

# **DENEY-4**

## **İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİLERİN DOĞRUSAL UYGULAMALARI**

**DENEYİN AMACI:** Bu deneyde işlemsel kuvvetlendiricinin doğrusal uygulamaları incelenecek ve işlemsel kuvvetlendirici kullanılarak çeşitli matematiksel fonksiyonlar gerçekleştirilecektir.

### **ÖN HAZIRLIK**

Deneye gelmeden aşağıda istenilen hesaplamaların ve araştırmaların yapılması ve yazılı olarak deney öncesinde teslim edilmesi gereklidir:

- Şekil 4.5'teki fark kuvvetlendiricisini, (4.1) ifadesini kullanarak analiz edin. Bulduğunuz sonucun A değeri sonsuza giderken (4.10) ifadesiyle aynı olup olmadığını kontrol edin.
- Aynı devrede (4.9) bağıntısını kullanarak  $a=1$ ,  $b=3$  değerleri için direnç değerleri 10K değerini geçmeyecek şekilde E12 direnç serisinden en uygun değerleri belirleyin.

Deneyden önce deney föyü dikkatli bir şekilde okunmalıdır.

### **GÖZDEN GEÇİRİLMESİ FAYDALI KONULAR**

- İşlemsel kuvvetlendirici nedir?
- İki farklı güç kaynağından pozitif ve negatif değerli gerilim değeri nasıl elde edilir?
- İşlemsel kuvvetlendiricilerin beslemesi nasıl yapılır?
- İşlemsel kuvvetlendiricilerde dengeleme gerilimi (offset) ne demektir, nasıl ayarlanır?

### **DENEYİN ÖĞRENCİYE KATACAKLARI**

- İşlemsel kuvvetlendiricinin nasıl besleneceğinin ve giriş/çıkış gibi bağlantılarının nasıl yapılacağının uygulamalı olarak görülmesi
- İşlemsel kuvvetlendirici doğrusal bölgedeki çalışmasının anlamının öğrenilmesi
- İşlemsel kuvvetlendiricinin doğrusal olarak çalıştırıldığında hangi fonksiyonları yerine getirebileceğinin öğrenilmesi

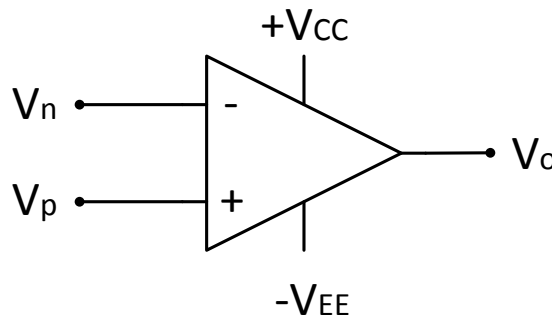
## KULLANILACAK MALZEMELER

- 1 adet iki çıkışlı güç kaynağı
- 1 adet multimetre (DC ölçümler için)
- 1 adet iki kanallı osiloskop (giriş ve çıkış işaretlerini görmek için)
- 1 adet 10 k $\Omega$  direnç
- 1 adet 100 k $\Omega$  direnç
- 1 adet 10 k $\Omega$  ayarlanabilir direnç
- 1 adet 100 k $\Omega$  ayarlanabilir direnç
- Ön çalışmada bulduğunuz 3 adet direnç
- 1 Adet 10 nF kapasite
- 1 Adet 741 işlemsel kuvvetlendirici
- Yeterli miktar ve uzunlukta bağlantı teli

## 1. İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Analog elektronik devrelerinin temel devre elemanı olan işlemsel kuvvetlendirici (Operational Amplifiers) günümüzde hemen hemen bütün analog elektronik devrelerinin vazgeçilmez bileşenlerindendir. Düşük frekanslı tüm uygulamalarda; özellikle ölçme, otomatik kontrol, Analog/Sayısal ve Sayısal/Analog dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılmaktalar. Kullanımın kolaylığından dolayı birçok mühendislik uygulamasında ilk tercih edilen devre elemanıdır.

İdeal işlemsel kuvvetlendirici; gerilim kazancı sonsuz, giriş direnci sonsuz, çıkış direnci sıfır olan ve istendiği kadar geribesleme uygulanabilen yani, mutlak kararlı bir kuvvetlendiricidir. İşlemsel kuvvetlendiriciye ilişkin devre sembolü Şekil-4.1 de gösterilmiştir (Devre gerçekleşirken ya da üzerinde ölçme yapılırken, devrenin beslemeleri de göz önüne alınmalıdır. Deneyde kolaylık olması açısından gösterilecek olmasına rağmen sembolik veya fonksiyonel gösterimde okuyucunun bunu bildiği varsayılarak, devrede sadelik sağlaması açısından besleme uçları gösterilmez.).



