on johdettu kaava 11; [4, p. 80]

$$Q = CV \quad (11)$$

mikä auttaa avaamaan viime kappaleessa aloitettua rinnan- ja sarjakytkeiden vaikutusta kondensaattoreihin. Jos kaksi kondensaattoria kytketään sarja, on niiden yli oleva jännite.

$$V = V_1 + V_2 \quad (12)$$

Kahdella sarjakytkeillä kondensaattorin yhdistetyillä levyillä pitää olla sama mutta vastakkaismerkkinen varaus [4, p. 76]. Sekä molemmilla kondensaattorien levyillä pitää olla sama mutta vastakkaismerkkinen varaus. Kaikilla sarjakytkeillä kondensaattoreilla pitää olla sama varaus. Tällä tiedolla kaavat 11 ja 12 voidaan yhdistää muotoon.

$$V = V_1 + V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \frac{Q}{C_{sum}} \quad (13)$$

Huomataan, että sarjakytkettyjen kondensaattorien yhteiskapasitanssin lausekkeeksi saadaan summalauseke:

$$\frac{1}{C_{sum}} = \sum_i^N \frac{1}{C_i} \quad (13)$$

Kaavassa 13  $C_{sum}$  on sarjakytkettyjen kondensaattoreiden yhteiskapasitanssi ja N on sarjakytkettyjen kondensaattorien määrä. [10]

Rinnankytkettyjen kondensaattorien yhteiskapasitanssi lasketaan samalla kaavalla kuin sarjakytkettyjen kondensaattorien. Tällä kertaa jännite on sama kaikkien kondensaattorien yli toisin kuin varaus. Joten kaava on alla olevan esimerkin mukainen:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1V + C_2V = (C_1 + C_2)V = C_{sum}V \quad (14)$$

Kaavasta 14 voidaan johtaa rinnankytkettyjen kapasitanssien summa lausekkeeksi kaava 15:

$$C_{sum} = \sum_i^N C_i \quad (15)$$

[11].

Kuten reaktanssikappaleessa on todettu, kondensaattorit toimivat toisin vastuksista. Kun vastukset kuluttavat energiaa lämmön muodossa, kondensaattoreilla on kyky varastoida energiaa. Kondensaattoriin varastoidulle energialle on johdettu alla olevat kaavat 16 ja 17:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (16)$$

$$E = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (17)$$

Kaavoissa E on kondensaattoriin varastoitunut energia, C on kondensaattorin kapasitanssi, Q on kondensaattorin varaus ja V on kondensaattorin yli oleva jännite. Kondensaattorin levyjen välinen varaus aiheuttaa sähkökentän, joka vastustaa varausten liikettä, jolloin kun varaukset siirretään levyltä toiselle, niille kerääntyy potentiaalienergiaa. Laskuista saadaan selville, miten paljon energiaa varaukset tarvitsevat, jotta kondensaattori saadaan ladattua täyteen. [4, p. 79]

### 3.3 Kondensaattorien sähkökenttä

Varaukset aiheuttavat ympärilleen sähkökentän, mikä aiheuttaa sen, että samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan ja erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa. Koska kondensaattorin levyt varautuvat, syntyy levyjen väliin sähkökenttä, jonka suunta on positiivisesti varautuneelta levyiltä negatiivisesti varautuneelle levyille. Levyillä olevat varaukset vetävät muodostamansa sähkökentän takia toisiaan puoleensa, jotta varausjakauma tasaantuisi. Piirin jännitteen ja kondensaattorin eristeen takia ne eivät pääse kuitenkaan tätä tekemään. Levyjen väliin muodostuneen sähkökentän voimakkuuden yhtälö on alla olevan kaavan 18 mukainen:

$$E = \frac{V}{d} \quad (18)$$

Tässä kaavassa E kuvaa sähkökentän voimakkuutta, ja V on jännite d:n pituisen matkan yli. Sähkökentän voimakkuus kertoo, kuinka suuri voima yksittäiseen varaukseen kohdistuu alla olevan kaavan 19 mukaan:

$$E = \frac{F}{q} \quad (19)$$

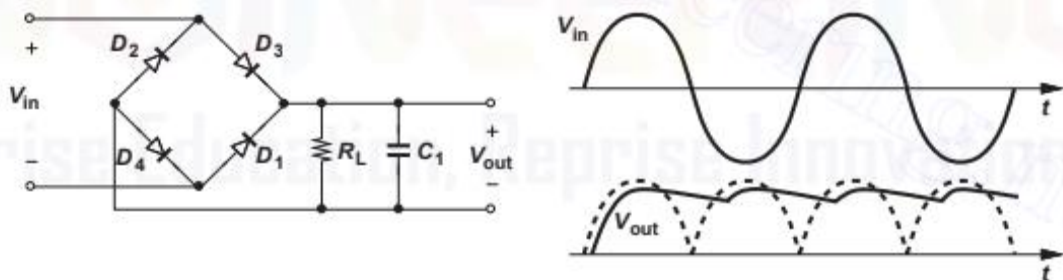
[4, pp. 73-74]

Kaikilla eristeillä on maksimi sähkökentän voimakkuus, jonka eriste kestää hajoamatta. Eriste voi hajota, jos sen yli on tarpeeksi iso jännite, joka saa elektronit irtoamaan aineen sidoksista. Jos eriste hajoaa, eristeen sisäiset elektronit pääsevät virtaamaan vapaasti eikä eriste enää toimi eristeenä. [4, pp. 73-74] Tavallisilla eristeillä maksimi sähkökentän voimakkuus on muutamasta megavoltista per metri useisiin kymmeneen megavoltteihin per metri. Täydellisellä tyhjiöllä maksimi sähkökentän voimakkuus on  $10^{12}$  voltia per metri, joten se soveltuisi parhaiten kondensaattorin eristeeksi. Täydellinen tyhjiö on kuitenkin mahdoton saavuttaa, joten varaudutaan helpommin saatavilla oleviin eristeisiin. Vaikka megavoltit kuulostavat paljolta, koska kondensaattorien levyjen välinen etäisyys on niin pieni, on tämä kondensaattorin koon mukaan volteista muutamiin satoihin voltteihin. Jännitettä, jonka kondensaattori kestää, kutsutaan läpilyöntijännitteeksi, tämä arvo saadaan, kun eristeen kestävä maksimi sähkökentänvoimakkuus kerrotaan eristeen paksuudella. Koska levyjen välinen etäisyys halutaan minimoida, jotta kapasitanssi saadaan maksimoitua kaavan 6 mukaan, ja levyjen välinen etäisyys halutaan maksimoida, jotta kondensaattori kestää sen yli tarvittavan jännitteen, joudutaan kondensaattorien kokoa mietittäessä tekemään kompromissi näiden kahden arvon välillä. [12]

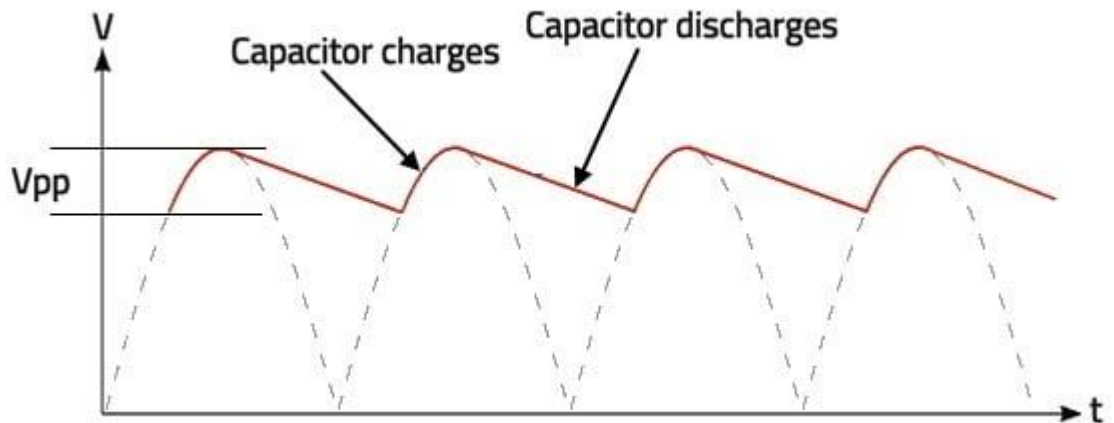
### 3.4 Kondensaattorien käyttötapauksia

Kondensaattoreita voi löytää monista erilaisista elektroniikkalaitteista, sillä kondensaattorilla on monia hyödyllisiä ominaisuuksia, jotka periytyvät kondensaattorin teoriasta ja kaavoista. Tärkeitä tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi kondensaattorin kyky varastoida ja purkaa varastoitua energiaa, estää tasavirta, mutta päästää vaihtovirta yli sekä kondensaattorin kapasitanssin riippuvuus kondensaattorien fyysisistä ominaisuuksista. [13] [14]

Kondensaattorin kykyä varastoida energiaa käytetään esimerkiksi kameroiden salamavalopiirissä, missä energiaa pitää ensin varastoida ja sitten se purkaa hyvin äkkinäisesti, jotta saadaan aikaan välähdys. Salamavalossa siis tarvitaan äkkinäistä energian purkautumista, mutta hitaalle energian purkautumisellekin on tarkoituksensa. Tästä esimerkkinä voisi olla esimerkiksi AC-DC muunnin. AC-DC muuntimessa ensin pitää suodattaa pois negatiivinen osuus diodeilla vaihtojännitteestä tämän jälkeen vaihtojännite tulee olla kiinni hitaasti purkautuvassa kondensaattoriin [14]. Kun kondensaattorin jännite on pienempi kuin vaihtojännitteen hetkellinen jännite, kondensaattori latautuu ja kun kondensaattorin jännite on suurempi kuin vaihtojännitteen hetkellinen jännite, kondensaattori purkautuu. Alla olevissa kuvissa 4 ja 5 näkyy selitys visuaalisesti. Kuvassa 4 vasemmalla on kytkentä kokonaisuudessa. Diodit  $D_3$  ja  $D_4$  päästävät jännitteen läpi sellaisenaan, kun kyseessä on vaihtojännitteen positiivinen osuus. Diodit  $D_1$  ja  $D_2$  yhdistävät sisäänmeno jännitteen ulostulon erinäpisiin kohtiin niin että negatiivinen sisäänmeno jännite näkyy ulostulossa positiivisena.  $R_L$  on kuormavastus, jonka läpi kondensaattorin  $C_1$  varaus purkautuu. Kun kondensaattori ei purkautu, kuormavastus ottaa jännitteen suoraan jännitelähteestä. Kaavan 8 mukaan mitä suurempi on  $R_L$  ja  $C_1$  arvojen tulo sitä hitaammin kondensaattorin  $C_1$  energia purkautuu. Kuvassa oikealla ylhäällä on sisäänmeno jännite ja oikealla alhaalla on sen aiheuttama ulostulo jännite.



Kuva 4. AC-DC muuntimen toiminta [15, p. 96]



**Kuva 5.** AC-DC muuntimen toiminta [16]

Kondensaattorin kykyä varastoida energiaa voidaan myös hyödyntää energiavarastoina sähköautoissa, johdottomissa sähkölaitteissa sekä hisseissä. Esimerkiksi auton äänilaitteet voivat käyttää kondensaattoreita tarjoamaan lisätehoa vahvistimissa [13]. Usein yksittäiset kondensaattorit eivät kuitenkaan säilö niin paljoa energiaa, että niitä voisi käyttää paljon energiaa vaativissa käyttötarkoituksissa. Tähän ongelmaan ollaan kuitenkin kehittämässä sähköisiä kaksikerroksisia kondensaattoreita (EDLC, engl. Electric double layer capacitor) joiden tarkoitus on yhdistää akkujen pitkäkestoisuus ja kondensaattorien teho. EDLC:tä voidaan sitten käyttää sähkö- ja hybridi-autoissa, sekä uusiutuvien energialähteiden kuten aurinko- ja tuulivoiman varastoinnissa ja syötössä [17]. [18]

Kun kondensaattoriin on samaan aikaan kytketty sekä tasa- että vaihtojännite, kondensaattori latautuu tasajännitteen arvoon, jolloin kondensaattorin yli oleva jännite kumoaa siihen kytketyn jännitteen. Tämän takia kondensaattori toimii avoimena piirinä tasajännitteille. Vaihtojännite taas vuorostaan purkaa ja lataa kondensaattoria, jolloin jännitteen vaihtelu näkyy kondensaattorin toisellakin puolella. Hyvin yleinen käyttökohde tälle ominaisuudelle on kytkentäkondensaattori, jota käytetään esimerkiksi mikrofoniipiirissä. Mikrofoneissa tasajännitettä käytetään teholähteenä. Koska äänisignaalin täytyy olla vaihtosähköä, pitää tasasähkö saada erotettua pois äänisignaalista. Tällöin siis laitetaan väliin kytkentäkondensaattori, jolloin pelkästään haluttu äänisignaali saadaan erotettua tasasähköstä, joka muuten aiheuttaisi kohinaa ja muuta häiriötä ulostulossa. [19]

Kondensaattorit sopivat hyvin mittaamaan eri asioita, sillä pienetkin muutokset kondensaattorin rakenteeseen liittyen aiheuttavat muutoksen kondensaattorin kapasitanssissa, joka puolestaan aiheuttaa muutoksen kondensaattorin varauksessa.

