

ELEKTRİK DEVRE TEMELLERİ LAB.

DENEY FÖYÜ

EYLÜL 2010

DENEY 1: OSİLOSKOP, AVOMETRE ve İŞARET ÜRETECİ KULLANIMI

Deneyin Amacı:

Bu deneyde elektrik devrelerindeki akım, gerilim, direnç gibi fiziksel büyüklüklerin ölçülmesi konusu incelenecektir. Öncelikle bu büyüklüklerin ölçülmesinde kullanılan ölçü aletlerini tanıtılacak, ardından basit bir elektrik devresi deney setinde kurularak devredeki akım ve gerilim değerleri ölçülecektir. Bu değerlerin Kirchhoff'un akım ve gerilim yasalarına uyup uymadığı kontrol edilecektir. Ayrıca elektriksel büyüklüklerin zamana göre değişim biçimlerini incelemede çok büyük önemi olan osiloskopta gerilim, akım, zaman ve frekans ölçmelerinin nasıl yapılabileceği gösterilecektir.

Önbilgi:

Bir elektrik devresindeki temel büyüklükler devre elemanları üzerindeki akım ve gerilim değerleridir. Bu büyüklükleri ölçmek için, aslında kendileri de elektrik devreleri olan ölçü aletlerini kullanırız. Yani, akım ölçmek istiyorsak ölçeceğimiz akımı, üzerinden geçen akımın değerini bize bildirecek olan bir devreden (ölçü aletinden) geçirmemiz gerekir. Yani; ölçü aletini devreye seri olarak bağlamalıyız. Gerilim ölçmek istiyorsak, uçlarına uygulanan gerilim değerini gösteren bir devreye (ölçü aletine) ölçülmesini istediğimiz gerilimi uygulamamız lazımdır. Yani; ölçü aletini devreye paralel olarak bağlamalıyız. Bu ölçü aletleri aşağıda tanıtacağımız avometre ve osiloskoptur. Avometre üzerindeki anahtarı değiştirmek suretiyle isteğe göre bir ampermetre ya da voltmetre olarak kullanılabilen bir ölçme aletidir. Ayrıca elemanların direnç değerlerini de ölçebildiğinden **A(mper)V(olt)O(hm)METRE** ismini almıştır. Osiloskop ise yalnızca gerilim ölçer; ancak buna karşın devredeki bir gerilimin zamana göre değişimi ayrıntılarıyla gösterir.

Genel olarak ölçme eylemindeki temel problem ölçme aletinin ölçüm yaptığımız sistemi etkilememesini sağlamaktır. Halbuki her ölçü aletinin bir iç direnci olduğundan, akım ölçerken bu iç direnç akımını ölçeceğimiz elemana seri, gerilim ölçerken ise elemana paralel bağlanarak devredeki elektriksel büyüklükleri değiştirir. Bu kaçınılmaz sorunu etkisizleştirmenin yolu ampermetre için iç direncin çok küçük, voltmetre için ise çok büyük olmasını sağlamaktır. Bunu daha net görebilmek için ölçü aletinin sistemden çektiği enerjiye bakabiliriz. Enerji $\int_0^{\infty} v i dt$ ile ifade edilir. O halde; ölçü aletinin sistemden az enerji çekmesini istiyorsak ya geriliminin ya da akımının çok küçük olması gerekir. Voltmetre için aksini yapmak ölçeceğimiz büyüklüğü değiştirmek olduğundan akımı azaltmayı tercih ederiz.

Bunun için de $i = \frac{V}{R}$ bağıntısı gereği iç direnci büyük tutarız. Ampermetre için ise gerilimi azaltmak amacıyla $V = iR$ bağıntısı gereği iç direnci küçük tutmalıyız. Böylece ölçmedeki hatayı azaltabiliriz. Bu sebeple avometrelerin iç dirençleri akım girişlerinde çok küçük, gerilim girişlerinde ise çok büyüktür.

Avometre:



Şekil 1.1

Deneyler boyunca analog ve dijital olmak üzere iki tür avometre kullanacağız. Şekil 1.1’de analog bir avometrenin görüntüsü verilmiştir. Analog avometrenin sol ve sağ tarafındaki anahtar ile ölçülecek işaretin özellikleri belirtilir ve ölçek ayarlanır. Örneğin doğru akım ölçülecekse sol taraftaki anahtar DC’ye, sağ taraftaki anahtar ise avometrenin ibresi göstereceği bir değer gösterecek şekilde en alttaki yedi kademeden birine getirilir. Böylece ölçek ayarlanmış olur. Ölçülecek büyüklük örneğin 3 mA civarında ise sağ taraftaki anahtar 5 mA-DC’ye ayarlandığı müddetçe ibre ölçek üzerinde bir değer gösterir. Bu durumda ölçülen doğru akım değeri 0-50 DC göstergesinden 50 değeri 5 mA’ye karşı gelecek şekilde oranlanarak okunur. Yani ibre göstere üzerinde 27’yi gösterirse sağ taraftaki anahtar 5mA’ye ayarlı olduğundan $\frac{5}{50} \cdot 27 = 2,7$ (2,7 mA) olarak okunmalıdır. (AC yapılan ölçümlerde okunan değerler etkin değerlerdir).

Kullanacağımız bir dijital avometrenin görüntüsü de Şekil 1.2’de verilmiştir. Görüldüğü gibi yine bir ayar düğmesi ile ne ölçeceğimizi belirtmemiz gerekir. Daha sonra gerilim ya da direnç ölçülecekse kullandığımız probelardan (probe: ölçü aleti ile devre arasında elektriksel

bağlantıyı sağlayan parça) birini ölçü aletinin COM girişine diğerini ise V girişine takmalıyız. Akım ölçmek için ise problardan birini yine COM girişine diğerini ise 10A girişine takmalıyız. Akım girişi 10 ampere sigortalanmıştır. Deney boyunca bu girişten 10 amperden yüksek akımları geçirmememiz gerekir.



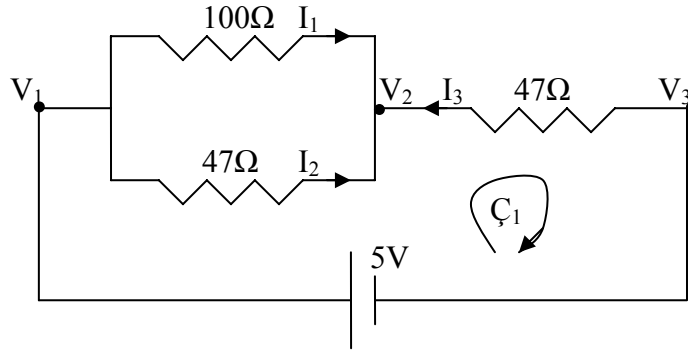
Şekil 1.2

Kirchhoff'un akım ve gerilim yasalarının sınanması:

Bildiğiniz gibi elektrik devre teorisindeki iki temel yasa bulunur. Kirchhoff'un akım yasası (KAY) dediğimiz yasaya göre bir elektrik devresinde belirlediğimiz bir kapalı yüzeyden dışarı doğru çıkan akımların toplamı sıfırdır. Bu yasaya eşdeğer bir yasa bir düğümden çıkan akımların toplamı sıfırdır şeklinde ifade edilebilir. Kirchhoff'un gerilim yasası (KGY) olarak adlandırılan diğer bir yasa ise bir devre elemanı üzerindeki gerilimin, elemanın uçları arasındaki mutlak gerilimlerin farkı olduğunu söylemektedir. Burada mutlak gerilim devrede belirlenen herhangi bir referans noktasına göre belirlenir. Bu yasaya eşdeğer olarak devrede bir çevre boyunca gerilimlerin toplamının sıfır olacağı söylenebilir.

Deneyin Yapılışı:

Şekil 1.3'teki devreyi deney setinizde kurunuz. 5 V değerindeki doğru gerilimi deney setinin üzerindeki kaynaktan alınız. Kirchhoff'un gerilim yasasının doğruluğunu sınamak için avometre ile V_1-V_2 ve V_2-V_3 gerilimlerini ölçünüz ve KGY'nin \mathcal{C}_1 çevresi için geçerli olduğunu gösteriniz.

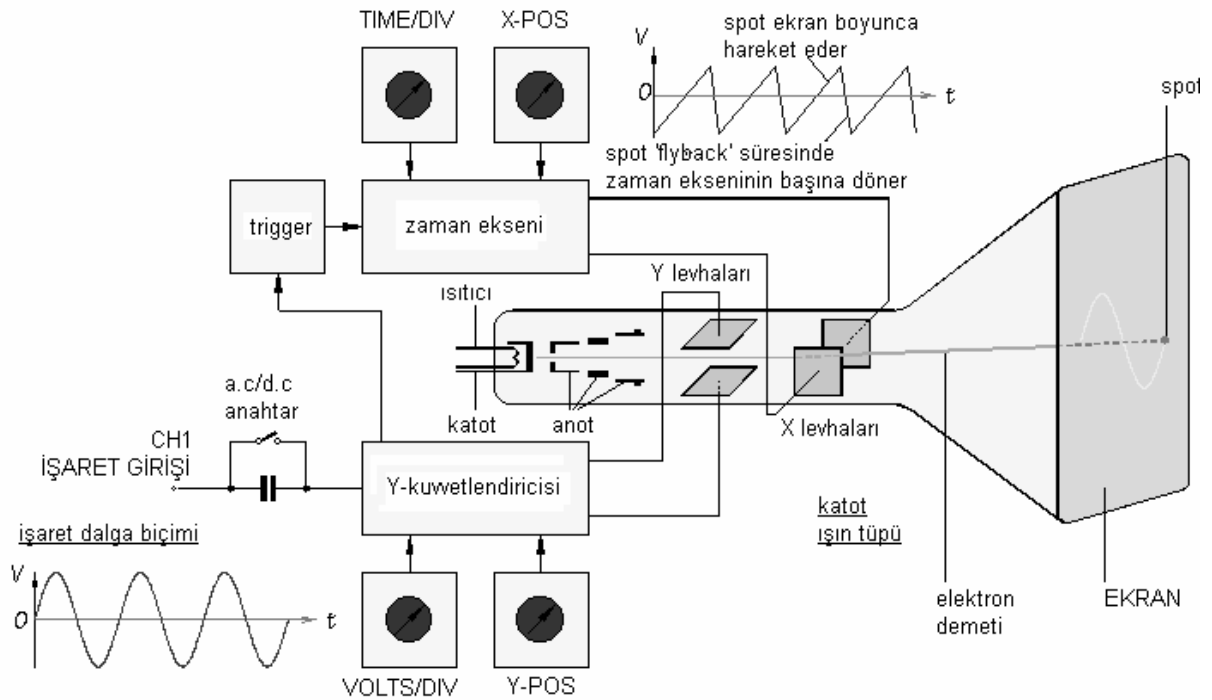


Şekil 1.3

Kirchhoff'un akım yasasının doğruluğunu sınamak için avometre ile I_1 , I_2 ve I_3 akımlarını ölçünüz. KAY'nin V_2 düğümü için geçerli olduğunu gösteriniz.

Osiloskop:

Osiloskopların en önemli kısmı, televizyon tüplerinin benzeri olan Şekil 1.4'te çevre elemanlarıyla birlikte gösterilen katot ışınlı tüptür. Katot ışınlı tüp, havası boşaltılmış cam bir tüptür. Ekranının iç yüzeyine fluoressan bir madde sürülmüştür.



Şekil 1.4 Osiloskoptaki elektron tabancası ve çevre elemanlarıyla bağlantıları

Katod ışınlı tüpün başlıca kısımları:

- Elektron Tabancası
- Düşey (Y) ve Yatay (X) saptırıcılar (levhalar)
- Ekran

Elektron tabancası elektronların meydana gelmesini ve kontrolünü sağlamaktadır. Elektron tabancasının katodu, yüksek sıcaklıktadır ve elektron yayar. Izgara gerilimlerinin kontrolüyle ekrana düşen elektron demetinin ışık şiddeti (intensity) ayarı yapılabilmektedir. Bu ise ızgaraya negatif gerilim uygulayarak sağlanmaktadır. Anotlar pozitif gerilimdedir. Bu nedenle elektron demetinin odak ayarı ve hızlandırılmaları, anot ile sağlanmaktadır. Elektron tabancasından, şiddeti ayarlanmış, odaklanmış ve hızlandırılmış olarak çıkan elektronlar, düşey ve yatay saptırma levhalarının arasından geçerek ekranın iç yüzeyine ulaşırlar. Ekranın iç yüzeyindeki fluoresan madde nedeniyle, iç yüzeye çarpan elektron demeti ekranın dışında yeşil bir ışık noktası (spot) olarak görünür. Düşey ve yatay levhalara hiçbir gerilim uygulanmamışken ışıklı nokta ekranın tam ortasına gelir. Bu levhalara 20-50 V arası gerilimler uygulayarak ışıklı nokta ekranın istenilen bir noktasına getirilebilir.

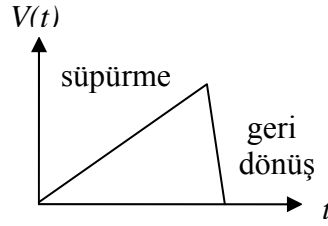
Düşey ve Yatay Kuvvetlendiriciler

Osiloskopta ölçülmek istenen büyüklükler çok küçükse, bu takdirde ekranda çok küçük bir şekil görülmektedir. Ölçülmek istenen işaretin ekranda uygun bir büyüklükte görülebilmesi için, işaret önce kuvvetlendirilir; daha sonra levhalara uygulanır. Böylece osiloskopta küçük genlikli işaretlerin ölçülmesi de sağlanmış olmaktadır; daha açıkçası, osiloskobun duyarlılığı artırılmıştır.