Şekil-4.1 İdeal işlemsel kuvvetlendiricinin sembolik gösterimi

Yukarıdaki verilen temel özelliklerinin biri dışında tamamı uygulamada sağlanması mümkün olmayan özelliklerdir. Sonsuz giriş empedansı ile gerilim kazancı ve sıfır çıkış

empedansının sağlanması fiziksel olarak mümkün olmasa da bunların yaklaşık olarak elde edilmesi de uygulama açısından yeterlidir (Pratikte en az 10.000 civarında gerilim kazancı, birkaç  $10 \Omega$  mertebesinde çıkış direnci ve  $1M \Omega$  kadar giriş direnci yeterli olur). Ancak işlemsel kuvvetlendiriciler, hemen hemen bütün doğrusal uygulamalarında negatif geribeslemeli olarak kullanıldıklarından, kararlılık tam olarak sağlanmalıdır.

Şekil-4.1 deki sembol incelenirse, işlemsel kuvvetlendiricinin iki girişi olduğu görülür. İşlemsel kuvvetlendiricinin temel çalışma prensibi bu iki girişin farkını kuvvetlendirmektir. Buna göre “A” kazanç olmak üzere doğrusal bölgede çalışan bir işlemsel kuvvetlendiricinin çıkış gerilimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_o = A(V_p - V_n) \quad (4.1)$$

### 1.1 Çıkış Gerilimi Sınırları

İşlemsel kuvvetlendiricilerin çıkış gerilimlerinin alabilecekleri değerlerin alt ve üst sınırları vardır.  $E_{sat+}$  ve  $E_{sat-}$  sırasıyla bu alt ve üst sınırlar olmak üzere işlemsel kuvvetlendiricinin çıkış gerilimi bu sınırlar da dikkate alınarak şu şekilde gösterilebilir:

$$V_o = \begin{cases} E_{sat-} & V_p - V_n < \frac{E_{sat-}}{A} \\ A(V_p - V_n) & \frac{E_{sat-}}{A} < V_p - V_n < \frac{E_{sat+}}{A} \\ E_{sat+} & V_p - V_n > \frac{E_{sat+}}{A} \end{cases} \quad (4.2)$$

Çıkışın sınırlara varmadığı bölge işlemsel kuvvetlendiricinin doğrusal bölgesi olarak adlandırılır. Bu formülde doğrusal bölgeye (ikinci denklem) bakılacak olursa A (gerilim kazancı) arttıkça bu bölgede çalışan kuvvetlendirici için giriş fark gerilimi ( $V_p - V_n$ ) değerinin sınırlarının daraldığını, A sonsuza giderken de  $V_p - V_n$  değerinin sıfır olduğu görülmektedir. Bu nedenle kazancı yeterince büyük olan işlemsel kuvvetlendiriciler doğrusal bölgede çalıştıklarında giriş gerilimleri eşit kabul edilir. Doğrusal bölge sınırları A sonsuza giderken daraldığı için  $V_p$  ve  $V_n$  girişlerine iki farklı gerilim uygulayarak işlemsel kuvvetlendiricinin lineer bölgede çalışmasını sağlamak pratik olarak mümkün değildir, çünkü yüksek kazançlı işlemsel kuvvetlendiricilerde giriş gerilimlerindeki çok ufak bir fark bile yüksek değerli kazançla çarpılarak çıkış geriliminin sınırlara varmasını sağlayacaktır. Bu nedenle doğrusal uygulamalarda işlemsel kuvvetlendirici negatif geribeslemeli olarak çalıştırılır.

İşlemsel kuvvetlendirici, yapısı sebebiyle tek kutuplu olduğu için giriş geriliminin frekansı arttıkça kazancı düşer. Bu nedenle işlemsel kuvvetlendirici devreleri ölçülürken, kurulan devrelerin belirli bir frekanstan daha yüksek frekanslarda çalışamayacağı göz önüne alınmalıdır.

## 1.2 Dengesizlik Gerilimi

İdeal olmayan işlemsel kuvvetlendiricilerde pozitif giriş ile negatif giriş tam olarak simetrik değildir. Bu simetri bozukluğu iki giriş arasında çok küçük de olsa bir farklılık oluşmasına sebep olmaktadır. Özellikle giriş tranzistorlarının bire bir aynı üretilmemesinden kaynaklanan bu duruma dengesizlik denir. İşlemsel kuvvetlendiricilerde, dengesizlikten dolayı giriş gerilimlerinin farkı sıfır olduğunda çıkış geriliminin sıfır olmadığı görülür. Bu durumda çıkışın sıfırlanması ancak sıfırdan farklı, belirli bir giriş fark gerilimi uygulandığında sağlanabilir. Çıkışın sıfır olmasını sağlayan bu giriş fark gerilimine “giriş dengesizlik gerilimi” denir.