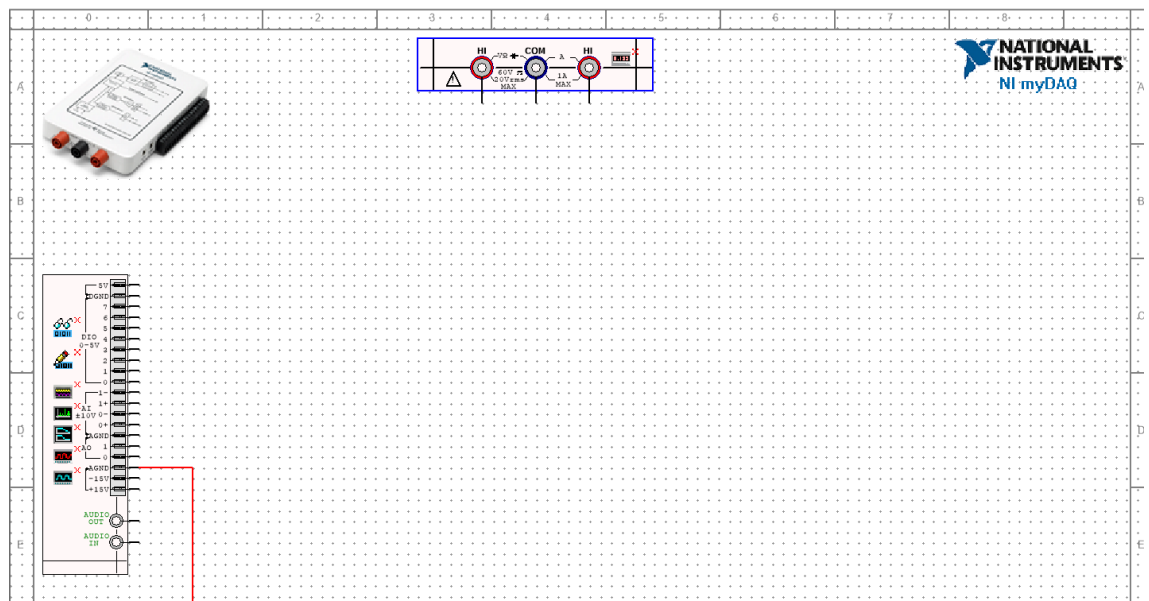
Oleelliset muutokset ovat kondensaattorien levyjen välinen etäisyys sekä kondensaattorin levyjen välissä olevan eristeen suhteellinen permittiivisyys. Levyjen välisellä etäisyydellä voidaan muun muassa mitata painetta. Kun kondensaattorin levyä painetaan, levyjen välinen etäisyys pienenee paineen takia, mikä aiheuttaa kapasitanssin kasvamisen, mikä vuorostaan kasvattaa varausta. Kiihtyvyyden mittaaminen toimii jotakuinkin samalla tavalla. Levyjen välisen eristeen suhteellisella permittiivisyydellä voidaan mitata asioita, jotka vaikuttavat eristeen permittiivisyyteen, kuten esimerkiksi lämpötila ja ilmankosteus. [13]

### 3.5 Esimerkkitehtävä kondensaattoreista

Tässä esimerkkitehtävässä käydään läpi yksinkertaisen AC-DC muuntimen suunnittelu ja rakentaminen myDAQ:iä ja Multisimia apuna käyttäen. Tehtävän tavoitteena on syventää ymmärrystä kondensaattorin toiminnasta, sekä osoittaa, miten AC-DC muuntimen eri komponenttien vaihtaminen vaikuttaa sen toimintaan. Liitteessä 1A ovat tämän tehtävän kysymykset ja liitteessä 1B ovat tämän tehtävän vastaukset.

Multisimilla saa avattua uuden myDAQ pohjan käyttämällä reittiä ((File ► New...) tai (ctrl+N)) ► NI myDAQ desing. Avautuvasta pohjasta löytyy kaikki myDAQ:stä löytyvät liittimet. Ylhäältä kuvasta 6 löytyy myDAQ:n yleismittari. Kuvasta 6 vasemmalta löytyy paneeli, jossa alhaalta löytyvät kohdat audiosignaaleille, joiden yläpuolella on kaksikymmentä pinniä eri tarkoituksiin. Näistä kahdestakymmenestä pinnistä tässä tehtävässä tarvitaan kymmentä alinta. Kaksi alinta näistä ovat 15 V ja -15 V käyttöjännitteet. Näiden yläpuolella on maa AGND, jonka yläpuolelta löytyvät myDAQ:n ulostulot AO0 ja AO1. Tässä huomioitavaa on se, että myDAQ:n ulostulo tulee yleensä rakennetun piirin sisäänntuloon. MyDAQ:n ulostulosta tulee signaali, joka on tuotettu myDAQ:in signaaligeneraattorilla. Tätä signaalia käytetään sitten piireissä sisäänntulosignaalina. MyDAQ:n ulostulosignaalien yläpuolella on toinen maa AGND, jonka yläpuolella ovat myDAQ:n sisäänntulosignaalit AI0+, AI0-, AI1+ ja AI1-. MyDAQ:n sisäänntulosignaalit menevät usein tehdyn piirin ulostuloon, sillä siitä saadaan sisäänntulo esimerkiksi oskilloskooppiin. Komponentteja Multisimilla saa lisättyä (Place ► Component...) tai (ctrl+W) valitsemalla sopiva komponentti ja painamalla enter. Komponentteja saa raahattua hiirellä ja käännettyä ctrl+R:llä. Komponentit saa liitettyä toisiinsa painamalla komponentin, joka halutaan liittää, jalan päästä, jonka jälkeen painetaan komponentin jalkaa, johon valittu komponentin jalka halutaan liittää. Jos

komponentissa on jo kiinni joku toinen komponentti, voidaan johtimeen lisätä liitos Place ► Junction tai ctrl+J komenolla. Liitoskohdasta voidaan painaa, jolloin saadaan johdettua johto kiinni sinne, minne halutaan. Sisäänmenosignaalina käytetään signaaligeneraattorista saatua signaalia. Signaaligeneraattori löytyy vasemmasta paneelista. Tämä voidaan ottaa AO0 tai AO1 pinnistä. Samasta paneelista löytyy myös oskilloskooppi. MyDAQ:n sisäänmenojen mittaaminen toimii siten, että pinni AI0- tai AI1- liitetään mitattavan kohdan miinusnapaan ja AI0+, jos valittiin AI0-, tai AI1+, jos valittiin AI1-, liitetään mitattavan kohdan plusnapaan. Oskilloskoopin toiminnassa on huomioitava, että mitattava kanava on valittu oikein. MyDAQ:n AO porttien antama maksimi virta on 2 mA ja myDAQ:n maksimi näytteenottotaajuus on 200 kS/s. Nämä on huomioitava myDAQ mittauksissa.



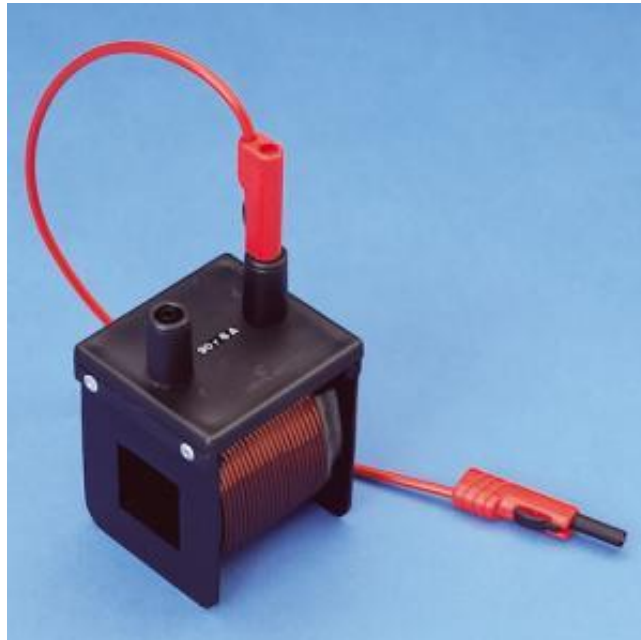
**Kuva 6.** Tyhjä myDAQ-pohja.



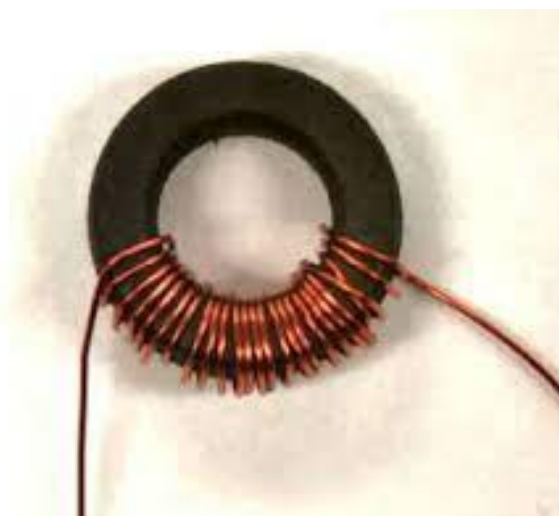
## 4. KÄÄMIT JA MAGNEETTIKENTÄT

### 4.1 Käämin rakenne

Käämi on rakenteeltaan johdelankaa kierrettynä kelalle. Käämeillä on yleensä magneetti-, rauta- tai ferriittisydän, jonka ympärille johdelanka kierretään [20]. Alapuolella olevat kuvat ovat kahdesta erilaisesta käämistä. Kuvassa 7 näkyy käämi, jossa ei ole valmiiksi magneettisydäntä, tosin sellaisen voi siihen lisätä. Kuvassa 8 näkyy käämi, jossa on ympyrän muotoinen magneetti käämin sydämenä.



**Kuva 7.** Käämi ilman magneettisydäntä [21]



**Kuva 8.** Käämi magneettisydämellä [22]

Käämin sydämen ei tarvitse olla tietyn muotoinen, tosin eri muodoilla voi olla vähän eriävät ominaisuudet, eikä sillä ole huomattavaa merkitystä, onko johto kierretty ympyrän muotoiseksi vai neliöiksi. Eri muotoisilla sydämillä tulee erilaiset magneettikentät. Käämin rakenteesta saadaan käämin induktanssille alla näkyvä kaava.

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{N^2 A}{l} \quad (20)$$

Kaavassa 20  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $\mu_e$  on sydänmateriaalin permeabiliteetti,  $N$  on johdelankasilmukoiden lukumäärä,  $A$  on johdesilmukoiden ympäröimän alueen pinta-ala ja  $l$  on kierretyn johdelangan pituus. [22]. Jos kaksi käämiä laitetaan sarjakytkentään, kaksinkertaistuu sekä silmukoiden määrä että johdelangan pituus, joten induktanssi myös kaksinkertaistuu. Seuraavassa kappaleessa tutkitaan enemmän käämin rinnan- ja sarjakytkennän vaikutuksia.

## 4.2 Käämin teoria

Kuten kondensaattorille oli kapasitanssi, on käämille induktanssi. Induktanssin yksikkö on Henry. Käämille on hyvin samankaltainen kaava kondensaattoriin liittyvälle kaavalle 9, jossa nähtiin kondensaattorin ylimenevän virran ja jännitteen riippuvuus toisistaan.