Osiloskopta düşey ve yatay kuvvetlendiricilerin kuvvetlendirme katsayıları VOLTS/DIV, TIME/DIV düğmeleriyle ayarlanabilmektedir. Gerilim ve zaman okumasında hata olmaması için bunlarla ilgili düğmelerin kalibrasyon konumunda olmasına dikkat edilmelidir.

Yatay Süpürme (Tarama) Devresi

Osiloskobun önemli kısımlarından birisi de yatay süpürme devresidir. Bu kısım zamanla testere dişi bir işaret (gerilim) üreten bir osilatör olup, bu gerilim osiloskobun yatay saptırma levhalarına uygulandığında, düşey levhalarda bir gerilim yokken ışıklı nokta ekranda orta kısımda düz bir yatay çizgi (zaman eksenini) olarak görülür. Düşey levhalarda zamanla değişen bir işaret olup yatay levhalara işaret uygulanmamışken ekranda düşey bir çizgi görülmektedir. Yatay levhalara testere dişi gerilim, düşey levhalara da zamanla periyodik olarak değişen bir gerilim: sinüsoidal, üçgen, kare dalga, vb uygulandığında ekranda düşey levhalara uygulanan gerilim görülmektedir. Düşeye ve yataya uygulanan işaretler birlikte senkron olurlarsa, ekrandaki işaret duruyormuş gibi görünür. Aksi halde ekrandaki işaret sürekli olarak sağa ya da sola doğru kayar.

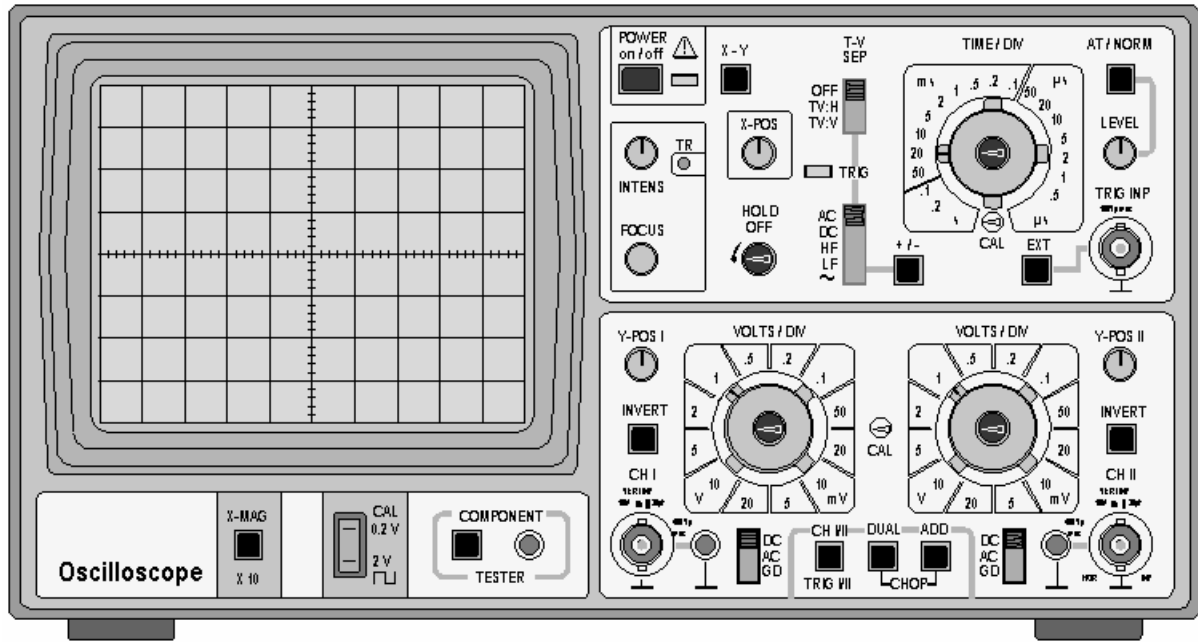


Şekil 1.5 Yatay süpürme işareti

Yatay süpürme devresinin ürettiği geriliminin biçimi şekil 1.5'teki gibi olup, gerilim (0, T) aralığında zamanla orantılı olarak değişir.

Güç Kaynağı

Osiloskopun çalışmasını sağlayan iki tür DC (doğru akım) gerilim kaynağı vardır. Bunlardan biri 10 kV' un üzerinde gerilim verir ve katot tütünün çalışmasında kullanılır. Ötekisi ise, alçak gerilim kaynağı olup, osiloskop kuvvetlendiricileri ile süpürme gerilimi devreleri için kullanılır.



Şekil 1.6 Bir Osiloskobun ön paneli

Osiloskobun Çalıştırılması

1. Osiloskobun açma-kapama (ON-OFF) anahtarı kapalı konumdayken , odaklama (FOCUS) ve ışık şiddeti (INTENSITY) düğmeleri en küçük konumlarda olmalı.
2. Düşey ve yatay konumu kontrol düğmeleri yaklaşık olarak ortalarında olmalı.

3. Başka bir işaretle senkronizasyon sağlamak amaçlı (EXT) düğmesi, dışarıdan alınan herhangi bir işarete göre senkron olunmak istenmediği sürece kapalı konumunda olmalı.
4. Yukarıda belirtilen hususlara dikkat ettikten sonra osiloskobun fişini şehir şebekesine bağlayınız.
5. Açma-kapama (ON-OFF) anahtarını ON konumuna alınız.
6. Osiloskop ısınmaya kadar bekleyiniz. Daha sonra ışık çizgisi ekranda görülebilecek kadar INTENSITY düğmesiyle ışık şiddetini ayarlayınız. Eğer çizgi ekranda görülüyorsa, X-Y POSITION diye belirtilen konum kontrol düğmeleri yardımıyla, ışık çizgisini bulmaya çalışınız. Daima, INTENSITY' yi mümkün olduğu kadar küçük seviyelerde tutunuz. Çünkü, ışıklı çizgi çok parlak olursa ekranın fluoresan maddesi yanabilir.
7. Odaklama (FOCUS) düğmesi ile ışıklı çizginin netliğini sağlayınız.
8. Konum kontrollerini X-Y POSITION kullanarak çizgiyi ortalayınız.
9. AT/NORM düğmesini kapalı konuma getirerek tetikleminin otomatik olarak yapılmasını sağlayınız.
10. TIME/DIV düğmesini 10 ms (yada daha az) konuma alınız.

Bütün bu işlemlerden sonra osiloskop, ölçmeler için kullanılmaya hazırdır.

Gerilim Ölçme

Osiloskop bir voltmetre gibidir. Süpürme gerilimi varken düşey girişi uygulanan, örneğin sinüsoidal bir gerilimin zamana göre değişimi ekran üzerinde görülür. Düşey sapmanın uzunluğu okunarak giriş işaretinin tepeden tepeye değeri okunabilir. Burada istenirse işaretin efektif değeri de hesaplanabilir.

Test Direnci Kullanarak Akım Ölçme

Osiloskoplar genellikle gerilim ölçmeye yararlar. Dolaylı olarak akım ölçülebilir. Akım ölçmenin bir yolu, değeri bilinen lineer bir direnç kullanarak bunun uçlarındaki gerilimi ölçüp, Ohm yasasından yararlanarak içinden geçen akımı hesaplamaktır. Endüktans özelliği göstermeyen, 1 Ohm değerinde direnç seçilir. Bu durumda gözlenen gerilim, ölçülmek istenen akımla aynı biçimde olur ve aynı sayısal değere sahip olur.

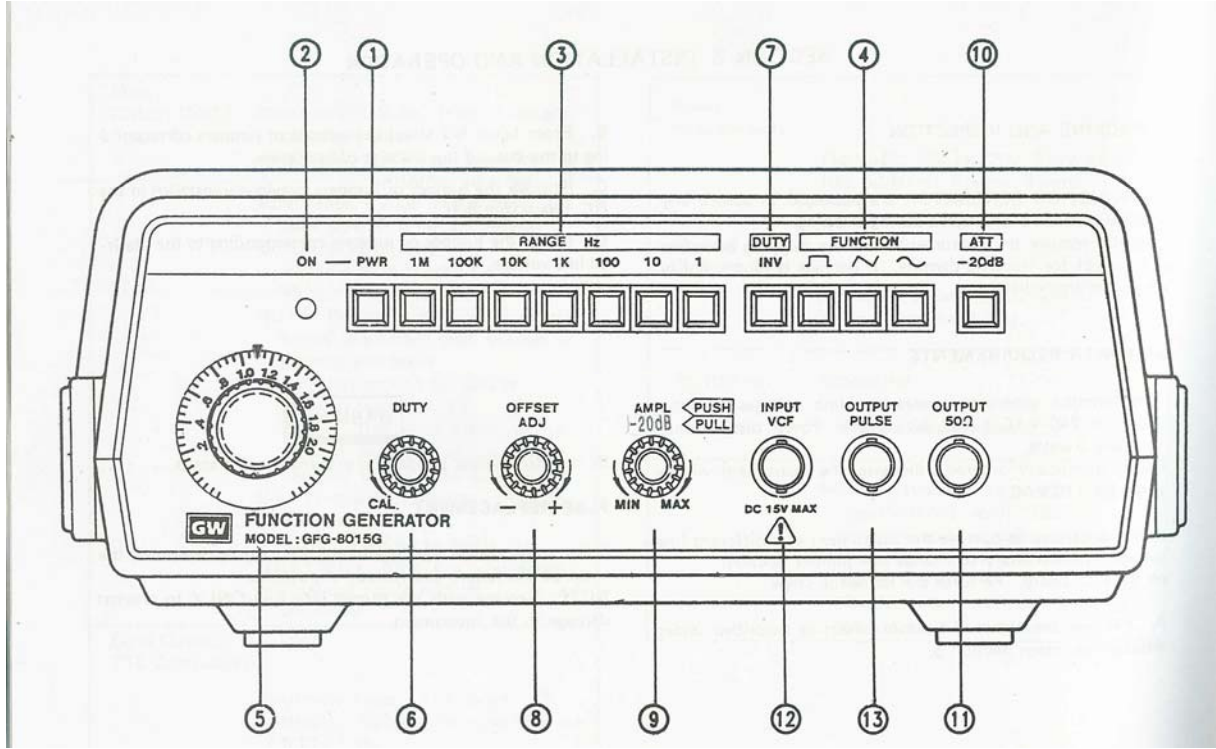
Zaman Ölçme

Süpürme gerilimi varken osiloskobun zaman devresinin TIME/DIV anahtarıyla dalga şekli ekranda elde edilir. Şekil, yatay bölmeler okunabilecek uygun bir yere getirilir. Bu durumda, zaman = yatay uzunluk * (time/div) olmaktadır.

Frekans Ölçme

Periyodik bir dalganın frekansını ölçme, süpürme geriliminin periyodundan yararlanarak mümkün olur. Periyodik dalganın periyodu T ise, frekansı $f = 1/T$ olur. Periyot, zaman ölçmesinde anlatılan yolla bulunduktan sonra; frekans, periyodun çarpmaya göre tersi alınarak hesaplanır.

İşaret Üreteci (Fonksiyon Jenaratörü)



Şekil 1.7 İşaret Üreteci

İşaret üreteci, belirli üst ve alt sınırlar içinde, istenilen genlik ve frekans değerinde sinüs, kare, üçgen gibi dalga şekillerini üretebilir.

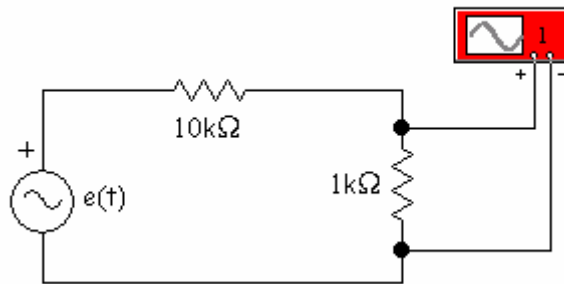
Frekans ayarlarken önce çalışılacak alan seçilir (RANGE); sonra da FREQUENCY düğmesiyle hassas ayar yapılarak istenilen frekans elde edilir.