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (21)$$

[20]. Toisin kuin kaavassa 9, jossa kondensaattorin virta määräytyi jännitteen muutoksesta, kaavasta 21 näkee, että käämin yli oleva jännite määräytyy virran muutoksesta. Eli jos virta käämin yli ei muutu ei käämin yli ole jännitettä. Tämän takia, jos käämi on kytkettynä tasajännitelähteeseen, toimii käämi oikosulkuna. Käämin yli oleva virta ei voi muuttua välittömästi, sillä tämä vaatisi äärettömän suuren jännitteen. [23, p. 198]. Induktanssi vastustaa sähkövirran muutosta virtapiirissä ja sen voi kuvitella vaikuttavan samalla tavalla virtaan kuin hitaus vaikuttaa mekaanisen kappaleen nopeuteen. [20] [23, p. 198]

Käämin virran muutokselle tasavirtapiirissä on alla oleva kaava 22 [24]:

$$I_L = I(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}) \quad (22)$$

Kaavasta voi huomata, että se on hyvin samanlainen kondensaattorin jännitteen muutokselle tasajännitepiirissä. Virtojen paikalla kondensaattorin kaavassa ovat tietenkin jännitteet ja induktanssin paikalla kapasitanssi. Myös resistanssi on neperinluvun eksponentissa eripaikassa, mutta jos resistanssin antaa muodossa:

$$R = \frac{U}{I} \quad (23)$$

voidaan huomata, että vaihtamalla jännitteen ja virran paikkaa saadaan:

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} \quad (24)$$

Käämeillä ja kondensaattoreilla ovat siis samat kaavat, mutta jännitteet vaihtuvat virroiksi ja virrat jännitteiksi. Tämä johtuu siitä, että virta käämissä käyttäytyy kuten jännite kondensaattorissa. Jos tätä muistisääntöä käyttää käämin kaavoja muistaessa, pitää myös muistaa, että tämä vaikuttaa kaikkiin muuttujiin, jotka riippuvat virrasta tai jännitteestä, kuten edellä mainittu resistanssi tai vaikkapa varaus. Käämin varastoima energia saadaan alla olevasta kaavasta 25:

$$E = LI^2 \quad (25)$$

Kaava 25 on hyvä esimerkki säännöstä käämin ja kondensaattorin kaavojen samanlaisuuksista. [24] [25, p. 120]

Käämien sarjakytkenän induktanssin lauseke saadaan johdettua kaavan 21 avulla.

$$V = V_1 + V_2 \quad (26)$$

Kun kaksi käämiä laitetaan sarjakytkentään, on kaavan 26 mukaan  $V$  molempien käämien yli oleva jännite ja  $V_1$  sekä  $V_2$  ovat erinäisten käämien yli olevat jännitteet. Kun tämä yhdistetään kaavan 21 kanssa, saadaan kaava 27:

$$L \frac{di}{dt} = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} \quad (27)$$

Kaava 27 voidaan jakaa puolittain  $\frac{di}{dt}$  arvolla ja saadaan kaava 28:

$$L = L_1 + L_2 \quad (28)$$

Kaava toimii myös useammalle käämille kuin kahdelle, jolloin saadaan käämien sarjakytkenän summakaavaksi:

$$L_{sum} = \sum_i^N L_i \quad (29)$$

[26].

Käämien rinnankytkennän yhteisinduktanssi saadaan johdettua alla olevasta kaavasta 30:

$$V = L \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) \quad (30)$$

Tässä kaavassa  $V$  on kaikkien käämien yli oleva jännite,  $L$  on yhteisinduktanssi ja  $i_1$  sekä  $i_2$  ovat eri käämien läpi kulkevat virrat. Käytetään nyt kaavaa 21 käämien läpi oleviin virtoihin, jolloin kaava 30 saadaan muokattua alla olevaan muotoon:

$$V = L \left( \frac{V}{L_1} + \frac{V}{L_2} \right) \quad (31)$$

Nyt kun yhtälö 31 jaetaan puolittain ensin yhteisinduktanssilla ja sitten käämien yli olevalla jännitteellä, saadaan yhtälö alla olevaan muotoon:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_1} \quad (32)$$

Summakaavaksi rinnankytkettyjen käämien induktanssille saadaan tämän perusteella seuraava kaava.

$$\frac{1}{L_{sum}} = \sum_i^N \frac{1}{L_i} \quad (33)$$

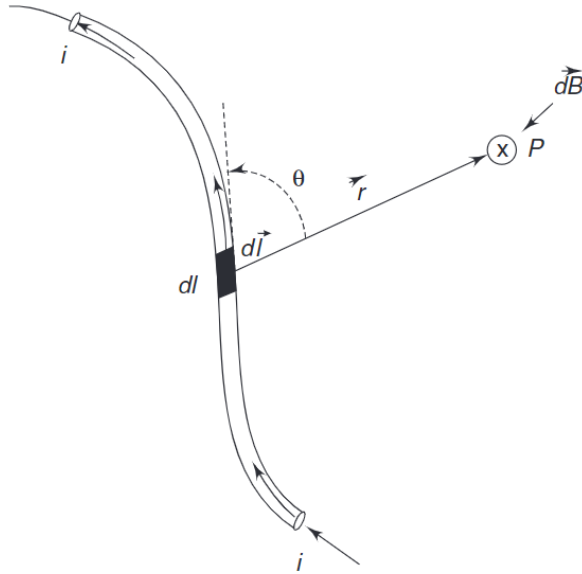
[27].

### 4.3 Käämin magneettikenttä

Liikkuva varaus aiheuttaa magneettikentän ympärilleen. Koska johtimessa, jossa kulkee virta, kulkee monia varauksellisia hiukkasia, johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä, kun siinä kulkee sähkövirta. [28, p. 880]. Tämän ympärille käämin toiminta perustuu. Kun johdin kierretään silmukalle ja johtimen läpi laitetaan kulkemaan virta, muodostuu johtimen ympärille magneettikenttä. Kun silmukoita tehdään useampi vierekkäin, silmukoiden ympärille muodostuvat magneettikentät vahvistavat toisiaan. Myös käämin magneettisyyden vahvistaa silmukoiden aiheuttamaa magneettikenttää. Johtimen aiheuttaman magneettikentän suuruus saadaan kaavasta:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \, d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (34)$$

Missä  $\vec{B}$  on magneettikenttä pisteessä P, joka näkyy kuvassa 9,  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $r$  on johtimen etäisyys pisteestä P,  $i$  on johtimessa kulkeva virta ja  $d\vec{l} \times \vec{r}$  on johtimen ja johtimesta pisteeseen P osoittaman vektorin ristitulon derivaatta.  $d\vec{l} \times \vec{r}$ :n suunta on sama kuin magneettikentän suunta. [29]

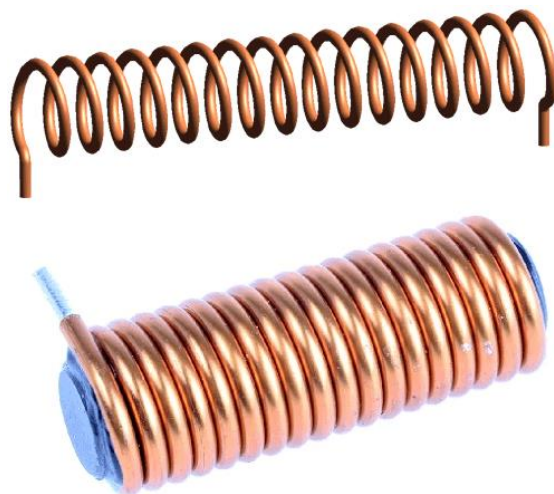


**Kuva 9.** Johtimen aiheuttama magneettikenttä [29]

Kuvassa 9 näkyy kaavaa 34 tarkentava kuva. Äärettömän pitkälle johtimelle saadaan johdettua kaavasta 34 alla oleva kaava.

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \quad (35)$$

Kaavassa  $R$  on johtimen etäisyys pisteestä  $P$ , missä on  $B$ :n suuruisen magneettikenttä, kun johtimen läpi kulkee  $i$  suuruisen virta. Jokainen käämin johdon osa siis aiheuttaa kaavan 34 mukaan magneettikentän ympärilleen, nämä magneettikentät vahvistavat toisiaan, jolloin käämin silmukoiden keskelle muodostuu vahvempi magneettikenttä, sillä kaikki ympärillä olevat silmukat vahvistavat magneettikenttää. Silmukoiden ulkopuolellekin syntyy magneettikenttä, tosin se ei ole yhtä vahva, sillä osa johtimista on kauempana pisteestä, jolloin niiden aiheuttaman magneettikentän suuruus ei ole niin iso. Alla näkyvässä kuvassa on esitetty solenoidi, mikä on tietynlainen käämi.



**Kuva 10.** Solenoidi [30]

Solenoidi on pitkä pätkä virtajohtoa kierrettynä kelalle. Solenoidin rakenteen ansiosta solenoidin sisällä oleva magneettikenttä on solenoidin keskellä, joka paikassa kutakuinkin yhtä suuri. Solenoidin keskellä olevan magneettikentän suuruudeksi saadaankin kaava, kun solenoidi on tarpeeksi pitkä, joka voidaan ilmaista muodossa:

$$B = \mu \frac{N}{L} I \quad (36)$$

[31]. Solenoidin keskellä olevan magneettikentän suuruus  $B$  on siis solenoidin keskellä olevan aineen permeabiliteetin  $\mu$ , virran  $I$  ja solenoidin silmukoiden määrän  $N$  tulo jaettuna solenoidin johteen pituudella  $L$ . Käämiä ajatellessa voi hyvin tulla mieleen solenoidi, mutta käämin ei tietenkään tarvitse olla rakenteeltaan solenoidi, ja käämejä on rakenteeltaan erilaisia. Tämä kaava siis toimii vain solenoideille ja muiden rakenteisille käämeille pitää johtaa omat kaavansa. [31]

Sähkömagneettinen induktio tapahtuu, kun johtimen läpi kulkeva magneettivuo muuttuu. Muutos voi tapahtua joko magneettilähteen voimakkuuden muutoksena tai magneettilähteen sijainnin muutoksena suhteessa johtimeen.

$$E_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (37)$$

Yllä näkyy Faradayn laki, jonka mukaan indusoitunut jännite  $E_{ind}$  on magneettivuon muutosnopeus  $d\phi$  jaettuna ajan muutoksella  $dt$  negatiivisena. Magneettivuo  $\phi$  on magneettivuon tiheyden  $B$  ja magneettivuon pinta-alan  $A$  tulo. Jos magneettivuon tiheyden ja pinta-alan välillä on kulma, pitää se ottaa huomioon. Lenzin laki on sähködynamiikan laki, jonka mukaan induktiovirta on suunnaltaan sellainen, että induktiovirran aiheuttama muuttuva magneettikenttä vastustaa magneettikentän, joka aiheutti induktiovirran, muutosta. Jos magneettivuo johtimen läpi heikkenee, aiheuttaa induktiovirta magneettikentän, joka on saman suuntainen heikkenevän magneettikentän kanssa vahvistaen sitä. Jos magneettivuo johtimen läpi kasvaa, indusoitunut virta aiheuttaa magneettivuon, joka on vastakkaiseen suuntaan vahvistuvan magneettivuon kanssa, joka heikentää kasvavaa magneettivuota [32] [33]. Kun käämin läpi kulkeva virta muuttuu, muuttuu myös käämin johtimen aiheuttama magneettivuo. Tämä muuttuva magneettivuo indusoi jännitteen käämin yli, joka hidastaa magneettivuon muutosta. Tämä muutos näkyy virtapiirissä virran hitaampana muutoksena. [34].


## 4.4 Käämien käyttötapauksia

Käämien käyttötapaukset liittyvät käämin kykyyn hidastaa virran muutosta, sekä käämin hyödyllisyyteen magneettikenttien ja induktion käyttötapauksissa. Tosin magneettikentät ja induktio kulkevat niin käsikädessä, että käyttötapauksissa, joissa käytetään toista, usein käytetään myös toista. Käämin hidasta virran muutosta voidaan käyttää esimerkiksi kuristimissa, filttäreissä sekä viritysvirtapiireissä. Näissä käyttötapauksissa käämit estävät suuritaajuisia signaaleja menemästä käämin läpi. Tämä perustuu siihen, että virta ei ehdi muuttua signaalin mukana. Filttäreissä sekä viritysvirtapiireissä käämejä käytetään kondensaattorien kanssa, sillä käämien induktanssi estää nopean virran muutoksen käämin yli samanlailla, miten kondensaattorit estävät nopean jännitteen muutoksen. Käämi varastoi energiaa magneettikenttäänsä. Kun käämi poistetaan tehollähteestä, tämä energia häviää hyvin nopeasti. Käämin hetkimäistä kykyä varastoida energiaa voidaan kuitenkin käyttää hyväksi esimerkiksi hakkuritehollähteissä, hakkuritehollähteet muuttavat syötetyn jännitteen ominaisuuksia. Esimerkiksi AC-DC muunnin, joka muuntaa vaihtojännitteen tasajännitteeksi tai DC-DC muunnin, joka muuntaa tasajännitteen arvoa. On myös DC-AC muunnin ja AC-AC muunnin. Käämin aiheuttamaa magneettikenttää voidaan käyttää esimerkiksi signaalin lähettimissä ja magneettikentän aiheuttamaa induktiota signaalin vastaanottimissa. Induktiota voidaan käyttää hyväksi myös sensoreissa, joita voidaan käyttää liikennevaloissa liikenteen ruuhkaisuuden havaitsemiseen. Induktiota voidaan myös käyttää tietynlaisten akkujen lataamiseen. [35]. Tulevaisuudessa on mahdollista rakentaa autoteitä siten, että autojen akut latautuvat samalla, kun ne kulkevat, sitä varten tehtyjen teiden päällä [36]. Tämä mahdollistaisi pienempien akkujen käyttämisen sähköautoissa, sillä osa liikkumiseen tarvittavasta energiasta tulisi liikkumisen yhteydessä, maassa olevien käämien avulla. Käämeillä on myös hyvä ominaisuus eliminoida häiriötä signaalista, sillä taajuuden kasvaessa käämin reaktanssi kasvaa, jolloin korkeataajuinen signaali ei pääse käämin läpi, kun taas matalataajuiset signaalit pääsevät. Jännitteentasaaja on esimerkkinä tälle käyttötarkoitukselle. Jännitteentasaajaa käytetään suojaamaan herkkiä sähkölaitteita tasaamalla jännitteen vaihteluja, kuten jännitepiikkejä, transientteja ja sähköistä melua [33].

Induktiomoottori on useimmiten käytetty moottorityyppi. Se käyttää hyväkseen käämeihin ja magneettikenttiin liittyvää teoriaa. Induktiomoottorissa on staattori ja roottori. Staattori kostuu ontosta metalli- tai alumiinisylinteristä, jossa on rakoja. Näiden rakojen läpi laitetaan eristettyjä keloja. Kun kelojen yli laitetaan vaihtojännite, muodostuu

sylinterin sisälle kääntyvä magneettikenttä. Tämä kääntyvä magneettikenttä indusoi staattorin sisällä olevaan roottoriin virran, joka puolestaan aiheuttaa ympärilleen magneettikentän. Näiden magneettikenttien vuorovaikutus saa aikaan roottorin pyörimisen. [37]

## 4.5 Esimerkkitehtävä käämeistä

Tässä tehtävässä tarkastellaan käämien toimintaa RL-piirissä, joka myös tunnetaan RL-suodattimena. Tämän tehtävän tarkoituksena on esitellä RL-piirin toiminta, sekä tutustua bodeanalysaattorin toimintaan. Liitteessä 2A ovat tämän tehtävän kysymykset ja liitteessä 2B ovat tämän tehtävän vastaukset. Katso kappale 2.5, jos et muista, miten myDAQ toimii, tai jos tarvitset muistin virkistystä Multisim-simulaattorin toiminnasta. Tässä tehtävässä käytetään uutena apuvälineenä bodeanalysaattoria. Bodeanalysaattorin kuvake  löytyy samasta myDAQ:n paneelista kuin funktiogeneraattorin ja oskilloskoopinkin. Jotta bodeanalysaattori toimii kuten halutaan, pitää funktiogeneraattorin olla päällä ja kytkettynä piirin signaalin sisääntuloon. MyDAQ:in sisääntuloportit pitää kytkeä siten, että toinen toimii herätekanavana (stimulus channel) ja toinen vastekanavana (response channel). Bodeanalysaattori vertaa sitten vastekanavan taajuutta ja vaihetta herätekanavan taajuuteen ja vaiheeseen, ja piirtää tämän avulla kuvaajan aloitustaajuudesta lopetustaajuuteen. Vastekanavaa siis verrataan herätekanavaan. Jos vastekanavan amplitudi on puolet jollain tietyllä taajuudella verrattuna herätekanavan amplitudiin, tulee tälle taajuudelle arvoksi puoli vahvistuskuvaajaan. Multisimin bodeanalysaattorissa A10 on automaattisesti herätekanava ja A11 vastekanava.

Koska käämin reaktanssi kasvaa taajuuden kasvaessa, käämi sopii hyvin suodattamaan korkeat taajuudet. Koska piirissä on vain kaksi komponenttia, on se yksinkertaisin äärettömän impulssivasteen suodatin. RL-suodattimen rajataajuuden kaava on:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \quad (38)$$

RL-suodin koostuu vastuksen ja käämin sarjakytkenästä. Tässä tehtävässä tutustutaan RL-suodattimen toimintaan. [38]



## 5. YHTEENVETO

Reaktanssi toimii vähän samalla lailla kuten resistanssi, mutta reaktiivisille komponenteille ja se riippuu taajuudesta. Koska reaktanssi riippuu taajuudesta, reaktiivisilla komponenteilla on hyvin oleellinen rooli taajuuksien suodattamisessa. Reaktiivisten komponenttien käyttötarkoitukset eivät kuitenkaan rajoitu tähän, sillä sekä kondensaattoreilla, että käämeillä on ominaisuutensa varastoida energiaa sähkökenttään (kondensaattoreilla) tai magneettikenttään (käämeillä). Näillä kentillä on myös omat ominaisuutensa, joita voi hyödyntää erilaisissa käyttötarkoituksissa. Tämän lisäksi kondensaattorien riippuvuus omista rakenteellisista arvoista tuo erinomaisen mahdollisuuden käyttää niitä sensoreina havaitsemaan asioita, jotka aiheuttavat arvojen muuttumisen. Koska reaktiivisilla komponenteilla on niin monia hyödyllisiä ominaisuuksia, voi niitä löytää monista laitteista ja tämän takia niiden toiminnan ymmärtäminen on tärkeää eri elektronisten laitteiden toiminnan ymmärtämisessä ja suunnitteluissa. Tämän työn tarkoituksena oli tiivistää tietoa reaktiivisten komponenttien toiminnasta ja käyttötarkoituksista, sekä tarjota pari tehtävää syventämään ymmärrystä jo opituista asioista. Sen lisäksi, että tehtävät auttavat ymmärtämään kondensaattorien ja käämien toimintaa. Ne myös auttavat käyttämään myDAQ:iä ja Multisimia, erilaisten piirien toiminnan simuloimisessa ja mittaamisessa.

# LÄHTEET

- [1] "Electrical Reactance: What is it? (Inductive & Capacitive)," 11 10 2020. [Online]. Available: <https://www.electrical4u.com/electrical-reactance/>. [Haettu 10 6 2023].
- [2] "reactance," [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/reactance>. [Haettu 10 6 2023].
- [3] "impedance," 2022. [Online]. Available: <https://electronicsclub.info/impedance.htm>. [Haettu 10 6 2023].
- [4] N. Storey, *Electronics a systems approach*, 6th edition, Harlow, England: Pearson, 2017.
- [5] "Kondensaattorit," 27 2 2021. [Online]. Available: <https://www.hutasu.net/elektronikka/elektronikan-komponentteja/kondensaattorit/>. [Haettu 10 6 2023].
- [6] "Types of Capacitor," [Online]. Available: [https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap\\_2.html](https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap_2.html). [Haettu 10 6 2023].
- [7] "Cylindrical Capacitor," [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capcyl.html>. [Haettu 10 6 2023].
- [8] "Introduction to Capacitors," [Online]. Available: [https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap\\_1.html](https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap_1.html). [Haettu 10 6 2023].
- [9] "RC Charging Circuit," [Online]. Available: [https://www.electronicstutorials.ws/rc/rc\\_1.html](https://www.electronicstutorials.ws/rc/rc_1.html). [Haettu 10 6 2023].
- [10] "Capacitors in Series," AspenCore, inc, [Online]. Available: [https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap\\_7.html](https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap_7.html). [Haettu 10 6 2023].
- [11] "Capacitors in Parallel," AspenCore, inc, [Online]. Available: [https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap\\_6.html](https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap_6.html). [Haettu 10 6 2023].
- [12] J. Rennie, "The Dielectric Strength of Insulating Materials," [Online]. Available: <https://peakdemand.com/archived-knowledge-center/dielectric-strength-of-insulating-materials/>. [Haettu 10 6 2023].
- [13] A. Richard, "Uses of Capacitors," [Online]. Available: <https://www.techwalla.com/articles/uses-capacitors>. [Haettu 10 6 2023].
- [14] R. Garner, "List of Uses for Capacitors," 3 13 2018. [Online]. Available: <https://sciencing.com/list-uses-capacitors-8059446.html>. [Haettu 10 6 2023].
- [15] B. Razavi, *Fundamentals of microelectronics*, 2nd edition, Los Angeles: Wiley, 2013.
- [16] B. Martin, "How To Minimize Ripple In DC Power Supplies," 14 7 2017. [Online]. Available: <https://blog.programmablepower.com/blog/know-your-power-supply-jargon-ripple>. [Haettu 10 6 2023].
- [17] A. F. Burke ja J. Zhao, "Past, present and future of electrochemical capacitors: Technologies, performance and applications," *Energy Storage*, Osa 35, 2021.
- [18] S. Nomoto, H. Nakata, K. Yoshioka, A. Yoshida ja H. Yoneda, "Advanced capacitors and their application," *Power sources*, Osa 97-98, pp. 807-811, 2001.
- [19] "What is a Coupling Capacitor : Construction & Its Working," [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/what-is-a-coupling-capacitor-construction-its-working/>. [Haettu 10 6 2023].
- [20] "The Inductor," [Online]. Available: <https://www.electronicstutorials.ws/inductor/inductor.html>. [Haettu 10 6 2023].
- [21] "Käämi 180 r, 30x30 mm sydän," [Online]. Available: <https://www.isvet.fi/K-auml-auml-mi-180-r-30x30-m/ekauppa/p12964/>. [Haettu 10 6 2023].
- [22] M. Kuisma, "Induktanssi, L," [Online]. Available: <http://www.kuisma.eu/elper/3passiivi/5kela.html>. [Haettu 10 6 2023].