- 1 Açma kapama düğmesi
- 2 İşaret üretecinin çalışır durumda olup olmadığını gösteren düğme
- 3 Frekans kademesi düğmeleri
- 4 Dalga şekli düğmeleri
- 5 Çarpan katsayı (Frekans kademesindeki değeri 0,2 ile 2,0 arasındaki bir sayı ile çarpılarak çalışmayı istediğimiz frekans değerine ulaşmamızı sağlar)

- 6 Dalga şeklinin zaman simetrisini kontrol eden düğme (düğme CAL durumundaysa dalga şekli %100 simetriktir.)
- 7 Zaman simetrisini eviren düğme
- 8 Çıkış işaretinin DC düzeyini ayarlamaya yarayan anahtar
- 9 Çıkış işaretinin genliğini kontrol eden düğme
- 10 Bu düğmeye basıldığında çıkış işaretinde 20 dB'lik bir zayıflama meydana gelir.
- 11 Kare, üçgen, sinüs dalga şekillerinin alınabildiği çıkış
- 12 Frekans aralığını dışarıdan taramak (VCF: voltage-controlled frequency) için kullanılan giriş
- 13 TTL lojik devrelerini sürmek için kullanılan çıkış

Deneyin Yapılışı

1. Osiloskop çalıştırılır ve daha sonra işaret üretici ile bağlantısı yapılır.
2. İşaret üreticiden elde edilecek sinüsoidal ve kare dalga işaretleri için gerilimleri 1V frekansları da $f = 800 \text{ Hz}$ ve 10 kHz olarak ayarlayınız. Osiloskop ile işaret üretici arasındaki bağlantıyı sağlayarak osiloskop ekranında görülen işareti düşey ve yatay kuvvetlendirme katsayılarını göz önüne alarak çiziniz.
3. Şekil 1.8'deki düzeneği kullanarak 1V'luk $f = 1 \text{ kHz}$ frekansında sinüsoidal gerilim için devreden geçen akımı osiloskop kullanarak bulunuz. Bulduğunuz akım değerini ve devrede kullanılan direnç değerleri kullanarak sinyal üreticiden elde edilen gerilim değerine ulaşmaya çalışınız.



Şekil 1.8 Devreden geçen akımın osiloskop kullanılarak ölçülmesi

DENEY 2: ÇOK-UÇLU DEVRE ELEMANLARININ MATEMATİKSEL MODELLERİ

Deneyin Amacı

Çok-uçlu bir devre elemanının matematiksel modelinin ne şekilde ifade edildiğinin kavranmasıdır.

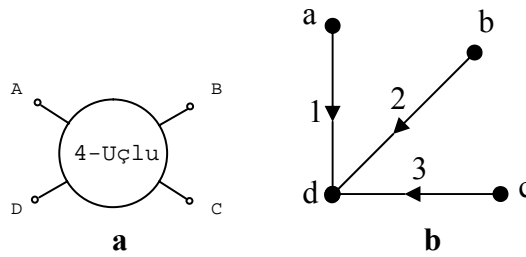
Önbilgi

Bu bölümde, bir çok-uçlunun matematiksel modelinin elde edilmesine ilişkin kısa bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler verilirken deneyde kullanılacak 4-uçlu devre elemanı gözönünde tutulmuştur.

n-uçlu bir devre elemanının bütün özellikleri, bu eleman için seçilen bir uç-grafı ile tanımlanan (n-1) tane akım ve (n-1) tane gerilim büyüklükleri arasında var olan (n-1) tane matematiksel bağıntı (denklem) ile tam olarak bellidir. Sayısı (n-1) olan bu matematiksel bağıntıya **n-uçlunun uç-denklemleri** adı verilir.

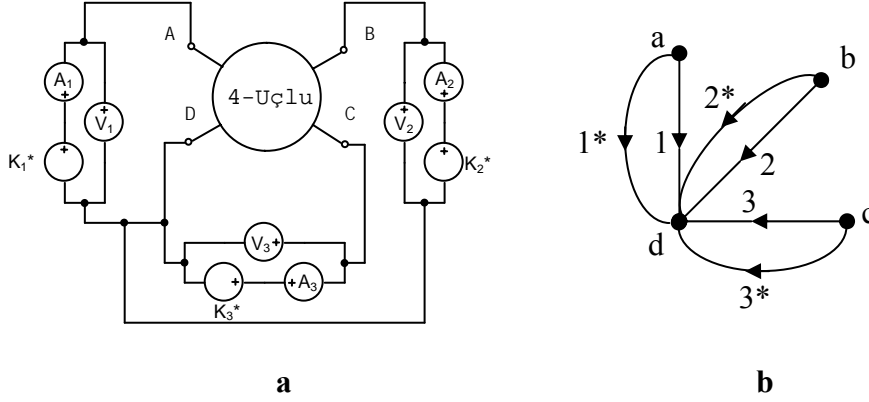
Bir n-uçlunun matematiksel modeli uç-graf uç-denklemleri ikilisiyle gösterilmektedir. Uç-graf tek olarak seçilemediğinden aynı çok-uçlu eleman için birden fazla birbirine eşdeğer matematiksel model söz konusu olmaktadır.

Bu deneyde, dirençlerden oluşan 4-uçlu devre elemanının seçilen bir T uç-grafına ilişkin uç-denklemleri ölçme yoluyla elde edilecektir. 4-uçlunun T uç-grafına ilişkin uç denklemleri elde edildikten sonra, bu 4-uçluyu oluşturan 2-uçlu dirençlerin değerleri, 4-uçlunun iç yapısı (2-uçlu dirençlerin bağlantı biçimleri) bilindiği takdirde, ölçme yoluyla elde edilen uç-denklemlerinden yararlanılarak hesaplanabilir.



Şekil 2.1

Şekil 2.1a'da verilen 4-uçlunun matematiksel modelini ölçme yoluyla elde etmek için, bir uç graf seçilmesi ve bu uç grafa ilişkin uç denklemlerinin, yapılan ölçme sonuçlarından yararlanarak, elde edilmesi gerekmektedir. T uç grafi şekil 2.1b'deki biçimde seçildiğinde ölçü aletleri (ampermetreler ve voltmetreler) ve kaynaklar (gerilim ya da akım kaynakları) Şekil 2.2a'daki gibi bağlanacaktır.



Şekil 2.2

Genel halde, çok-uçlu bir devre elemanını uyararak uçlarına bağlanacak kaynakların türü, çok uçlunun iç yapısına bağlı olup, keyfi seçilememektedir. (Örneğin, 3-uçlu ideal transformatörün matematiksel modelinin elde edilmesinde, uyarıcı kaynaklardan biri, gerilim kaynağı olarak seçilmişse; ötekini kesinlikle akım kaynağı seçme zorunluluğu vardır.) Burada uyarıcı olarak kullanılan kaynakların hepsi, gerilim ya da akım kaynakları olabilir. Öte yandan, uyarıcı kaynakların bir kısmının gerilim ve bir kısmının akım kaynağı olması da mümkündür.

Devre elemanlarının uçları arasında bağlanan akım ya da gerilim kaynaklarına ilişkin gerilim ve akımlar, şekil 2.2a'daki biçimde ölçülerek bu elemanın uç denklemleri kurulabilir. 4-uçluyu uyarıda kullanılan kaynakların hepsi gerilim kaynağı ise, 4-uçluya ilişkin uç denklemleri (1)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)'de görülen uç-değişkenleri ile kaynaklara ilişkin değişkenler arasında şekil 2.2b'deki graftan kolaylıkla yazılabilecek olan aşağıdaki bağıntılar bulunmaktadır:

$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1^*(t) \\ v_2^*(t) \\ v_3^*(t) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} i_1^*(t) \\ i_2^*(t) \\ i_3^*(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

(1) ile ifade edilen uç denklemlerinde,

a) $v_2(t)=0$ ve $v_3(t)=0$ alınması 4-uçluya ilişkin B ile D ve C ile D uçlarının kısa devre edilmesine karşı düşer. Bu durumda 4-uçluyu yalnız $K_1^*=v_1^*(t)$ gerilim kaynağıyla uyararak yeterlidir. $i_1(t)$, $i_2(t)$ ve $i_3(t)$ akımları ölçülerek, (1)'deki katsayılar matrisinin,

$$G_{11} = i_1/v_1 = -i_1^*/v_1^*, \quad G_{21} = i_2/v_1 = -i_2^*/v_1^*, \quad G_{31} = i_3/v_1 = -i_3^*/v_1^*$$

elemanları bulunur.

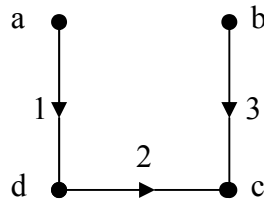
b) $v_1(t)=0$ ve $v_3(t)=0$ alınarak, a)'ya benzer biçimde, G_{12} , G_{22} , G_{32} katsayıları elde edilir. (Bu durumda, 4-uçlu yalnız $K_2^*=v_2^*(t)$ gerilim kaynağıyla uyarılmaktadır.)

c) $v_1(t)=0$ ve $v_2(t)=0$ alınarak da G_{13} , G_{23} , G_{33} katsayıları hesaplanır. (Bu durumda, 4-uçlu yalnız $K_3^*=v_3^*(t)$ gerilim kaynağıyla uyarılmaktadır.)

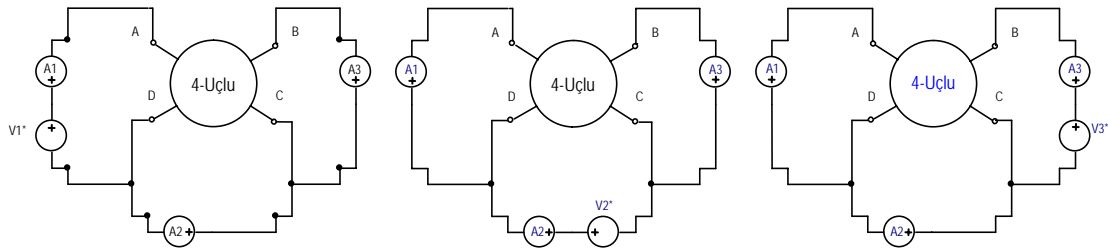
Deneyin Yapılışı

A)

Laboratuvarda verilecek olan 4-uçlunun şekil 2.3'teki gibi seçilmiş olan T_1 uç grafına ilişkin uç denklemleri (1)'deki biçimde elde edilecektir. Bunun için şekil 2.4'te gösterilen ölçme düzenleri sırasıyla kurduktan sonra, ölçme sonuçlarını tablo 2.1'e yazınız.



Şekil 2.3



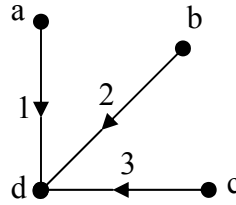
Şekil 2.4

$v_2=0, v_3=0 \quad v_1=10V$		$v_1=0, v_3=0 \quad v_2=10V$		$v_1=0, v_2=0 \quad v_3=10V$	
$i_1=$	$G_{11}=$	$i_1=$	$G_{12}=$	$i_1=$	$G_{13}=$
$i_2=$	$G_{21}=$	$i_2=$	$G_{22}=$	$i_2=$	$G_{23}=$
$i_3=$	$G_{31}=$	$i_3=$	$G_{32}=$	$i_3=$	$G_{33}=$

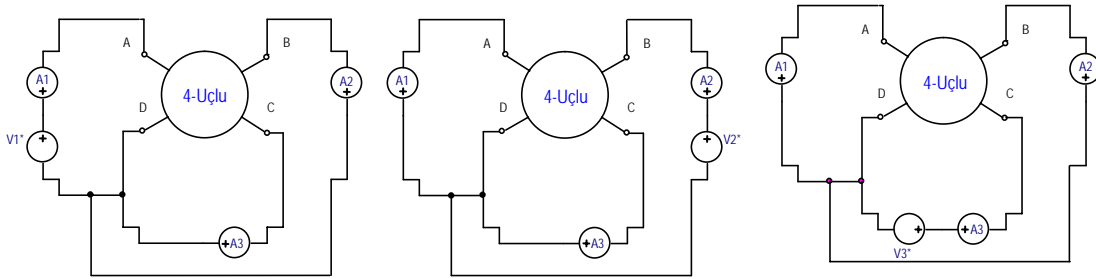
Tablo 2.1

B)

Aynı deneyi 4-uçlunun uç grafinin şekil 2.5'teki gibi seçilmesi halinde tekrarlayınız. Bunun için şekil 2.6'da verilen ölçme düzenini kurunuz. tablo 2.2'den yararlanarak 4-uçlunun T_2 'ye ilişkin uç denklemlerini elde ediniz.



Şekil 2.5



Şekil 2.6

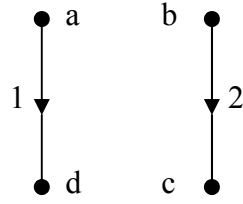
$v_2=0, v_3=0 v_1=10V$		$v_1=0, v_3=0 v_2=10V$		$v_1=0, v_2=0 v_3=10V$	
$i_1=$	$G_{11}=$	$i_1=$	$G_{12}=$	$i_1=$	$G_{13}=$
$i_2=$	$G_{21}=$	$i_2=$	$G_{22}=$	$i_2=$	$G_{23}=$
$i_3=$	$G_{31}=$	$i_3=$	$G_{32}=$	$i_3=$	$G_{33}=$

Tablo 2.2

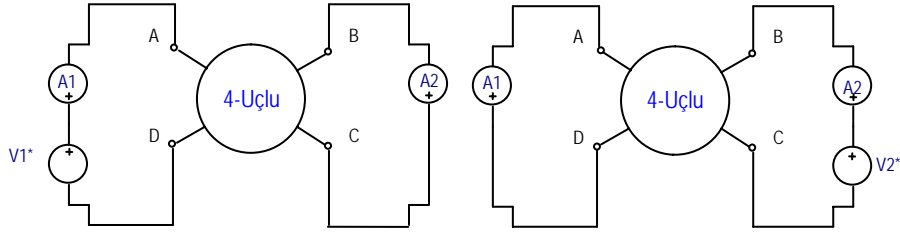
C)

4-uçlunun uç denklemleri, şekil 2.7'de gösterilen T_3 uç grafinin ilişkili olarak elde edilecektir. Bu graftan anlaşılacağı gibi, yalnız iki akım ve iki gerilim ölçmesi yapmak gerekmektedir. Bu amaçla şekil 2.8'de gösterilen ölçme düzenlerini kurarak tablo 2.3'teki hesaplamaları yapınız. Buradan T_3 uç grafinin ilişkili uç denklemlerini aşağıdaki biçimde yazınız.

$$\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$



Şekil 2.7



Şekil 2.8

$v_2=0, v_1=10V$		$v_1=0, v_2=10V$	
$i_1=$	$G_{11}=$	$i_1=$	$G_{12}=$
$i_2=$	$G_{21}=$	$i_2=$	$G_{22}=$

Tablo 2.3

DENEY 3: ÇARPIMSALLIK-TOPLAMSALLIK ve KARŞILILIK (RESİPROSITE) TEOREMLERİNİN İNCELENMESİ

Deneyin Amacı

Bu deneyin amacı çarpımsallık-toplamsallık ve karşılılık (resiprosite) teoremlerinin kavranmasını sağlamaktır.