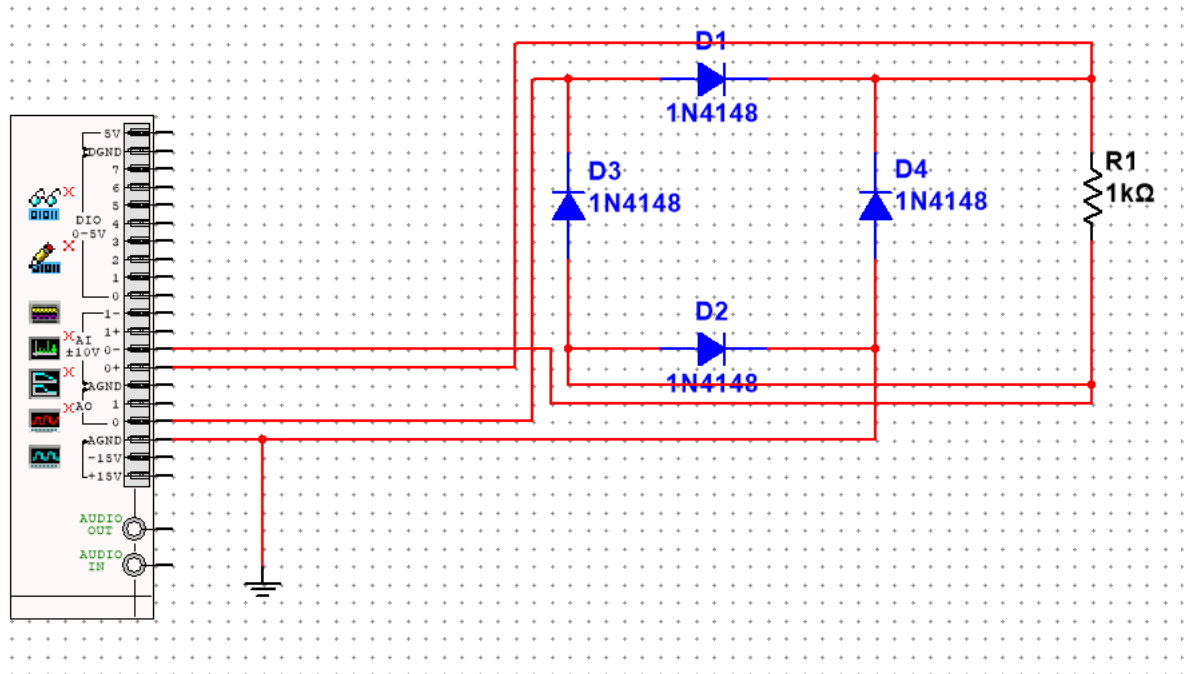
- [23] J. W. Nilsson ja S. A. Riedel, *Electric Circuits*, 10th edition, Harlow, England: Pearson, 2015.
- [24] "LR series circuit," [Online]. Available: <https://www.electronicstutorials.ws/inductor/series-inductors.html>. [Haettu 10 6 2023].
- [25] E. D. Gates, *Introduction to electronics*, 6th edition, USA, DELMAR: Cengage learning, 2012.
- [26] "Inductors in Series," [Online]. Available: <https://www.electronicstutorials.ws/inductor/series-inductors.html>. [Haettu 10 6 2023].
- [27] "Inductors in Parallel," [Online]. Available: <https://www.electronicstutorials.ws/inductor/parallel-inductors.html>. [Haettu 10 6 2023].
- [28] R. A. Freedman ja H. D. Young, *University physics*, 15th edition, Santa Barbara: Sears & Zemansky's, 2018.
- [29] G. S. Chaddha, *University Physics: For Engineering and Science*, Oxford UK: alpha science, 2014.
- [30] D. Kumar, "An Introduction to Solenoids," 26 9 2019. [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/article/what-is-solenoid-its-working-principle-and-types>. [Haettu 10 6 2023].
- [31] P. H. Schimpf, "A Detailed Explanation of Solenoid Force," Eastern Washington University, Cheney, WA, USA, 2013.
- [32] R. Shankar, *Fundamentals of physics II : electromagnetism, optics, and*, New Haven and London: OPENYALECOURSES, 2016.
- [33] "What does a power conditioner do?," [Online]. Available: <https://www.riello-ups.com/questions/46-what-does-a-power-conditioner-do>. [Haettu 10 6 2023].
- [34] L. Hellsten, "Itseinduktio," [Online]. Available: <https://peda.net/p/Hellsia/fysiikka/fy7/simulaatiot/itseinduktio>. [Haettu 10 6 2023].
- [35] "15 Uses of Inductors," 24 8 2019. [Online]. Available: <https://allusesof.com/electricity/15-uses-of-inductors/>. [Haettu 10 6 2023].
- [36] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. Sealy, P. Israelsen ja J. Muhs, "A review on inductive charging for electric vehicles," *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 143-147, 2011.
- [37] R. Parekh, "AC Induction Motor Fundamentals," Microchip Technology Inc., 2003.
- [38] H. Lehto, J. Maalampi, R. Havukainen ja J. Leskinen, *FY6 Sähkömagnetismi*, Helsinki: Sanoma Pro Oy, 2021.

## LIITE 1A

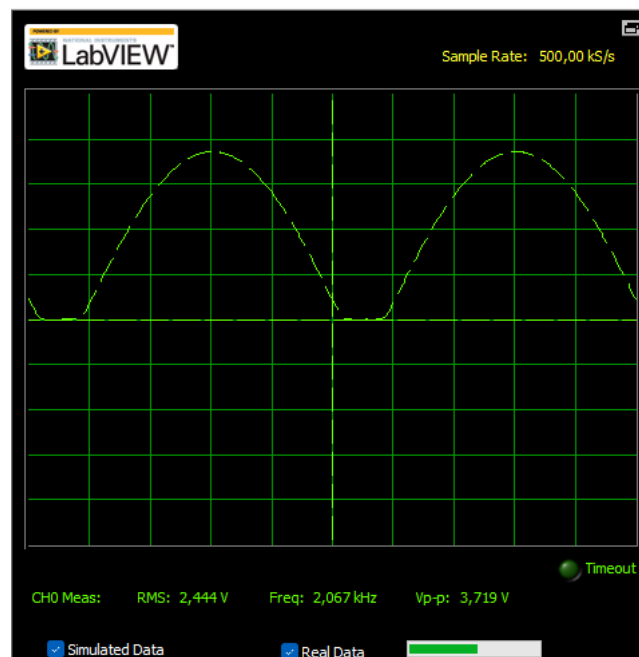
Käytä tehtävissä 10 V ja 1kHz vaihtojännitettä sisäänmenosignaalinä, ellei muuta ole mainittu. Ota oskilloskoopin tuloksista kuvat. Kuvassa neljä on esimerkki tehtävissä rakennettavasta diodisillasta.

1. Simuloi diodisilta Multisimin-oskilloskoopin avulla käyttämällä neljää 1N4148 diodia ja 1 k $\Omega$  vastusta.
2. Lisää kuormavastuksen rinnalle 220 nF kondensaattori ja katso, miten tulos eroaa pelkästä diodisillasta. Toista mittaus 1  $\mu$ F ja 4.7  $\mu$ F kondensaattoreille ja selitä, mistä eroavaisuudet johtuvat.
3. Muuta kuormavastuksen arvoksi 10 k $\Omega$  ja toista kohdan 2 mittaukset, sekä selitä, miksi tämän tehtävän tulokset eroavat tehtävän 2 tuloksista.
4. Simuloi AC-DC muunnin vielä 1 k $\Omega$  kuormavastusta ja 220 nF kondensaattoria käyttäen, mutta muuta sisäänmenosignaalin taajuudeksi 10kHz. Selitä, mistä ero ensimmäiseen mittaukseen verrattuna johtuu.
5. Rakenna AC-DC muunnin myDAQ:llä 1 k $\Omega$  kuormavastusta ja 220 nF kondensaattoria käyttäen. Mittaa tulokset oskilloskoopilla ja selitä, mistä tuloksen leikkaantuminen johtuu.
6. Toista kohdan 2 mittaukset myDAQ:llä ja vertaa tuloksia kohdan 2 tuloksiin. Pohdi mistä mahdolliset eroavaisuudet johtuvat.
7. Vaihda sisäänmenosignaalin taajuus 10 Hz ja mittaa piiriä oskilloskoopilla, kun kuormavastus on 10 k $\Omega$  ja kondensaattori on 4.7  $\mu$ F. Vertaa kuvaajien muotoa ja tarkkuutta ja pohdi mistä mahdolliset erot johtuvat.

## LIITE 1B



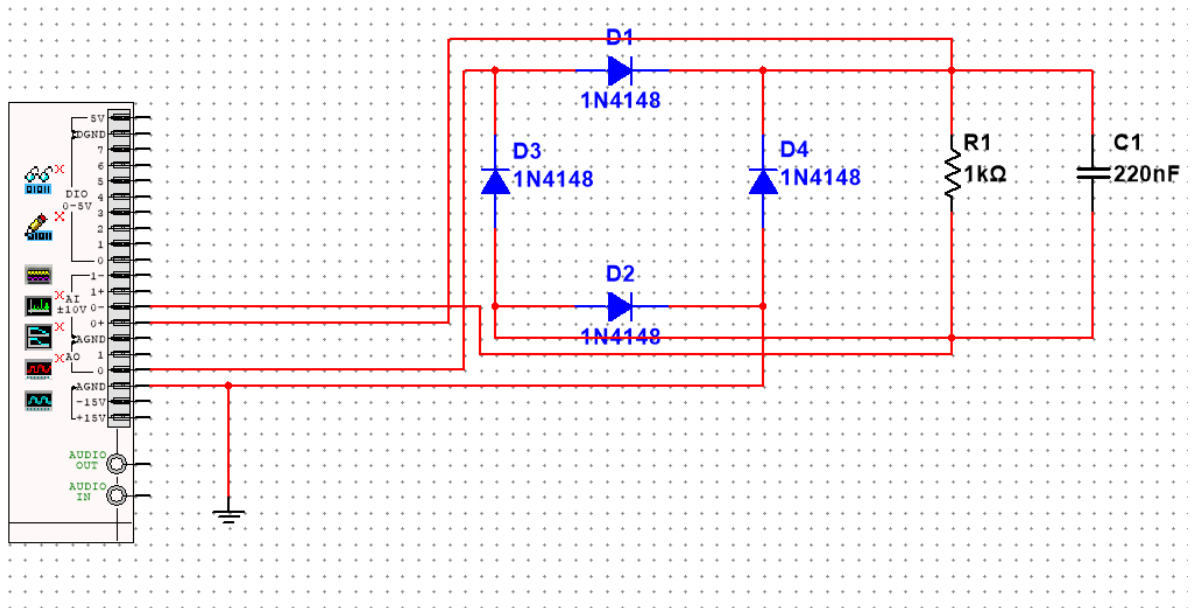
Kuva 11. AC-DC muunnin ilman kondensaattoria Multisimissä



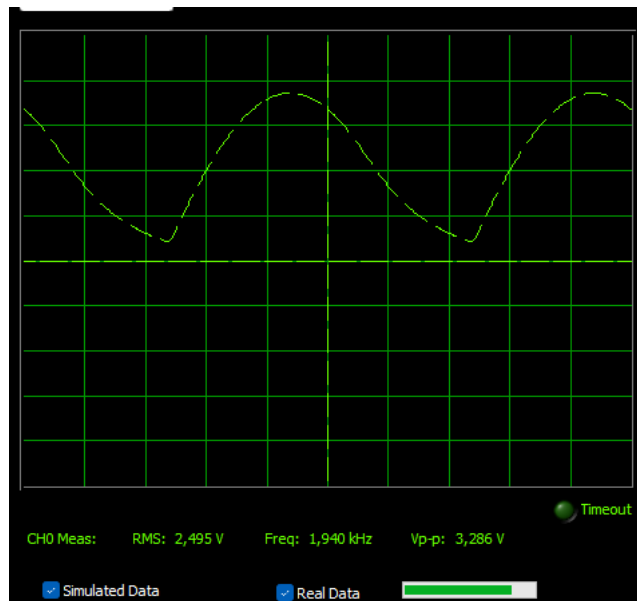
Kuva 12. AC-DC muunnin ilman kondensaattoria Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

Kuvassa 11 on esitetty esimerkki piiri AC-DC muuntimesta ilman kondensaattoria Multisimissä. Kuvasta 12 näkyy, että jaksojen välillä on pieni alue, jolloin jännite on

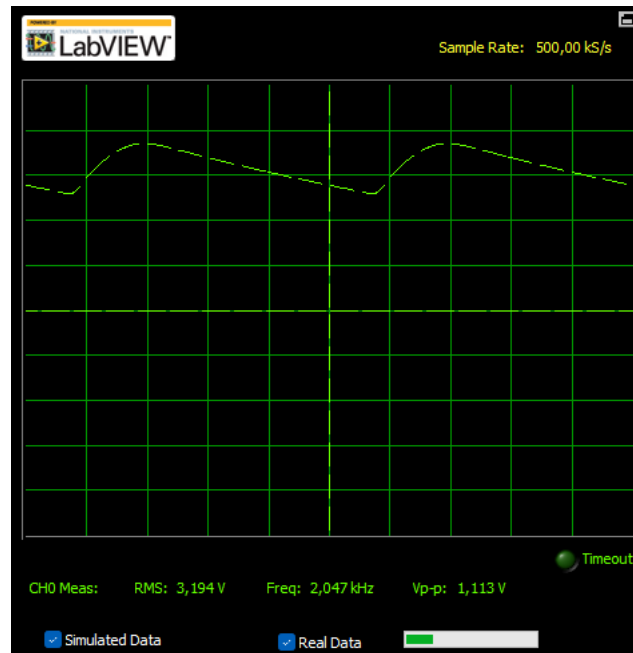
hetken nolla, sekä että amplitudi ei ole 5 V eli puolet 10 V:sta. Tämä on normaalia ja johtuu diodien kynnyksjännitteistä.