Bir devrede çarpımsallık-toplamsallık teoreminin geçerli olduğunu göstermek, o devrenin lineer olduğunu göstermeye denktir. Bazı fiziksel sistemlerin çarpımsallık-toplamsallık özelliğini mutlaka sağlaması istenir ve bu sistemlerin tasarımı bu özellik gözönüne alınarak yapılır. Haberleşme sistemleri, ses kuvvetlendiricileri, çeşitli ölçü aletleri ve daha bir çok sistem lineer çalışması istenen sistemlere örnek olarak verilebilir.

Karşılılık, çeşitli fiziksel sistemlerde görülen bir özelliktir. Karşılılık, elektrik devreleri, mekanik, sürekli ortamlar mekaniği (elastik ve piezoelektrik ortamlar vb.) gibi konularda üzerinde özenle durulan bir konudur. Bir devrede bu özelliğin olduğunun bilinmesi, o devrenin analizi ve yapımı bakımından önemli kolaylık sağlar.

Ön Bilgi

Çarpımsallık Teoremi: Lineer direnç, endüktans, kapasite, lineer çok uçlular, gerilim ve akım kaynaklarından oluşan bir devrenin elemanlarının akım ve gerilimlerine ilişkin zorlanmış çözümü $y_{zor}(t)$ ile, özel çözümü de $y_{\delta}(t)$ ile gösterilsin. Eğer devredeki bütün kaynaklara ilişkin fonksiyonlar (ya da değerler) k (sabit bir sayı) katına çıkartılırsa, bu durumda devrenin zorlanmış çözümü $k.y_{zor}(t)$, özel çözümü de $k.y_{\delta}(t)$ olur.

Çarpımsallık teoremi kısaca şöyle de söylenebilir: Lineer elemanlardan oluşan devrede kaynaklar k katına çıkartılırsa, devredeki bütün akım ve gerilimlere ilişkin zorlanmış çözüm k katına çıkar.

Toplamsallık Teoremi: Lineer direnç, endüktans, kapasite, lineer çok uçlular, gerilim ve akım kaynaklarından oluşan bir devrenin elemanlarının akım ve gerilimlerine ilişkin zorlanmış çözümü $y_{zor}(t)$ ile, özel çözümü de $y_{\delta}(t)$ ile gösterilsin. İçindeki kaynak sayısı r 'ye eşit olan devredeki kaynaklardan birinin, örneğin i . kaynağın dışındaki bütün kaynakların değeri sıfır yapılmış (gerilim kaynakları kısa devre, akım kaynakları açık devre) olsun. Bu biçimde içinde sadece i . kaynağın bulunduğu devrenin elemanlarının akım ve gerilimlerine ilişkin zorlanmış çözüm $y_{zi}(t)$, özel çözüm de $y_{\delta i}(t)$ oluyorsa,

$$y_{zor}(t) = \sum_{i=1}^r y_{zi}(t) \quad , \quad y_{\delta}(t) = \sum_{i=1}^r y_{\delta i}(t) \quad \text{olur.}$$

Toplamsallık teoremi kısaca şöyle de söylenebilir: Lineer elemanlardan oluşmuş bir devrenin zorlanmış çözümü, devredeki her bir kaynaktan dolayı ortaya çıkan zorlanmış çözümlerin toplamı biçiminde yazılabilir.

Çarpımsallık-Toplamsallık teoremlerinin geçerliliği RLC devreleri için ele alınacaktır. Bilindiği gibi RLC devresinin durum denklemleri,

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

biçimindedir. Bu denklemlerde $x(t)$, durum değişkenlerinin; $u(t)$, devredeki gerilim ve akım kaynaklarının ve kaynakların türevlerinin oluşturduğu sütun matrisleridir. Bir devrede durum değişkenleri bilinirse, devrenin bütün elemanlarının akım ve gerilimleri, temel çevre ve temel kesitleme denklemleri ve uç denklemleri yardımıyla bulunabilir. O halde, devrede ilgilenilen elemanların akım ya da gerilimlerinin oluşturduğu sütun vektör, $y(t)$,

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2)$$

olarak yazılabilir. C ve D, elemanları reel sayılar olan matrislerdir. Burada $y(t)$ 'ye çıkış vektörü denilmektedir. (1) denkleminin zorlanmış çözümü,

$$x_{zor}(t) = x_{\phi}(t) - \phi(t)x_{\phi}(0) \quad (3)$$

biçimindedir. Burada $\phi(t)$, durum geçiş matrisi olup, A matrisine bağlıdır. $x_{\phi}(t)$ ise, (1) denkleminin özel çözümüdür. Bilindiği gibi özel çözüm,

$$\frac{d}{dt}x_{\phi}(t) = Ax_{\phi}(t) + Bu(t) \quad (4)$$

denklemini sağlamaktadır.

Ele alınan devredeki bütün kaynaklar k katına çıkartılırsa, devrenin durum denklemlerini yazmak için (1) denkleminde $u(t)$ yerine $ku(t)$ koymak yeterlidir. Bu durumda, diferansiyel denklemin özel çözümü $x_y(t)$ ile gösterilirse, $x_y(t)$

$$\frac{d}{dt}x_y(t) = Ax_y(t) + Bku(t) \quad (5)$$

denklemini sağlamalıdır. $x_y(t) = kx_{\phi}(t)$ alınıp, (5) denkleminde yerine konursa ve (4) denkleminde göz önüne alınırsa, $kx_{\phi}(t)$ nin, kaynakların k katına çıkartılması halindeki devrenin özel çözümü için çarpımsallık özelliğinin gösterilmesi tamamlanır.

Toplamsallık teoremini ispatlamak için, (1) denklemindeki kaynaklardan oluşmuş $u(t)$ vektörünü

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ u_2(t) \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

biçiminde yazmak gerekir. Yukarıdaki ifadede, sütun vektörlerini $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, ..., $u_r(t)$, şeklinde ifade edebiliriz. Bu durumda (1) denklemi,

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Bu_1(t) + Bu_2(t) + \dots + Bu_r(t) \quad (8)$$

biçiminde olacaktır.

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Bu_i(t) \quad (9)$$

denkleminin özel çözümü $x_{\text{öi}}(t)$ olsun. Bu durumda $x_{\text{öi}}(t)$, (9) denklemini sağlayacağından aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$\frac{d}{dt}x_{\text{öi}}(t) = Ax_{\text{öi}}(t) + Bu_i(t) \quad (10)$$

elde edilir. Bu denklem, i 'nin 1'den r 'ye kadar olan değerleri için tek tek yazılıp toplanırsa,

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^r x_{\text{öi}}(t) = A \sum_{i=1}^r x_{\text{öi}}(t) + Bu_1(t) + Bu_2(t) + \dots + Bu_r(t) \quad (11)$$

denklemini elde edilir.

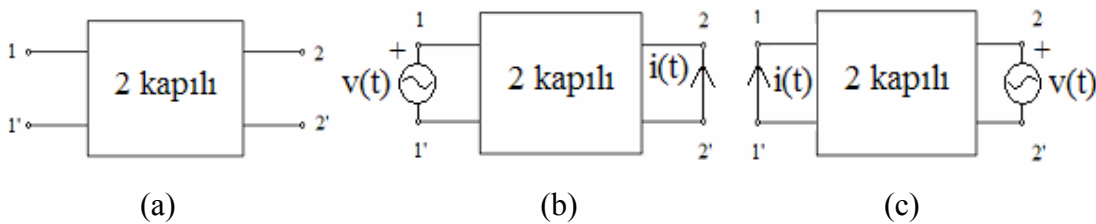
Buradan gözükceği üzere, (9) denkleminin özel çözümü,

$$x_{\text{ö}}(t) = \sum_{i=1}^r x_{\text{öi}}(t) \quad (12)$$

olarak ifade edilebilir. Böylece toplamsallık özelliği özel çözüm için gösterilmiş olur.

(12)'deki ifadeyi (3)'te yerine koyarak, toplamsallık özelliğinin gösterilmesi tamamlanmış olur.

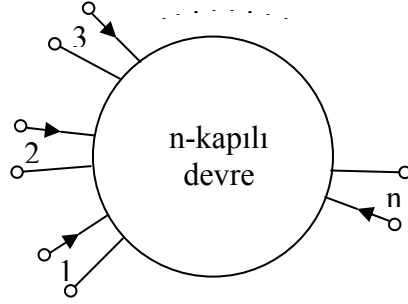
Karşılıklık (Resiprosite) Teoremi: Bir devrede karşılıklık özelliğinden ne anlaşıldığını belirtmek için şekil 3.1.a'daki devreyi ele alalım.



Şekil 3.1

Bu devrenin 2-2' uçları, şekil 3.1.b'de gösterildiği gibi kısa devre edilip, 1-1' uçlarına $v(t)$ gerilim kaynağı bağlandığında, 2-2' kısa devresinden geçen akım $i(t)$ olsun. Eğer 1-kapısındaki kaynak şekil 3.1.c'deki gibi 2-kapısına alındığında, kısa devre edilen 1-kapısından geçen akım $i(t)$ 'ye eşit oluyorsa, bu devrede karşılıklık (resiprosite) özelliği vardır denir.

Bu kavram çok uçlu devreler için de genelleştirilmiştir. Bunun için şekil 3.2'deki devreyi gözönüne alalım ve devrenin kapılarına kaynaklar bağlayalım.



Şekil 3.2

Bu kapılarda oluşan gerilim ve akımlar, $v_1(t)$, $v_2(t)$, ..., $v_n(t)$ ve $i_1(t)$, $i_2(t)$, ..., $i_n(t)$ olsun. Daha sonra bu kaynakları çıkararak onların yerine yeni kaynaklar bağlansın ve oluşan yeni gerilim ve akımlar $v_1'(t)$, $v_2'(t)$, ..., $v_n'(t)$ ve $i_1'(t)$, $i_2'(t)$, ..., $i_n'(t)$ olsun.

$$v_a = \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_n(t) \end{bmatrix}, i_a = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ \vdots \\ i_n(t) \end{bmatrix}, v_b = \begin{bmatrix} v_1'(t) \\ v_2'(t) \\ \vdots \\ v_n'(t) \end{bmatrix}, i_b = \begin{bmatrix} i_1'(t) \\ i_2'(t) \\ \vdots \\ i_n'(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

olmak üzere,

$$v_a^T i_b = v_b^T i_a \quad (14)$$

oluyorsa bu çok kapılı devrede karşılıklık özelliği vardır denir.

Karşılıklık için verilen ikinci tanım, 2-kapılı için verilen tanımı da içermektedir.

Şekil 3.1.b'deki durumu ele alırsak,

$$v_1(t) = v(t), \quad v_2(t) = 0; \quad i_1(t) = i_1(t), \quad i_2(t) = i(t);$$

Şekil 1.c'deki durumu ele alırsak,

$$v_1'(t) = 0, \quad v_2'(t) = v(t); \quad i_1'(t) = i(t), \quad i_2'(t) = i_2'(t); \text{ elde edilir. Dolayısıyla,}$$

$$v_a = \begin{bmatrix} v(t) \\ 0 \end{bmatrix}, i_a = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i(t) \end{bmatrix}, v_b = \begin{bmatrix} 0 \\ v(t) \end{bmatrix}, i_b = \begin{bmatrix} i(t) \\ i_2'(t) \end{bmatrix} \text{ olur ve (14) denkleminin sağlandığı}$$

kolayca görülebilir.

2-kapılı devre için karşılığın tanımı, fiziksel olarak, birinci kapının ikinci kapıya etkisiyle ikinci kapının birinci kapıya etkisinin aynı oluşudur.

Toplamsallık Teoreminin Bir Uygulaması: Toplamsallık teoremi, içinde farklı frekanslarda sinüsoidal kaynaklar bulunan lineer elemanlı devrelerin analizinde büyük kolaylık getirmektedir. Her bir sinüsoidal kaynak için devrenin kalıcı (sürekli) çözümü bulunup bu çözümler toplanırsa, devrenin kalıcı çözümü bulunur.

Ayrıca, periyodu T olan bir $x(t)$ fonksiyonu, sinüsoidal fonksiyonlar cinsinden,

$$x(t) = b_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \sin \omega t + b_k \cos \omega t) \quad (15)$$

biçiminde bir seriye açılabilir. Fourier serisi denilen bu serideki katsayılar,

$$b_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

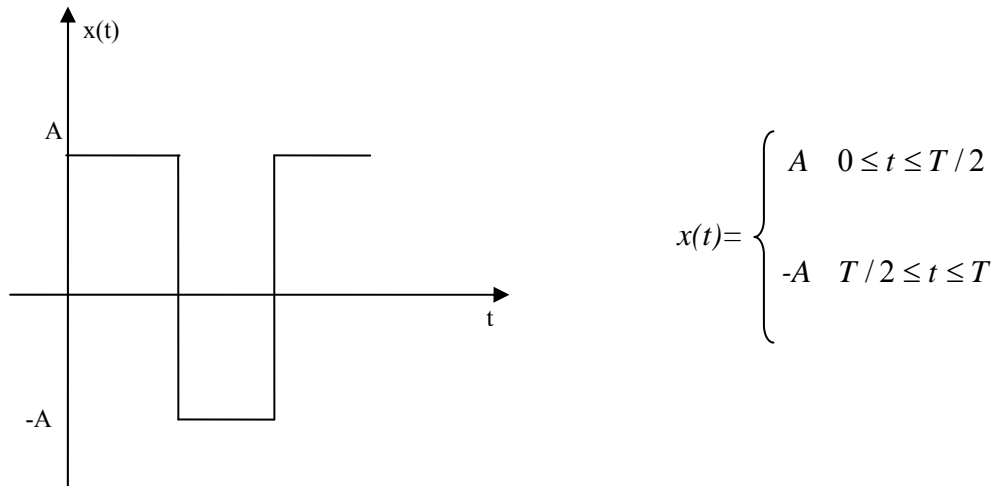
$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin(k\omega t) dt \quad (16)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos(k\omega t) dt$$

bağıntısıyla hesaplanır. Elektrik mühendisliğinde Fourier serisi açılımından çokça yararlanılmaktadır.

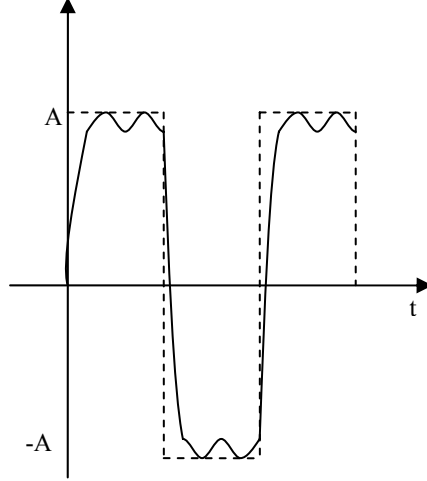
Örnek olarak, şekil 3.3'te verilen kare dalgayı ele alalım. Bu işarete ait Fourier serisini bulmak için, $x(t)$ bağıntısı (16)'da yerine konur ve ilk olarak katsayılar tespit edilir. Daha sonra bulunan katsayılar (15) denkleminde yerine konursa (17) elde edilir.

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (17)$$



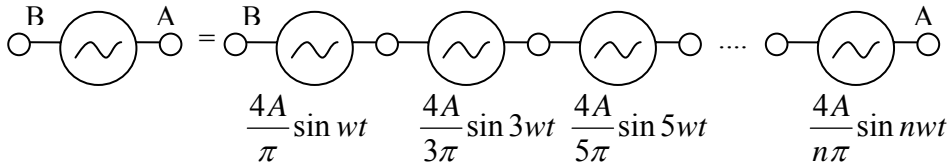
Şekil 3.3

Denklem (17)'de görüldüğü gibi, sinüsoidal terimler gitgide küçüldüğünden toplamada yüksek frekans terimleri ihmal edebiliriz. Denklem (17)'de ilk üç terimin toplamını alırsak şekil 3.4'teki gibi bir işaret elde ederiz.



Şekil 3.4

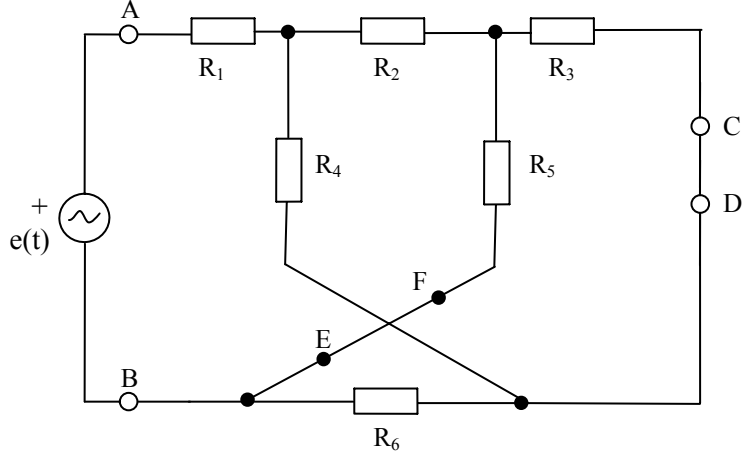
Fourier serisi ifadesinden, periyodik bir kaynağı, açısal frekansları ω , 2ω , 3ω , ..., gibi olan bir çok sinüsoidal kaynak ile modellemenin mümkün olduğu gözükmemektedir. Bu durumda periyodik kaynak bulunduran lineer devrelerin özel çözümleri, toplamsallık teoremi uygulanarak bulunabilir. Kare dalga için uygun modelleme şekil 3.5'te gözükmemektedir.



Şekil 3.5

Deneyin Yapılışı

Çarpımsallık ve Toplamsallık: Bu teoremin deneysel incelenmesi için şekil 3.6'daki devreden yararlanılacaktır.



Şekil 3.6

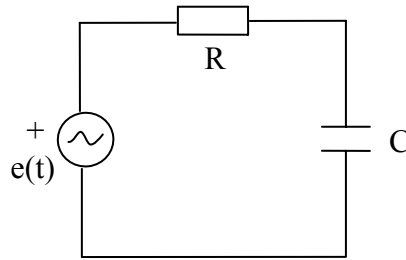
A) Şekil 3.6'daki devreyi kurunuz. C-D kısa devre akımını ve A-B uçları arasındaki gerilimi ölçünüz. Kaynağın gerilimini değiştirerek, C-D kısa devre akımını ölçünüz ve değerleri tablo haline getiriniz.

B-1) Şekil 3.6'daki devrede E-F uçları arasına gerilim kaynağı bağlayınız. Devrede iki kaynak varken C-D kısa devre akımını ölçünüz.

B-2) E-F uçlarını tekrar kısa devre ediniz ve tek kaynaklı hale gelen devredeki C-D kısa devre akımını ölçünüz.

B-3) E-F uçları arasına b-1'deki gerilim kaynağını tekrar bağlayınız ve A-B uçlarını kısa devre ediniz. C-D kısa devre akımını ölçünüz. b-2 ve b-3'te ölçülen değerleri toplayıp b-1'deki değerle karşılaştırınız.

C-1) Şekil 3.7'deki devreyi kurunuz. Gerilim kaynağı olarak periyodu $T=RC/10$ olan bir kare dalga işareti alınız. C kondansatörünün uçları arasındaki gerilimi oskillopla inceleyiniz. Kare dalganın tepe değerini kaydediniz.



Şekil 3.7

C-2) Kare dalganın denklem (17)'deki Fourier serisi açılımını kullanıp toplpamsallık teoreminden yararlanarak C kondansatörünün uçları arasındaki gerilimi hesaplayınız. (ipucu:

kaynak değeri $e_n(t) = E_n \sin \omega t$ iken C'nin uçları arasındaki gerilimin

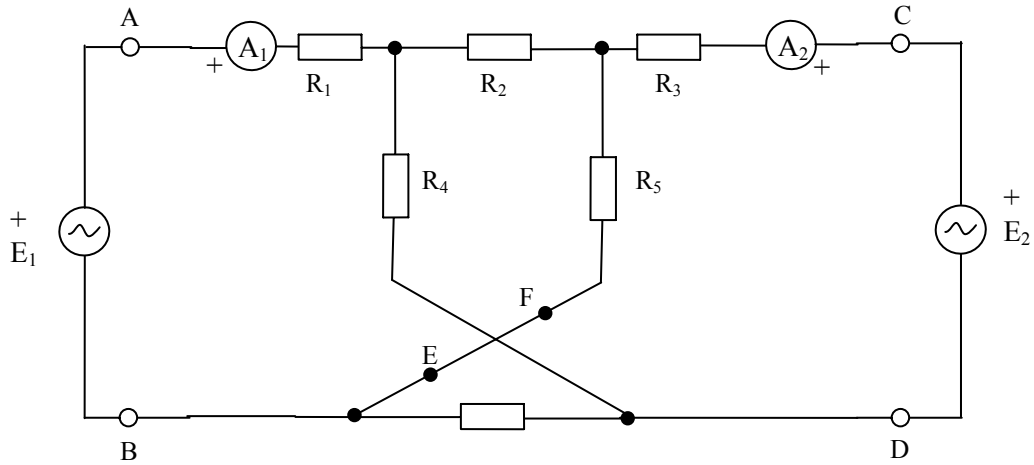
$$e_n(t) = \frac{E_n}{\sqrt{1+(n\omega RC)^2}} \sin(n\omega t - \arctan(n\omega RC))$$

olduğunu gösteriniz. Ayrıca $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $T = \frac{RC}{10}$ olduğu için $n\omega CR \gg 1$ olduğunu gözönüne alarak gerekli yaklaşıklık yapınız.)

Karşılılık Teoremi: bu teoremin deneysel incelenmesi için şekil 3.6'daki devreden yararlanılacaktır.

A) Şekil 3.6'daki devreyi kurunuz. C-D kısa devre akımını kaydediniz. A-B uçlarındaki gerilim kaynağını (değerini değiştirmeden) C-D uçları arasına bağlayınız ve A-B kısa devre akımını ölçünüz. Elde edilen sonuçları yorumlayıp devrede karşılılık olup olmadığını belirleyiniz.

B) Karşılılığı, (14)'te verilen denklemi sağlayarak göstermek için şekil 3.8'deki devreyi kurunuz.



Şekil 3.8

- E_1 ve E_2 kaynaklarının gerilimlerini belirli V_1 ve V_2 değerlerine ayarlayınız; A_1 ve A_2 ampermetrelerinden akan i_1 ve i_2 akımlarını ölçünüz.
- E_1 ve E_2 kaynaklarının gerilimlerini V'_1 ve V'_2 olacak şekilde değiştiriniz. A_1 ve A_2 ampermetrelerinden akan i'_1 ve i'_2 akımlarını ölçünüz.
- a ve b'de yaptığımız ölçümlere dayanarak devrede karşılılık özelliğinin olup olmadığını karar veriniz.

DENEY 4: THÉVENİN ve NORTON TEOREMLERİ

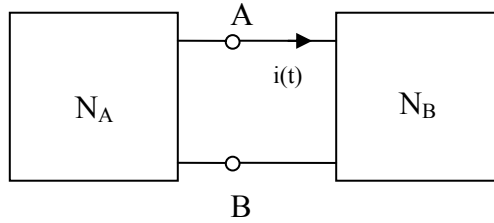
Deneyin Amacı

Bu deneyin amacı, Thévenin ve Norton Teoremlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktır.

Ön Bilgi

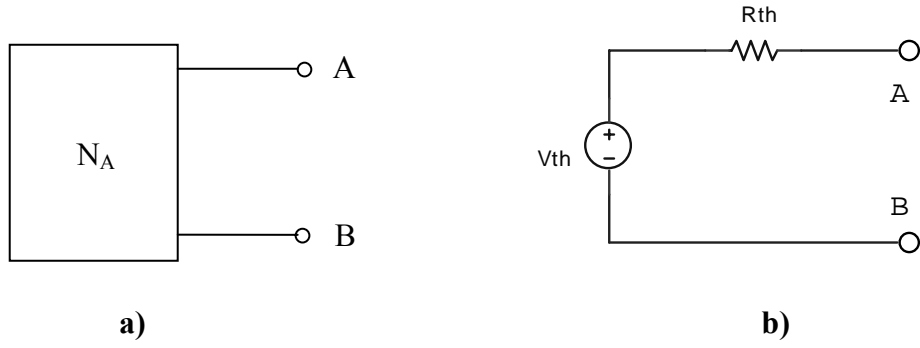
Devre analizinde kullanılan başlıca yöntemlerden ikisi, çevre akımları ve düğüm gerilimleri yöntemidir. Bu yöntemler kullanılarak ilgilenilen devredeki elemanlara ait tüm akım-gerilim çiftleri bulunabilir. Devre analizinde ve bazı devre uygulamalarında, analizi daha önceden yapılmış bir (lineer-zamanla değişmeyen) 2-kapılı, herhangi 2-kapılı bir devreyle bağlanarak yeni devreler oluşturulmaktadır. Bu durumda elde ettiğimiz yeni devreyi tekrar analiz etmek yerine, daha önce analizi yapılmış 2-kapılıya ait bilgiyi kullanarak son durumun analizini kolaylaştırmak için, Thévenin ve Norton teoremlerine başvurulur.

Lineer bir N_A devresinin herhangi başka bir N_B devresine, Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi A ve B uçlarından bağlansın. A-B uçlarındaki $v(t)$ gerilimi ile N_B devresinin çektiği $i(t)$ akımı, N_A devresinin yerine Thévenin veya Norton eşdeğer devresinin konulmasıyla değişmeyecektir. Karmaşık yapıdaki N_A devresinin yerine daha basit bir eşdeğer devre konulması, söz konusu akım ve gerilimlerin hesabını kolaylaştıracaktır.