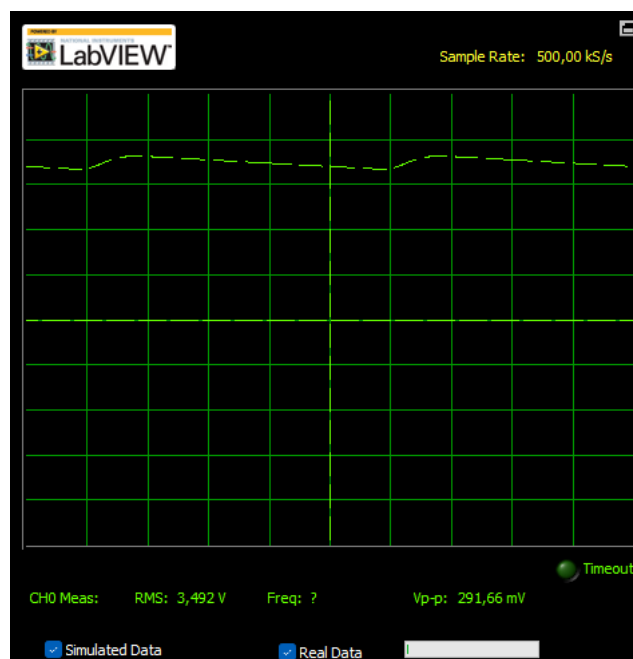
**Kuva 13.** AC-DC muunnin kondensaattorilla Multisimissä



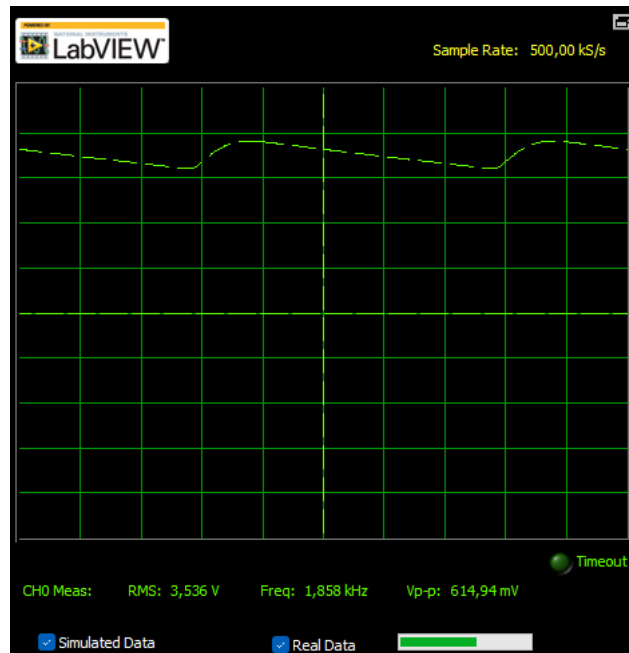
**Kuva 14.** AC-DC muunnin 1 kΩ kuormavastus ja 220 nF kondensaattori Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja



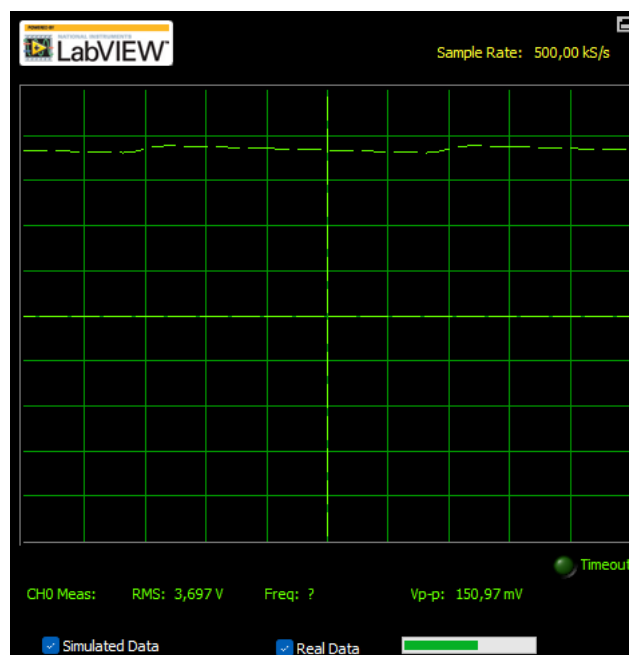
**Kuva 15.** AC-DC muunnin  $1\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $1\text{ }\mu\text{F}$  kondensaatori Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja



**Kuva 16.** AC-DC muunnin  $1\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $4.7\text{ }\mu\text{F}$  kondensaatori Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

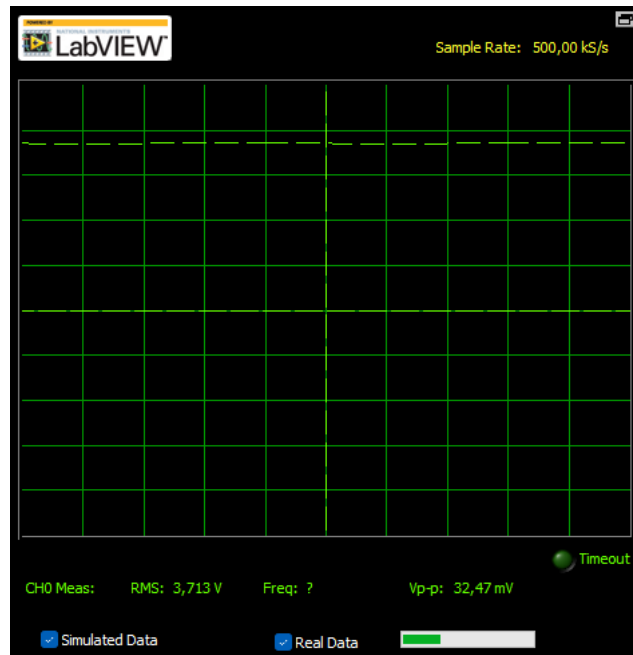


**Kuva 17.** AC-DC muunnin  $10\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $220\text{ nF}$  kondensaattori Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja



**Kuva 18.** AC-DC muunnin  $10\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $1\text{ }\mu\text{F}$  kondensaattori Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

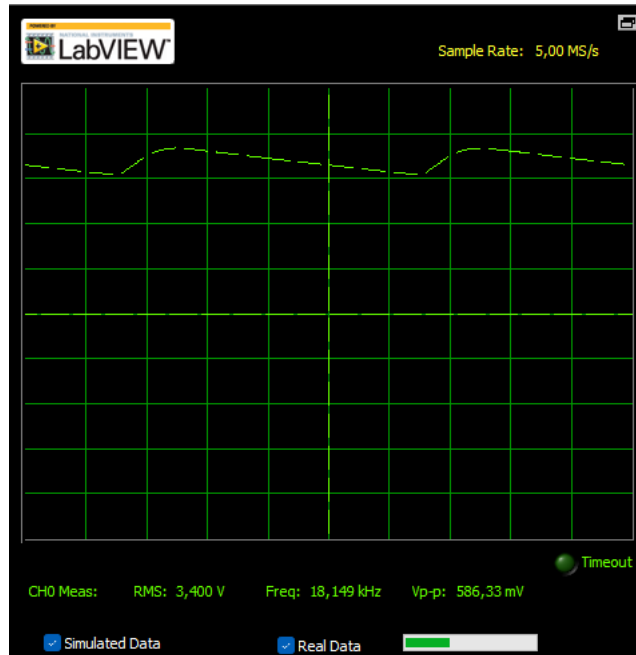




**Kuva 19.** AC-DC muunnin  $10\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $4.7\ \mu\text{F}$  kondensaattori Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

Kuvassa 13 on simuloinneissa käytettävä piiri ja kuvissa 14–19 on simuloitu kuvan 13 piiriä eri vastusten ja kondensaattorien arvoilla mitkä näkyy kuvien selosteista. Mistä eroavaisuudet kuvaajissa eri kuvaajissa siis johtuu? Syy johtaa kappaleessa 2.2 olevaan kaavaan (8). Mitä suurempi on resistanssin ja kapasitanssin tulo, sitä hitaammin kondensaattori purkautuu. Koska kondensaattori purkautuu hitaammin, sen aiheuttama jännite ei ehdi laskea huomattavasti ennen kuin vaihtojännitteen arvo on suurempi kuin kondensaattorin jännite, jolloin kondensaattori alkaa latautumaan uudelleen. Kun vastus vaihdetaan suurempaan vastukseen, virta vastuksen yli on pienempi, jolloin varauksia siirtyy hitaammin kondensaattorin levyiltä. Kun kapasitanssi on suurempi, kondensaattorien levyillä on enemmän varausta, joten sama virta tyhjentää suuremman kondensaattorin hitaammin kuin pienemmän kondensaattorin

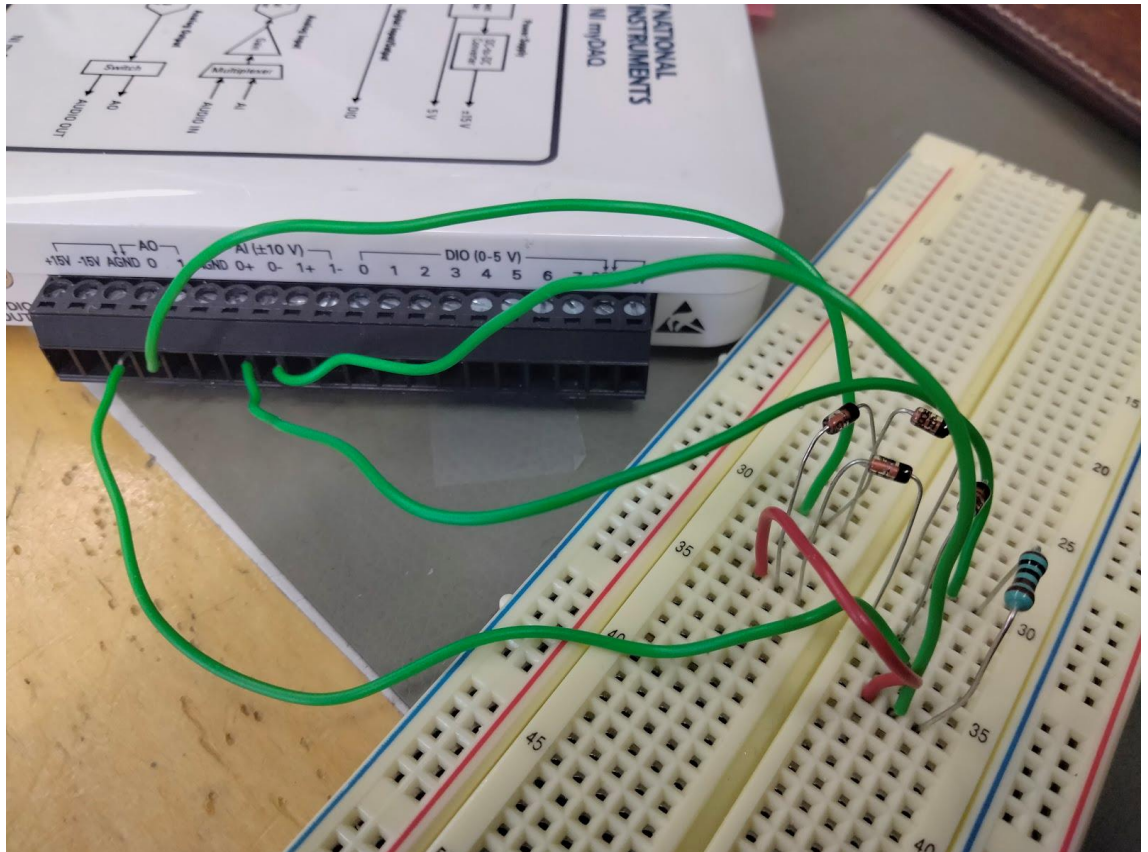
Testaa vielä kytkentä  $1\text{ k}\Omega$  vastuksella ja  $220\text{ nF}$  kondensaattorilla, mutta muuta nyt funktiogeneraattorista siniaallon taajuudeksi  $10\text{ kHz}$ .



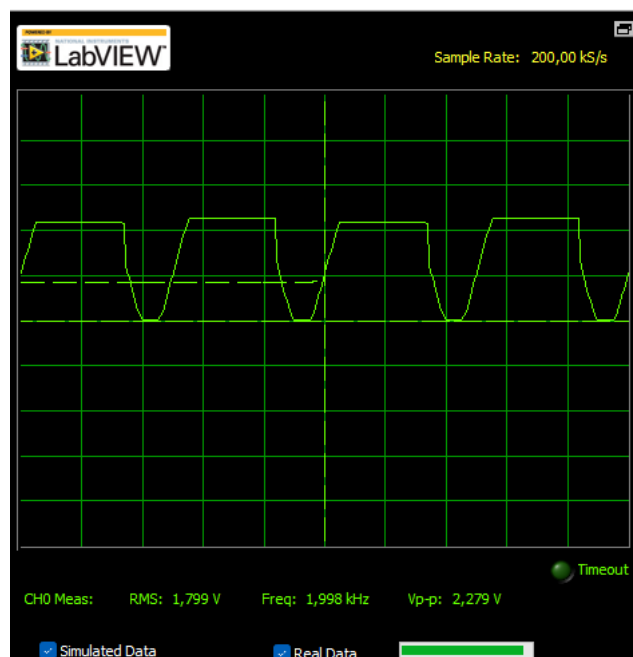
**Kuva 20.** AC-DC muunnin  $1\text{ k}\Omega$  kuormavastus,  $220\text{ nF}$  kondensaattori ja  $10\text{ kHz}$  taajuus Multisim-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

Kuvassa 20 on tehty muuten sama mittaus kuin kuvassa 14, mutta taajuus on nostettu  $10\text{ kHz}$ :iin. Mistä tämä ero kuvien 20 ja 14 välillä sitten johtuu? Koska taajuus on nyt isompi, kondensaattorilla on pienempi aika purkautua, myös tämä näkyy kaavassa 8.

Rakennetaan kytkennät nyt myDAQ:llä ja tehdään samat mittaukset kuin simuloimalla. Ensimmäisenä tehdään kytkentä  $1\text{ k}\Omega$  kuormavastuksella ilman kondensaattoria. Kun ulostuloa mittaa, pitäisi saada kuvan 22 näköiset tulokset.

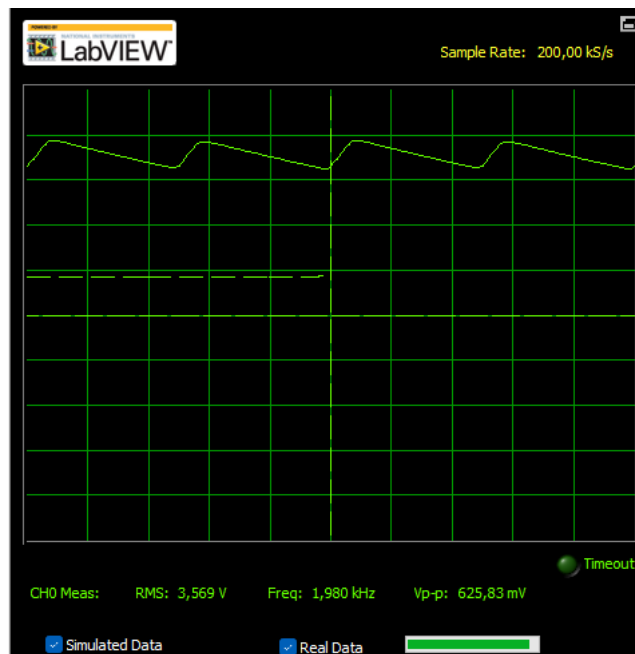


**Kuva 21.** AC-DC muunnin ilman kondensaattoria myDAQ

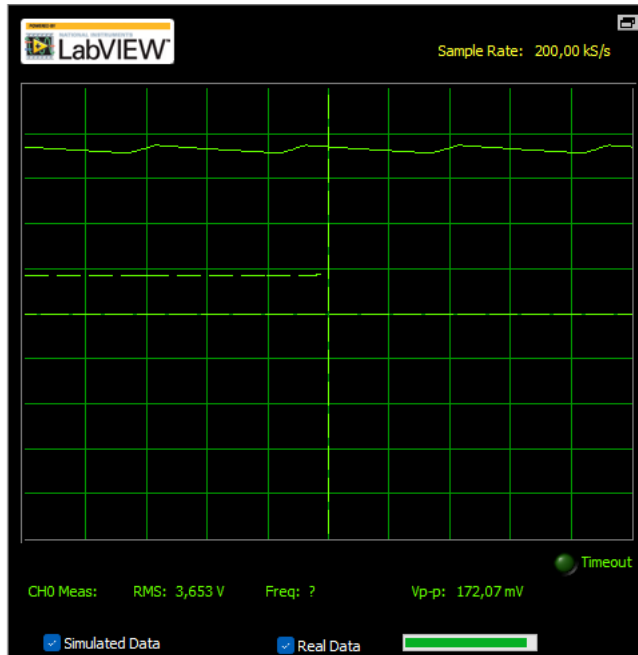


**Kuva 22.** AC-DC muunnin ilman kondensaattoria 1 k $\Omega$  kuormavastus myDAQ-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

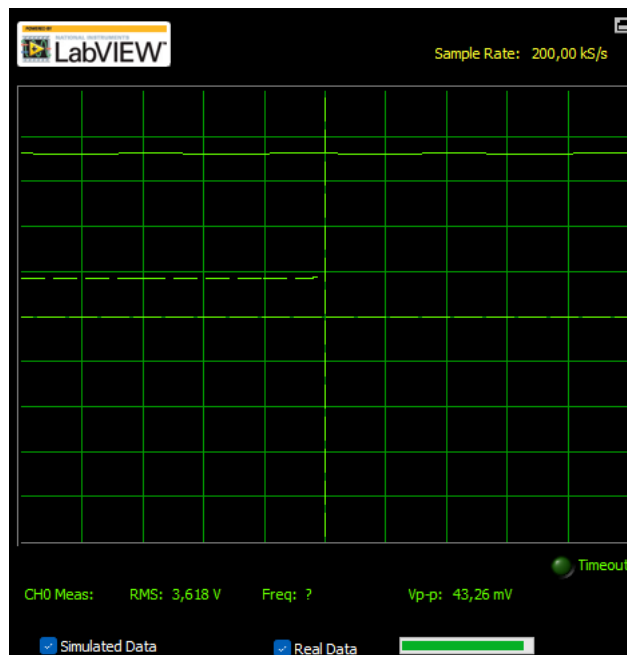
Kuvassa 21 on esimerkkikytkentä AC-DC muuntimesta ilman kondensaattoria, myDAQ mittausta varten ja kuvassa 22 on mitattu kuvan 21 piiriä myDAQ:in oskilloskoopilla. Kuvassa 22 on selvästi jotain vialla, sillä se leikkaantuu vääristä paikoista. Leikkaantuminen johtuu myDAQ:n 2 mA virtarajoituksesta. MyDAQ ei pysty antamaan 2 mA suurempaa virtaa omasta ulostulostaan. Koska kuormavastus on 1 k $\Omega$ , ei piirin ulostuloon voi tulla 2 V suurempaa jännitettä 2 mA virralla. Tämä virtarajoitus täytyy pitää mielessä, kun käytetään myDAQ:iä. Tässä tehtävässä virtarajoituksen ylityksen ongelma voidaan ohittaa laskemalla myDAQ:istä tulevaa jännitettä, esimerkiksi 5 V tai nostamalla kuormavastuksen arvoa. Koska tämän myDAQ osion tarkoitus on verrata Multisimin ja myDAQ:in tulosten eroavaisuuksista, sekä oppia rakentamaan virtapiirit, joten ohitetaan 1 k $\Omega$  kuormavastuksen mittaukset ja siirrytään suoraan mittaamaan 10 k $\Omega$  virtapiirit. Vaihdetaan siis 1 k $\Omega$  vastus 10 k $\Omega$  vastukseen ja lisätään tässä vaiheessa myös 220 nF kondensaattori kuormavastuksen kanssa rinnankytkentään.



**Kuva 23.** AC-DC muunnin 10 k $\Omega$  kuormavastus ja 220 nF kondensaattori myDAQ-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja



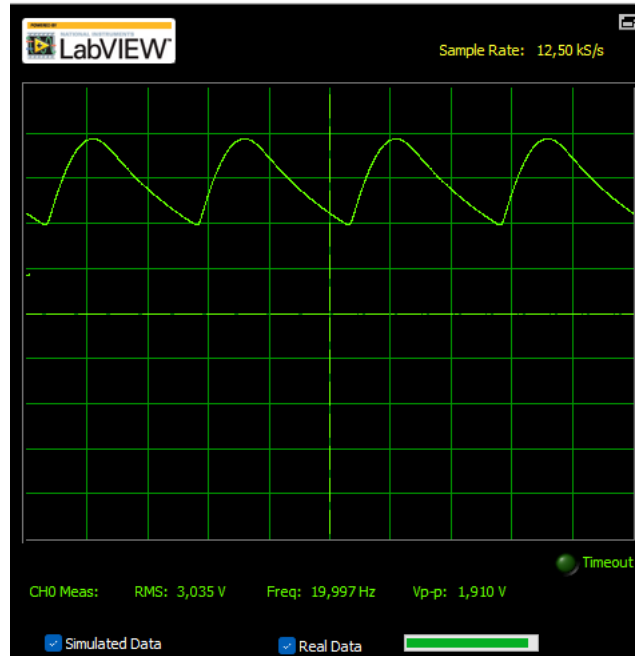
**Kuva 24.** AC-DC muunnin  $10\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $1\ \mu\text{F}$  kondensaattori myDAQ-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja



**Kuva 25.** AC-DC muunnin  $10\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $4.7\ \mu\text{F}$  kondensaattori myDAQ-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

Kuvissa 23–25 näkyy, miltä oskilloskoopilla mitattujen kuvaajien pitäisi suurin piirtein näyttää, kun AC-DC muuntimessa käyttää kuvateksteissä mainittuja komponenttien arvoja. Kuvat näyttävät erilaisilta, sillä myDAQ:in maksimi näytteenottotaajuus  $200\text{ kS/s}$  on huomattavasti pienempi kuin Multisimin. Jos verrataan RMS ja Vp-p arvoja, ovat ne kuitenkin kutakuinkin samoja virherajat huomioiden Multisim simulointien kanssa.

Vaihdetaan sisäänmenosignaalin taajuudeksi 20 Hz. Tästä saadaan alla oleva kuva 26. Kuva 26 on nyt paljon selvempi, sillä pienempi näytteenottotaajuus riittää, kun kyseessä on paljon suurempi aikaikkuna.



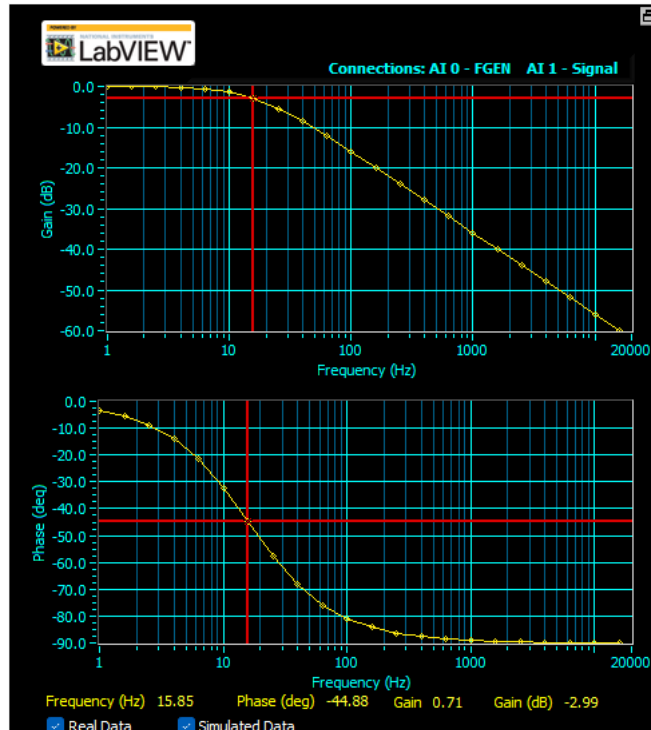
**Kuva 26.** AC-DC muunnin  $10\text{ k}\Omega$  kuormavastus ja  $4.7\ \mu\text{F}$  kondensaattori 10 Hz myDAQ-oskilloskoopin esimerkkikuvaaja

## LIITE 2A

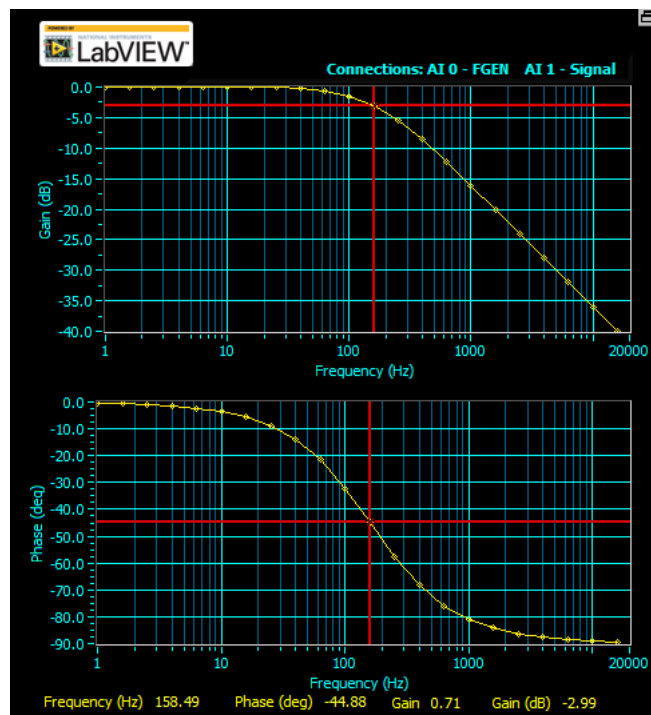
Käytä sisäänmenosignaalin vaihtojännitettä 1 V amplitudilla ja 1 kHz taajuudella. Ota talteen kuvat bodeanalyysaattorista. RL-suodattimen kytkentä yksinkertaisesti koostuu vastuksen ja käämin sarjankytkennästä.