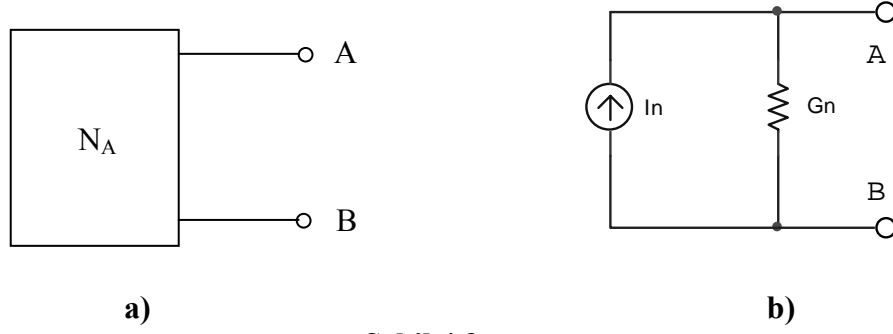
Şekil 4.1

Thévenin eşdeğer devresi, Şekil 4.2b’de olduğu gibi, bir gerilim kaynağı ve bir direnç 2-uçlusu ile gösterilmektedir. Eşdeğer devredeki V_{th} gerilim kaynağı, Şekil 4.2a’da gösterilen N_A devresinin A-B uçları arasında ölçülen açık devre gerilimine eşittir. Thévenin eşdeğer devresindeki V_{th} gerilimini, N_A devresindeki bağımsız gerilim ve akım kaynakları belirlemektedir. Thévenin eşdeğer devresindeki R_{th} direnci ise, N_A devresindeki bağımsız gerilim kaynakları kısa devre, bağımsız akım kaynakları da açık devre iken A-B uçlarından görülen dirence eşittir.



Şekil 4.2

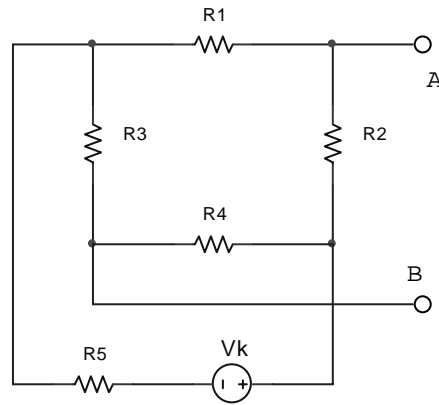
Norton eşdeğer devresi Şekil 4.3b’de olduğu gibi, bir akım kaynağı ve bir direnç 2-uçlusunu ile gösterilmektedir.



Şekil 4.3

Norton eşdeğer devresindeki I_n akımı, Şekil 4.3a’daki N_A iki uçlusunun A-B uçları kısa devre edildiğinde bu uçlardan akacak olan akıma eşittir. G_n iletkenliği ise, Thévenin eşdeğer devresindeki gibi, bağımsız kaynaklar sıfırlandığında A-B uçlarından gözükten iletkenliğe eşittir.

Deneyin Yapılışı :



Şekil 4.4

Şekil 4.4'teki devreyi kurunuz. ($R_1=10\text{k}\Omega, R_2=1.8\text{k}\Omega, R_3=1.2\text{k}\Omega, R_4=33\text{k}\Omega, R_5=4.7\text{k}\Omega, V=10\text{V}$)

1) Thévenin ve Norton eşdeğerinin bulunması.

a) Şekil 4.2b'deki eşdeğer devreye ait V_{th} gerilimini bulmak için A-B uçları arasındaki açık devre gerilimini ölçünüz.

b) Şekil 4.2b'deki eşdeğer devreye ait R_{th} direncini bulmak için, V_k gerilim kaynağını kısa devre ediniz ve A-B uçları arasındaki direnci ölçünüz.

c) Şekil 4.2b'deki eşdeğer devreye ait I_n akımını bulmak için, A-B uçları arasına bir ampermetre bağlayarak kısa devre akımını ölçünüz.

d) $G_n = 1/R_{th}$ ifadesini hesaplayınız ve Thévenin ve Norton eşdeğer devrelerini çizin.

2) Eşdeğer devrelerin sınanması.

a) Şekil 4.4'teki devrenin A-B uçlarına $R=1\text{ k}\Omega$ değerinde bir direnç bağlayınız ve bu dirence ait akım ve gerilimi ölçünüz.

b) Şekil 4.4'teki devreye ait Thévenin eşdeğer devresini kurunuz ve A-B uçlarına $R=1\text{ k}\Omega$ değerinde bir direnç bağlayarak bu dirence ait akım ve gerilimi ölçünüz.

c) Şekil 4.4'teki devreye ait Thévenin eşdeğerini, devre analizi yöntemlerinden (Düğüm gerilimleri/ Çevre akımları) birini kullanarak hesaplayınız.

d) b ve c'deki sonuçlarınızı (a)'daki ölçümlerle karşılaştırınız.

3) Şekil 4.4'teki devreye ait Thévenin eşdeğer devresini kurunuz ve A-B uçları arasına R_L direncini bağlayınız. Tablo 4.1'i doldurunuz. Bulduğunuz değerlere bakarak devreden R_L 'ye maksimum güç aktarmak için R_L ile R_T arasında nasıl bir ilişki olması gerektiğini belirtiniz.

Yük Direnci	Hesap I_{RL}	Hesap V_{RL}	Hesap P_{RL}	Ölçme I_{RL}	Ölçme V_{RL}	Hesap P_{RL}
$R_L = 0.1 R_{th}$						
$R_L = R_{th}$						
$R_L = 10 R_{th}$						

Tablo 4.1

DENEY 5: RL, RC ve RLC' DEN OLUŞMUŞ DEVRELERDE GEÇİCİ REJİMLERİN İNCELENMESİ

Deneyin Amacı

1. ve 2. dereceden elektrik devrelerinin davranışlarıyla ilgili bilgilerinin artırılması amaçlanmaktadır.

Ön Bilgi

Bir elektrik devresinin zamana göre davranışının belirlenebilmesi için devreye ilişkin denklemler elde edilmeli ve çözülmelidir. Devre denklemleri, en genel halde integral, türev ve cebrik ilişkiler içerir. Böyle bir denklem takımının çözülmesi zor olduğu için elde edilen denklemlerin integral içermediği durum değişkenleri yöntemi elektrik devrelerinin analizinde tercih edilmektedir.

Sadece bağımsız kaynaklar, dirençler, kapasiteler ve endüktanslar içeren bir devreyi ele alalım. Böyle bir devrede bağımsız kaynaklar ve dirençlere ait tanım bağıntıları cebrik denklemler iken kapasite ve endüktanslara ait tanım bağıntıları diferansiyel denklemlerdir. Durum değişkenleri yönteminde kapasite gerilimleri ve endüktans akımları içerisinde lineer bağımsız bir grup durum değişkenleri olarak seçilir. Diğer büyüklüklerin bu büyüklükler cinsinden yazılması sayesinde devre denklemleri integral içermez. Bu gerilim ve akımlar biliniyor ise diğer devre büyüklükleri sadece cebrik denklemler kullanılarak bulunabilir. Dolayısıyla durum değişkenlerinin davranışının belirlenmesi, devrenin davranışının belirlenmesi anlamına gelir. Durum değişkenleri yönteminde devre elemanlarına ait tanım bağıntıları ile çevre ve kesitleme denklemleri kullanılarak (1) yapısında bir diferansiyel denklem takımı elde edilir. Denklemde gözükten $x(t)$ durum değişkenleri, $e(t)$ ise devredeki bağımsız kaynaklardır.

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Be(t) \quad (1)$$

Bu diferansiyel denklem takımının çözümü iki adımda yapılır. İlk olarak (1) denkleminde $Ax(t)$ teriminin belirlediği çözüm,

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) \quad (2)$$

homojen diferansiyel denklemi çözülerek bulunur. (2) denkleminin matematiksel çözümü keyfi sabitler içerecektir. Durum değişkenlerinin devrenin çalışmaya başladığı $t = 0$ anındaki değerleri ilk koşullar olarak adlandırılmaktadır. Elektrik devresinde bu ilk koşulların da

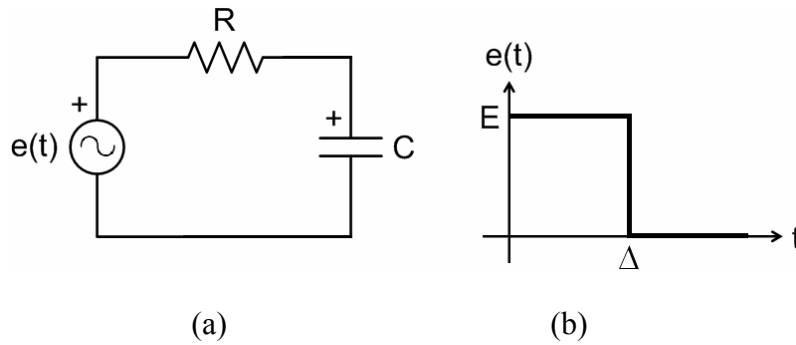
sağlanması gerekliliğinden hareketle matematik çözümdeki bilinmeyen sabitler belirlenir. Bu devreye ait öz çözümdür. Öz çözüm, kaynaklar sıfır iken devrenin davranışını (sadece ilk koşulların etkisi altındaki davranışı) belirler.

Böylece (2) homojen diferansiyel denkleminin çözülmesi ile (1) denkleminde $Ax(t)$ teriminin çözüme katkısı bulunmuş oldu. (1) denkleminin çözülebilmesi için $Be(t)$ teriminin de çözüme katkısı bulunmalıdır. Bu aşamada diferansiyel denklem analiz yöntemlerinden herhangi biri kullanılarak bu çözüm bulunur. Homojen çözümde olduğu gibi burada da bulunan bir matematik denkleminin çözümüdür ve bazı keyfi sabitler içerecektir. Bu çözümün de devrenin ilk koşullarını sağlaması gerekliliğinden hareketle çözümdeki sabitlerin değerleri bulunur. Bu da devreye ait zorlanmış çözümdür. Zorlanmış çözüm, ilk koşullar sıfır iken devrenin davranışını (sadece kaynak etkisi altındaki davranışı) belirler. Zorlanmış çözümün daha önce bulunan öz çözüm ile toplamı (1) denkleminin çözümüdür. Bu toplam tam çözüm olarak adlandırılır.

Öz çözümün $t \rightarrow \infty$ için sıfır olduğu devreler asimptotik kararlı devreler olarak adlandırılır. Asimptotik kararlı bir devrede pratik olarak devrenin incelenmesine başlanılmasından belirli bir zaman sonra, tam çözüm büyük bir yaklaşıklıkla zorlanmış çözüme eşit olur. Geçici çözüm, başlangıçta çok büyük olsa bile, devre çalışmaya başladıktan belirli bir zaman sonra küçülür, sıfıra yaklaşır. Kalıcı çözüm, devrede kaynaklar olduğu sürece devam edecek çözümdür. Bu deneyde RC, RL ve RLC devreleri ele alınarak, bu devrelerin kare dalga ile uyarılmaları halinde geçici çözümlerinin ne olduğu incelenecektir.

RC Devresi:

Şekil 1a'daki RC devresini ele alalım. Bu devrenin durum denklemleri,



Şekil 5.1

$$\frac{d}{dt} v_c(t) = -\frac{1}{RC} v_c(t) + \frac{1}{RC} e(t) \quad (3)$$

şeklindedir. Devredeki gerilim kaynağı $e(t)$ Şekil 5.1b'de verildiği gibi birim basamak seçilsin. Bu durumda RC devresi $e(t) = E$ ($t < \Delta$ zamanı) ve $e(t) = 0$ ($t \geq \Delta$ zamanı) için ayrı ayrı analiz edilmelidir.

(3) diferansiyel denkleminin çözümü $e(t) = E$ için,

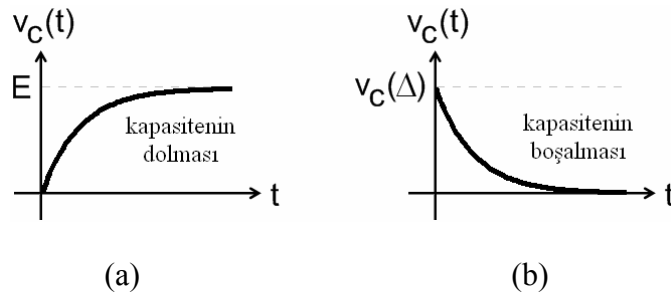
$$v_{C_{TAM}}(t) = \underbrace{v_C(0)e^{-t/RC}}_{v_{C_{ÖZ}}(t)} + \underbrace{E(1-e^{-t/RC})}_{v_{C_{ZOR}}(t)} \quad (4)$$

ve $e(t) = 0$ için,

$$v_{C_{TAM}}(t) = \underbrace{v_C(\Delta)e^{-t/RC}}_{v_{C_{ÖZ}}(t)} \quad (5)$$

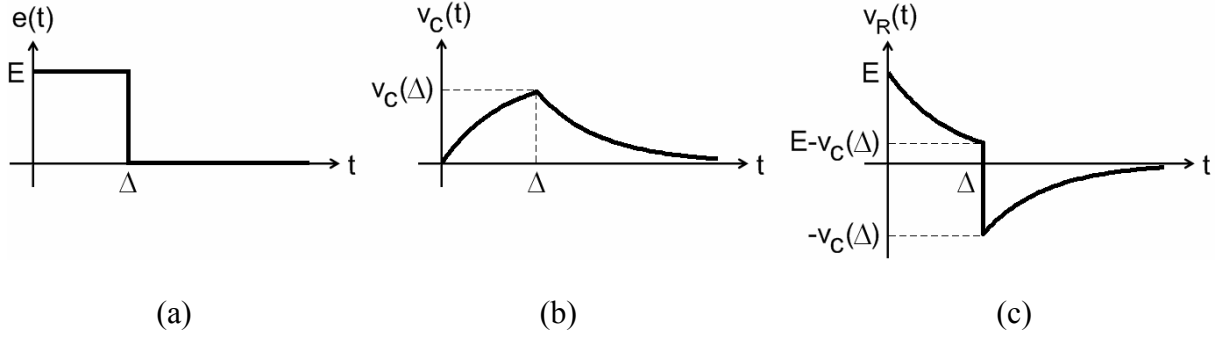
şeklindedir.