1. Rakenna RL-suodattimen kytkentä Multisimissa. Kytke käämi maahan ja vastus sisääntulosignaaliin. Kytke herätekanava signaalin sisääntulosta maahan ja vastekanava vastuksen yli. Tee mittaukset vastuksille arvoilla 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$  ja 100  $\Omega$ , kun käämi on 10 mH.
2. Laske teoreettiset arvot kytkennöille ja vertaa niitä bodeanalyysaattorin tuloksiin. Bodeanalyysaattorissa raja-arvon voi tarkistaa, kun kursorin valitsee päälle kursoriasetuksista.
3. Valitse yksi kytkentä ja vaihda vastekanava käämin yli. Vertaa bodeanalyysaattorin-kuvaajaa kuvaajaan, joka saatiin samasta kytkennästä, kun vastekanava oli vastuksen yli.
4. Rakenna kytkentä myDAQ:llä ja toista kohdan 1 mittaukset ja vertaa saatuja tuloksia kohdan 1 simuloituihin tuloksiin. Selitä, mistä eroavaisuudet johtuvat.

## LIITE 2B

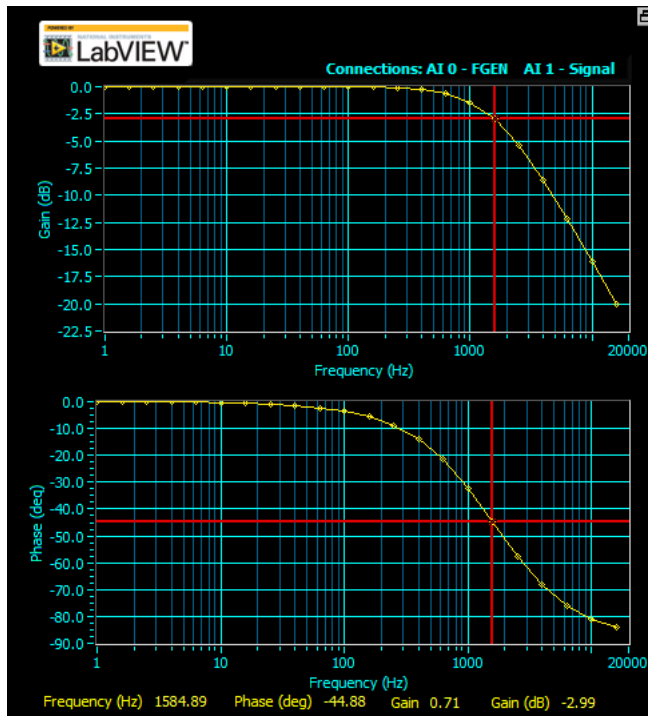


Kuva 27. RL-piiri 1  $\Omega$  vastus ja 10 mH käämi Multisim bodeanalysointikuvaaja



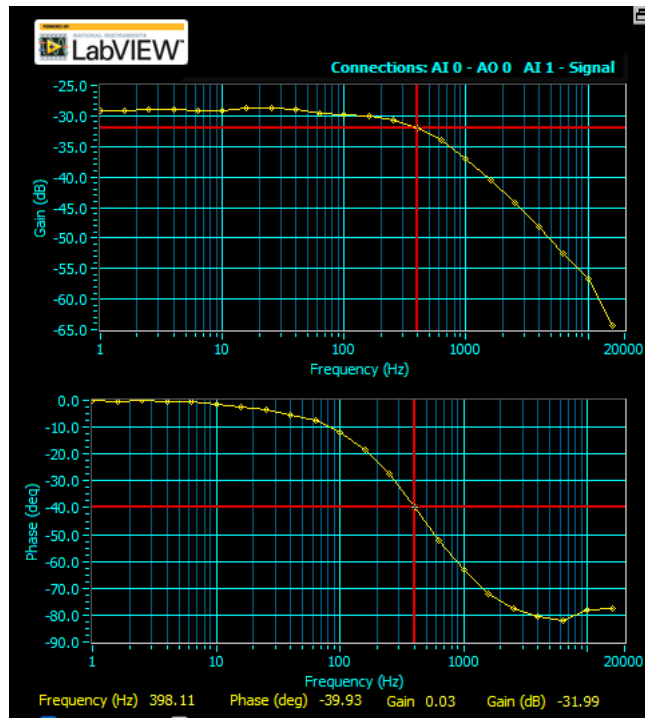
Kuva 28. RL-piiri 10  $\Omega$  vastus ja 10 mH käämi Multisim bodeanalysointikuvaaja



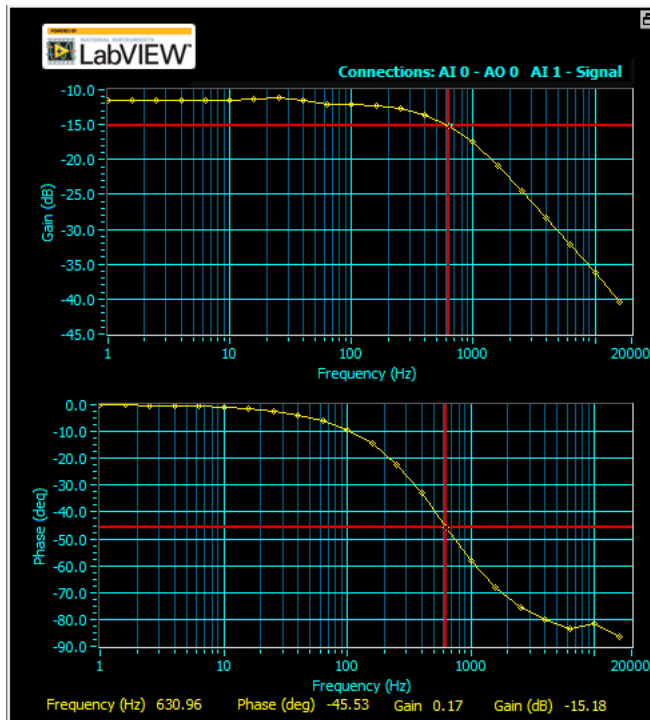


**Kuva 29.** RL-piiri  $100\ \Omega$  vastus ja  $10\ \text{mH}$  käämi Multisim bodeanalysointikuvaaja

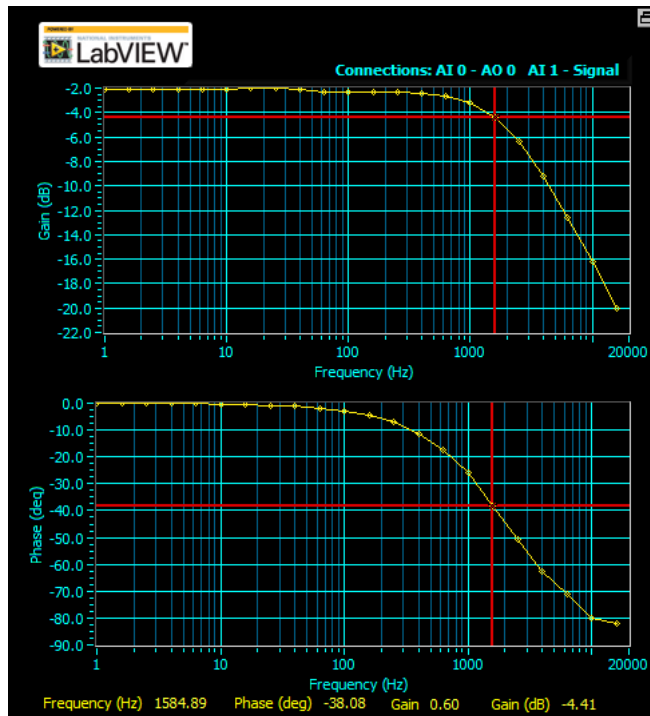
Kuvissa 27–29 on simuloitu RL-piiriä käyttäen kuvateksteissä mainittuja komponentteja. Kun kaavasta 38 lasketaan teoreettiset arvot, resistansseille  $1\ \Omega$ ,  $10\ \Omega$  ja  $100\ \Omega$ , kun käämi on  $10\ \text{mH}$ , saadaan tuloksiksi  $\approx 15.915$ ,  $\approx 159.154\dots$  ja  $\approx 1591.549$ . Kun näitä verrataan simuloituihin tuloksiin, voidaan huomata, että ne ovat kutakuinkin samat. Jos otetaan huomioon, että kursorit eivät ole kuvaajissa tasan  $3\ \text{dB}$  kohdalla, voidaan päätellä tuloksien olevan oikein. Tässä kohtaa voi simuloida taajuusvasteen käämin yli. Tulokseksi saadaan käännteinen kuvaaja siitä, kun taajuusvaste otetaan vastuksen yli, sillä jännite jakautuu pelkästään käämin ja vastuksen yli. Eli näillä on sama rajataajuus, sekä vahvistuksen kasvaessa vastuksen yli vahvistus pienenee käämin yli sekä toisin päin. Seuraavaksi on samat mittaukset myDAQ:llä.



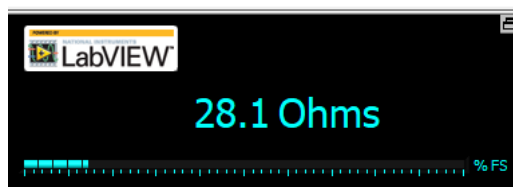
Kuva 30. RL-piiri  $1 \Omega$  vastus ja  $10 \text{ mH}$  käämi myDAQ bodeanalysaattori-kuvaaja



Kuva 31. RL-piiri  $10 \Omega$  vastus ja  $10 \text{ mH}$  käämi myDAQ bodeanalysaattori-kuvaaja



**Kuva 32.** *RL-piiri 100  $\Omega$  vastus ja 10 mH käämi myDAQ bodeanalysointikuvaaja*  
 Kuvissa 30–32 on mitattu fyysiset piirit myDAQ:llä käyttäen kuvateksteissä mainittuja komponentteja. MyDAQ-kuvaajat eroavat nyt aika paljon Multisim-kuvaajista, mutta näihin eroihin löytyy hyvin helposti vastaus. Nämä erot johtuvat käämin yli olevasta resistanssista, joka johtuu johteesta, josta käämi on tehty. Tämä resistanssi voidaan mitata yleismittarilla. Näissä mittauksissa käytettiin käämiä, jonka resistanssi näkyy alla olevasta kuvasta 33.



**Kuva 33.** *10 mH käämin resistanssi*

Kun tämä resistanssi otetaan huomioon, tulokset käyvät järkeen. Kun tuloksia verrataan toisiinsa, voidaan huomata, että vastuksen resistanssin kasvaessa rajataajuudet lähestyvät laskettua arvoa. Tämä johtuu siitä, että vastuksen resistanssin kasvaessa käämin resistanssi on pienempi osuus koko piirin resistanssista. Myös se, miksi vaimennus alkaa alle 0 dB selittyy tämän resistanssin ansiosta. Kuvaajat muodostuvat siten, että jännitettä vastuksen yli verrataan jännitteeseen sekä vastuksen ja käämin yli. Kun vastus on kovin pieni kuten 1  $\Omega$  vastuksen kohdalla, käämi vie suuremman osuuden jännitteestä, jolloin jännite koko piirin yli on paljon suurempi kuin pelkän vastuksen yli ja vahvistus saa siten pienen arvon.