(4) ve (5) denklemlerinde üstel terimleri belirleyen RC çarpımı zaman sabiti olarak adlandırılır ve τ ile gösterilir. Direncin birimi ohm, kapasitenin birimi farad olarak alındığında zaman sabitinin birimi saniye olur. Zaman sabiti öz çözümün ne kadar süre geçerli olacağını belirler. Öz çözümü belirleyen terimler $v_C(0)e^{-t/RC}$ ve $v_C(\Delta)e^{-t/RC}$ dir. t 'nin $5RC$ 'den büyük değerleri için $e^{-t/\tau} < 0.01$ olduğu için öz çözümün sıfır olduğu kabul edilir. (4) denkleminde zorlanmış çözüm $E(1-e^{-t/RC})$ olduğu için $5RC$ süreden sonra kapasite gerilimi yaklaşık olarak E olur. Bu kapasitenin dolmasıdır. (5) denkleminde ise kaynak olmadığı için zorlanmış çözüm sıfırdır. Dolayısıyla 5τ süreden sonra kapasitenin gerilimi sıfır olur. Bu da kapasitenin boşalmasıdır. Kapasitenin dolma ve boşalma grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.2

Şekil 5.1'de gerilim kaynağı, kapasite ve direnç bir çevre oluşturmaktadır. Dolayısıyla $v_C(t)$ bilindiğinde $v_R(t)$ bulunabilir. Aşağıda kaynak, kapasite ve direncin gerilimlerin değişimi gözükmektedir.



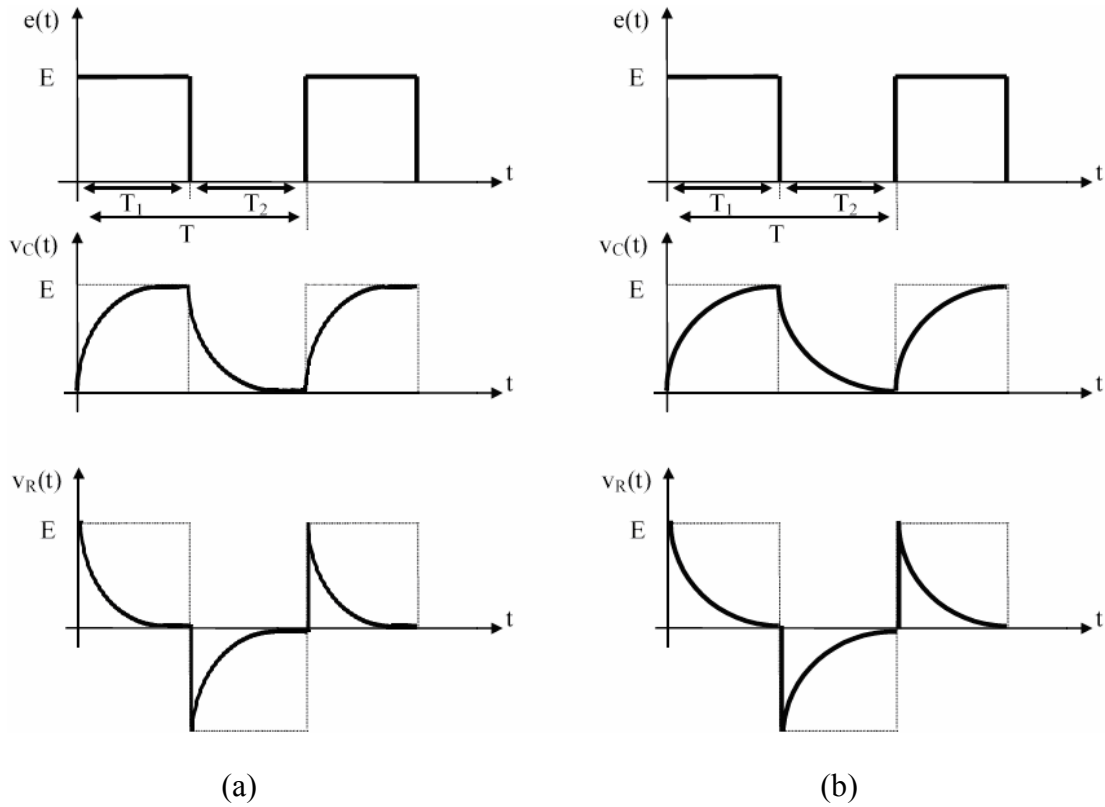
Şekil 5.3

Şekil 5.1'de gerilim kaynağı, $T_1 = T_2$ olmak üzere Şekil 5.4a'daki gibi kare dalga seçilsin. Bu durumda devrede T 'nin değerine bağlı olarak 3 farklı davranış gözlenecektir.

(a) $\tau \ll T$ ise, kapasite darbe süresince (T_1) dolar ve darbe aralığı süresince (T_2) de boşalır. Zaman sabiti küçük olduğu için, kapasite tam olarak dolmakta ve boşalmaktadır. Bu gerilimin değişimi,

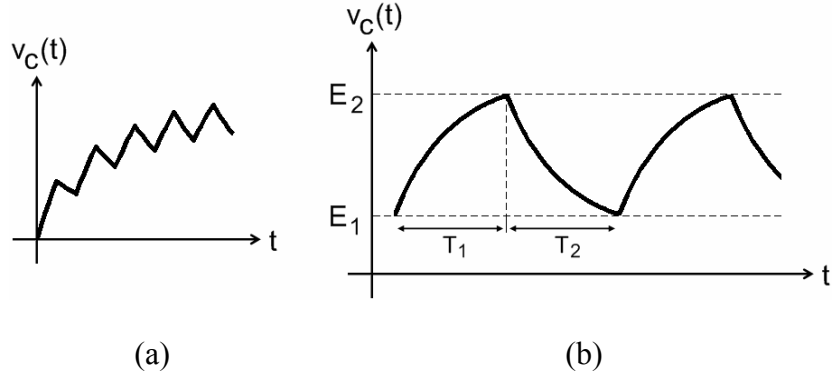
$$v_C(t) = \begin{cases} E(1 - e^{-t/RC}) & ; 0 \leq t < T_1 \\ v_C(T_1)e^{-t/RC} & ; t \geq T_1 \end{cases} \quad (6)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Şekil 5.4a'da $\tau \ll T$ için, Şekil 4b'de ise $5\tau = T/2$ için kapasite ve direncin gerilimlerinin değişimi gözükmektedir.



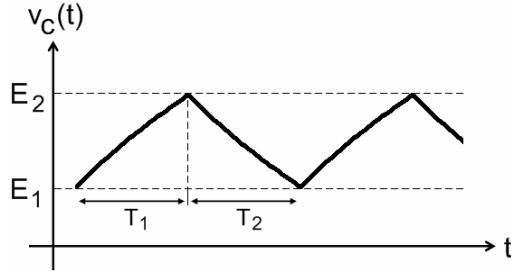
Şekil 5.4

(b) $5\tau > T/2$ ise, $v_C(t)$ 'nin değişimi Şekil 5.5a'da gösterildiği gibi olacaktır. İlk darbe ile kapasite dolacak, darbe aralığında (T_2 süresince) kapasite tamamen boşalmadan ikinci darbe gelecek ve kapasite yeniden dolmaya başlayacaktır. Kapasitenin üzerindeki gerilim bir periyot sonra başlangıçtakinden daha fazla olduğu için kapasite her defasında daha fazla dolacaktır. Benzer olarak her defasında kapasite, üzerinde daha fazla gerilim var iken boşalmaya başlayacağı için boşalma sonunda üzerinde kalan gerilim de git gide artacaktır. Bu durum başlangıçtaki darbeler için bu şekilde devam edecektir. Bir süre sonra kapasitenin uçlarındaki gerilimin değişimi periyodik hale gelecektir. Şekil 5.5b'de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 5.5

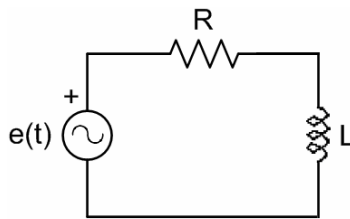
(c) $\tau \gg T$ ise, (4) ve (5) denklemlerindeki üstel terimler, doğrusala oldukça yakın davranacaktır. Bu sebeple Şekil 5.5b aşağıdaki şekli alacaktır.



Şekil 5.6

RL Devresi:

Şekil 5.7'deki RL devresini ele alalım. Bu devrenin durum denklemleri,



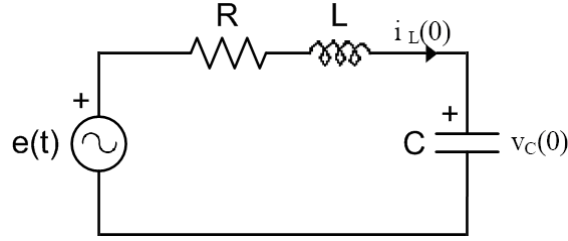
Şekil 5.7

$$\frac{d}{dt}i_L(t) = -\frac{R}{L}i_L(t) + \frac{1}{L}e(t) \quad (7)$$

şeklindedir. (7) denklemi ile (3) denklemi aynı yapıda olduğundan RC devresi için yapılan incelemeler, RL devresi için de geçerlidir. Ancak zaman sabiti RC devresinde $\tau = RC$ iken RL devresinde $\tau = L/R$ 'dir.

RLC Devresi:

Şekil 5.8'deki RLC devresini ele alalım. Bu devrenin durum denklemleri,



Şekil 5.8

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_C(t) \\ i_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/C \\ -1/L & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_C(t) \\ i_L(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \end{bmatrix} e(t) \quad (8)$$

şeklindedir. Bu denklem (1) denklemi yapısındadır; ancak bu denklemdeki A, (3) denklemdeki gibi bir skaler değil bir matristir. (4) ve (5) denklemleri incelendiğinde, (3) denkleminin çözümünün e^{At} terimi içerdiği görülür. Benzer olarak (8) denkleminin çözümü de e^{At} terimi içerecektir. Bu diferansiyel denklemin çözümündeki temel güçlük e^{At} 'nin hesaplanmasıdır.

Bu denklem sisteminin karakteristik denklemi çözümün yapısını belirleyecektir. (8) denklem sisteminin karakteristik denklemi,

$$p^2 + 2\zeta\omega_0 p + \omega_0^2 = 0 \quad (9)$$

denklemdir. Burada,

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad , \quad \zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (10)$$

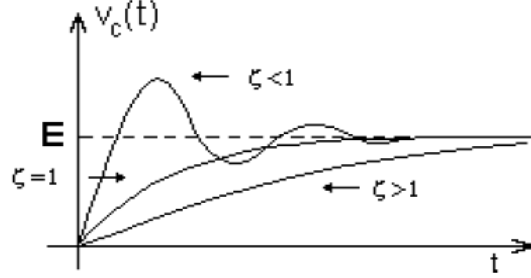
bağıntılarıyla belirlenir. ζ 'nin değerine göre (9) denkleminin kökleri aşağıdaki 3 halden biri olabilir.

(a) $\zeta > 1$ ise $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ve kökler reeldir.

(b) $\zeta = 1$ ise $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ve kökler reel, eşittir.

(c) $0 \leq \zeta < 1$ ise $0 \leq R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ve kökler kompleks eşleniktir.

$v_C(0) = 0, i_L(0) = 0$ için her üç halde $v_C(t)$ 'nin zamanla değişimi aşağıda kabaca çizilmiştir.



Şekil 5.9

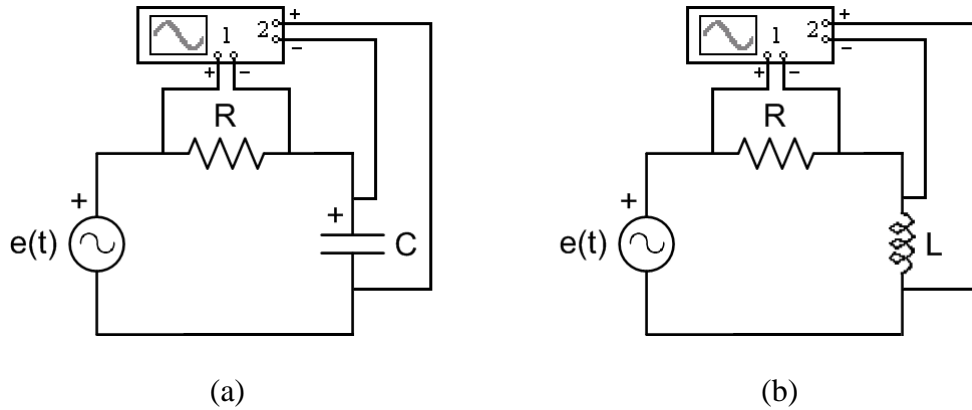
(a), (b) ve (c) hallerinde çözümün yapısı aşağıdaki gibi olacaktır.

(a) $x(t) = K_1 e^{-\alpha_1 t} + K_2 e^{-\alpha_2 t}$

(b) $x(t) = K_1 e^{-\alpha t} + K_2 t e^{-\alpha t}$

(c) $x(t) = e^{-\alpha t} (K_1 \cos \beta t + K_2 \sin \beta t)$

Deneyin Yapılışı

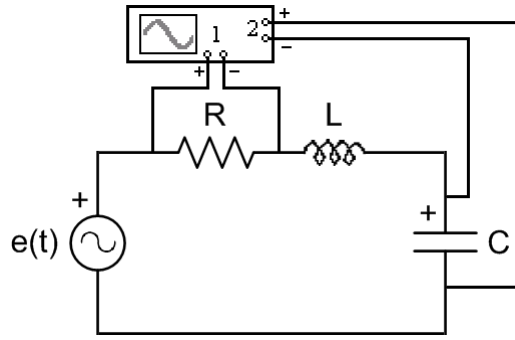


Şekil 5.10

(1) Şekil 5.10a'daki ölçüm düzeneğini direnç değerini 100Ω , kondansatör değerini $1\mu F$ olarak kurunuz. Devrenin girişine 0-5 V simetrik bir kare dalga uygulayınız. Kare dalga osilatörünün frekansını değiştirerek $v_C(t)$ 'yi gözlemleyiniz. Şekil 5.4b'ye en yakın şekli elde ettiğiniz (tam dolma, tam boşalma durumu) frekansı belirleyiniz. Hesap ile bu değeri doğrulayınız. Kare dalga osilatörün periyodunu $T=10RC$, $T=RC$ ve $T=RC/10$ alarak, $v_C(t)$ ve $v_R(t)$ için osilaskopta gördüğünüz şekilleri, tepe değerlerini kaydederek çiziniz.

(2) Kare dalganın genliğini yarıya düşürerek (1) şıkkındaki ölçümleri tekrarlayınız ve sonuçları yorumlayınız.

(3) Şekil 5.10b'deki ölçüm düzeneğini direnç değerini 600Ω , endüktans değerini 60mH olarak kurunuz. Devrenin girişine $0-5\text{ V}$ simetrik bir kare dalga uygulayınız. Kare dalga osilatörünün frekansını değiştirerek $v_R(t)$ 'yi gözlemleyiniz. Şekil 5.4b'ye en yakın şekli elde ettiğiniz (tam dolma, tam boşalma durumu) frekansı belirleyiniz. Hesap ile elde ettiğiniz değer ile ölçüm ile elde ettiğiniz değer arasındaki farkı yorumlayınız. Kare dalga osilatörün periyodunu $T=10L/R$, $T=L/R$ ve $T=L/10R$ olarak, her üç hal için osilaskopta gördüğünüz şekilleri, tepe değerlerini kaydederek çiziniz.



Şekil 5.11

(4) Şekil 5.11'deki ölçüm düzeneğini endüktans değerini 60mH , kondansatör değerini $1\mu\text{F}$ olarak kurunuz. Devrenin girişine 100Hz frekansında $0-5\text{ V}$ simetrik bir kare dalga uygulayınız. Ölçme düzeneğinde, $R = 20\sqrt{\frac{L}{C}}$, $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ve $R = 20\sqrt{\frac{L}{C}}$ olarak, her bir hal için osilaskopta gördüğünüz dalga şekillerini çiziniz. Elde ettiğiniz sonuçları yorumlayınız.

$R = 20\sqrt{\frac{L}{C}}$ için kondansatörün değerini değiştirmenin dalga şeklini nasıl etkilediğini belirtiniz.

DENEY 6 : SİNÜSOİDAL SÜREKLİ HALDE KALICI ÇÖZÜMÜN İNCELENMESİ

Deneyin Amacı

Sinüsoidal kaynaklar ile uyarılan RL, RC ve RLC devrelerinin kalıcı çözümünü bulmak için fazör kavramından nasıl yararlanılacağı ortaya konacaktır.

Sinüsoidal Sürekli Hal (SSH) de Kalıcı Çözümün Bulunması

Kararlı dinamik devrelerin analizi sonucu elde edilen durum denklemlerinin tam çözümü, geçici ve kalıcı çözümlerin toplamı olarak ifade edilebilir. Tam çözümde, etkisi zamanla azalan ve en sonunda sıfıra inen kısma ‘geçici çözüm’, kaynaklar var olduğu sürece tam çözüme katkısı olan kısma ise ‘kalıcı çözüm’ adı verilmektedir.

$$\underbrace{x(t)}_{\text{Tam Çözüm}} = \underbrace{\phi(t)(x_0 - x_{\infty}(0))}_{\text{Geçici Çözüm}} + \underbrace{x_{\infty}(t)}_{\text{Kalıcı Çözüm}} \quad (1)$$

$$x_{\infty}(t) = x_{tam}(t)_{t \rightarrow \infty} \quad (2)$$

Bir veya aynı frekanslı birden fazla sinusoidal kaynakla uyarılmış bir RLC devresinden elde edilen kalıcı çözüme SSH çözümü denir.

Bir sinüsoidal işaret denklem (3) teki gibi ifade edilebilir.

$$A(t) = A_m \cos(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} A_{eff} \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

Burada A_m genliği, A_{eff} etkin değeri, ω açısal frekansı ve φ de fazı temsil etmektedir.

$A(t)$ işaretine karşılık düşen ve fazör olarak adlandırılan A kompleks büyüklüğü aşağıdaki şekilde tanımlanır. (Laboratuarda kullanılan ölçüm aletleri etkin değeri gösterdiğinden fazör ifadesinde etkin değer kullanılmıştır.)

$$A = A_{eff} e^{j\varphi} \quad (4)$$

(3) ve (4) bağıntısından yararlanarak,

$$A_{eff} \cos(\omega t + \varphi) = \text{Re}[A e^{j\omega t}] \quad (5)$$

ifadesi elde edilir.

(5) denkleminde eşitliğin iki tarafı türetilip, Re ve $\frac{d}{dt}$ operatörlerinin lineerlik özelliğinden

faidalanarak,

$$\frac{A_{eff}}{A_m} \frac{d}{dt} A(t) = \text{Re}[j\omega * A e^{j\omega t}] \quad (6)$$

elde edilir. Buradan hareketle, $x(t)$ sinüsoidine karşılık X fazörü varsa, dx/dt sinüsoidine karşılık $j\omega * X$ fazörü vardır denir. Böylece türev operatöründen cebrik bir ifadeye dönüşüm

yapılmış olur. Bu durumda, zaman domeninde diferansiyel denklemlerin çözümü, fazör domeninde karmaşık sayılar cebrine dönüşmektedir.

Öte yandan, SSH'deki devrelerin analizini kolaylaştırmak amacıyla fazör dönüşümünden faydalanabilmek için, devre teoremlerinin fazör domeninde de geçerli olduğu kolayca gösterilebilir.

Fazör dönüşümünden yararlanarak, SSH'deki bir devrenin kalıcı çözümünü bulmak için zaman domeninde durum denklemlerini elde ederek diferansiyel denklem çözmek yerine devreleri doğrudan fazör domeninde analiz ederek cebrik işlem yapmanın daha kolay olacağı gözükmektedir.

RLC Devrelerinde Empedans ve Admitans Kavramı

Fazör domeninde devre analizi yaparken empedans/admitans kavramından yararlanılmaktadır. Empedans, bir 2-uçlunun, fazör domeninde, geriliminin akımına oranıdır. (6) dan yararlanarak, L ve C elemanlarına ait fazör domenindeki tanım bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$V_L = j\omega L * I_L \quad , \quad I_C = j\omega C * V_C \quad (7)$$

Böylece, L ve C iki uçlularına ait empedanslar,

$$\frac{V_L}{I_L} = Z_L = j\omega L \quad , \quad \frac{V_C}{I_C} = Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Admitans ise $Y = 1/Z$ şeklinde tanımlanmaktadır.

L ve C elemanı fazör domeninde karmaşık değerli direnç gibi tanımlandığından, SSH'deki bir RLC devresinin kalıcı çözümünü bulmaya yönelik yapılan devre analizi, fazör domeninde dirençli devre analizine dönüşmektedir.

Karmaşık Sayılarla İlgili Hatırlatma

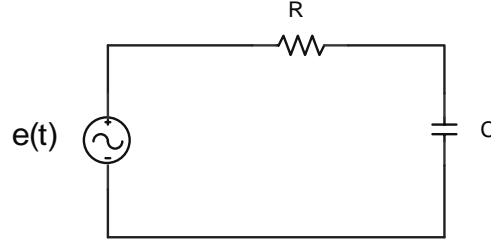
$V = a + jb$ karmaşık sayısının genliği $|V| = \sqrt{a^2 + b^2}$ ve açısı $\phi(V) = \arctan(b/a)$ ile tanımlıdır. Böylece $V = |V|e^{j\phi}$ şeklinde de ifade edilebilir.. Bu ifade şekli, bazı

hesaplamalarda kolaylık sağlar. Örneğin, $\left| \frac{V_1}{V_2} \right| = \frac{|V_1|}{|V_2|}$ ve $\phi\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \phi(V_1) - \phi(V_2)$ yazılabilir.

Deney boyunca avometrelerin ölçtüğü gerilim büyüklüğü, V fazörünün genliği $|V|$ 'dir.

Deneyin Yapılışı

1. Şekil 6.1 deki devreyi kurunuz. İşaret üreticini kullanarak, $e(t)$ giriş gerilimini, tepe değeri 5V, frekansı 1 kHz olan sinüsoidal bir işaret olarak elde ediniz. $R = 1k\Omega$ ve $C = 100nF$ seçiniz.



Şekil 6.1

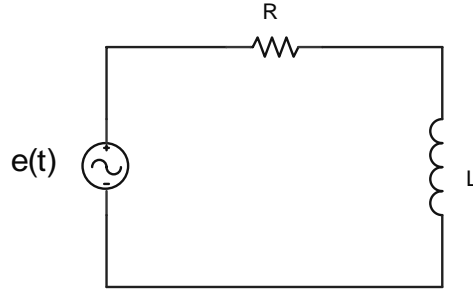
a) $|V_C|$ ve $|V_R|$ genliklerini ölçünüz. $|V_R|$ ifadesinden $|I_C|$ değerini elde ediniz. $\frac{|I_C|}{|V_C|}$ oranından

C değerini hesaplayınız.

b) V_C fazörünün parametrik (E , R , C ve ω cinsinden) ifadesini yazınız. Aynı şekilde $|V_C|$ ifadesini yazıp eleman değerlerini kullanarak hesaplayınız ve ölçülen değerle karşılaştırınız.

c) $|V_C|$, $|V_R|$ ve E arasındaki ilişkiyi ifade ediniz.

2. Şekil 6.2 deki devreyi kurunuz ve 1'de kapasite için yapılanları endüktans için tekrarlayınız.



Şekil 6.2

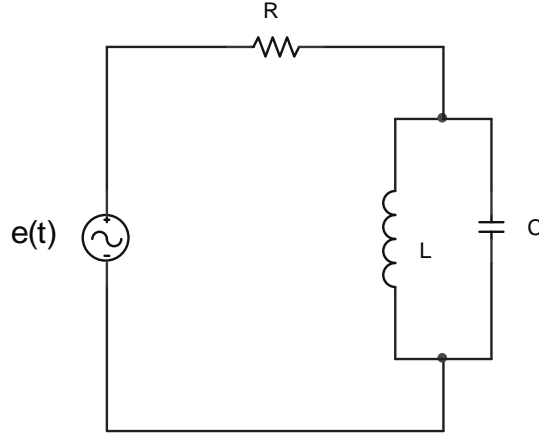
3. Şekil 6.2 deki devre için, $e(t)$ ve $v_L(t)$ gerilimlerini osiloskop ekranında aynı anda gözlemleyiniz.

a) Osiloskobun ölçekleri yardımıyla bu iki işaret arasındaki faz farkı için yaklaşık bir değer hesaplayınız.

b) $\frac{V_L}{E}$ ifadesinden yararlanarak, $e(t)$ ve $v_L(t)$ işaretleri arasındaki faz farkını analitik olarak ifade edip eleman değerlerini yerine koyarak hesaplayınız.

c) $v_R(t)$ ve $e(t)$ ile $v_R(t)$ ve $v_L(t)$ arasındaki faz farkları ne kadardır?

4. Şekil 6.3 teki devreyi kurunuz.



Şekil 6.3

a) $e(t)$ giriş geriliminin frekansını değiştirerek, paralel bağlı $L//C$ iki uçlusunun geriliminin maksimum olduğu frekansı tespit ediniz ve belli frekans değerleri için ölçülen gerilimin tahmini grafiğini çiziniz.

b) $Z_{L//C}$ empedansının ω 'ya bağlı ifadesini yazınız ve bu ifadeyi maksimum yapan frekans eşitliğini bulunuz. Eleman değerlerini kullanarak hesapladığımız frekans değerini ölçtüğünüz değerle karşılaştırınız.