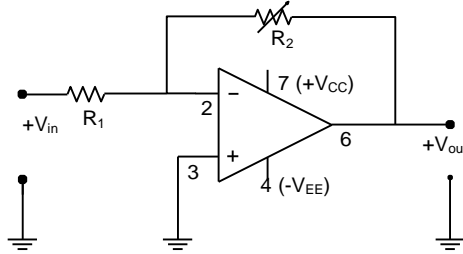
## 2. FAZ ÇEVİREN KUVVETLENDİRİCİ

Faz çeviren kuvvetlendirici (negatif kazançlı kuvvetlendirici) yapısı Şekil 4.2’te görülmektedir. İşlemsel kuvvetlendiricinin giriş akımı sıfır kabul edilerek eviren ucun bağlandığı düğüm için (2 numaralı bacak) için Kirchhoff akımlar yasası yazılırsa:

$$I_{R1} + I_{R2} = 0 \quad (4.3)$$

olduğu görülür. Bu akımlar direnç ve gerilim değerleri cinsinden ifade edildiğinde şu denklem bulunur:

$$\frac{V_{in} - V_n}{R_1} + \frac{V_{out} - V_n}{R_2} = 0 \quad (4.4)$$



Şekil-4.2 Faz çeviren kuvvetlendirici.

Kazanç sonsuz kabul edilmeden devre şu şekilde analiz edilebilir:

(4.1) denklemini kullanıldığında  $V_n$  yerine  $-\frac{V_{out}}{A}$  konularak devrenin çıkış gerilimi ve kazancı şu şekilde olacaktır.

$$\frac{V_{in} + \frac{V_{out}}{A}}{R_1} + \frac{V_{out} \left(1 + \frac{1}{A}\right)}{R_2} = 0 \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_2}{R_1 + \frac{1}{A}(R_1 + R_2)} \quad (4.5)$$

Kazanç sonsuz kabul edildiğinde ise devrenin analizi şu şekilde basitleştirilebilir:

A kazancı sonsuz kabul edildiğinde:

$$V_n = \frac{-V_{out}}{A} = 0$$

Olacağından (4.4) denklemi aşağıdaki gibi kısaltılabilir:

$$\frac{V_{in}}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_2} = 0 \quad (4.6)$$

Buradan devre kazancı:

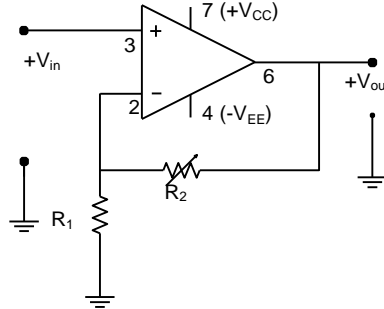
$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.7)$$

olacaktır. Dikkat edilirse (4.5) denklemi A sonsuza giderken (4.7) denklemine dönüşmektedir. Deneydeki işlemsel kuvvetlendiricilerde A'nın yeterince büyük olduğu düşünülerek deneydeki devreler daha basit olan ikinci yöntemle analiz edilecektir.

**Deney-2.1:** İşlemsel kuvvetlendiriciyi  $\pm 15$  V besleme kaynaklarına bağlayın. Daha sonra  $R_1=10K$  ve  $R_2=100K$  dirençlerini bağlayıp çıkışta kırılma olmayacak şekilde girişe uygun genlikli 1kHz frekanslı sinüs uygulayın.  $R_2$  direncinin değerini 100K, 75K, 50K, 25K ve 10K değerlerine getirerek çıkış genliğinin  $R_2$  ile nasıl değiştiğini kaydedin. (Not: Ayarlı direncin değerini ölçerken devreye bağlı olmamasına dikkat edin.) Bu ölçümlerden elde edeceğiniz kazanç –  $R_2$  eğrisini ideal eğriyle karşılaştırın.

### 3. FAZ ÇEVİRMİYEN KUVVETLENDİRİCİ

Faz çevirmeyen (pozitif kazançlı) devre yapısı şekildeki gibidir:



Şekil-4.3 Faz çevirmeyen kuvvetlendirici.

Devre analiz edilecek olursa devrenin kazancının

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.8)$$

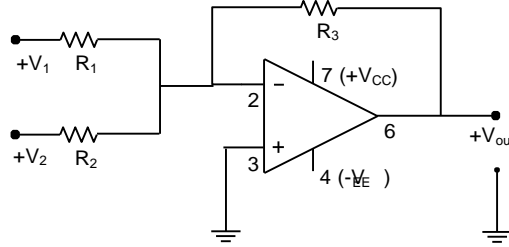
olduğu görülür.

**Deney-2.2:** Şekildeki devreyi kurarak bir önceki direnç değerleriyle ölçümleri tekrarlayın. Elde edeceğiniz kazanç –  $R_2$  eğrisini ideal eğriyle karşılaştırın.

$R_1$  direnci sonsuz  $R_2$  direnci sıfır olsaydı devrenin kazancının hangi değeri alacağını, bu durumda devrenin işlevinin ne olacağını araştırın.

#### 4. TOPLAMA VE FARK KUVVETLENDİRİCİLERİ

İşlemsel kuvvetlendiricilerin gerek analog hesaplama gerekse otomatik kontrol devrelerinde kullanılışları genellikle toplama ve fark devreleri biçimindedir. Bu nedenle bu tür uygulamalara örnek olarak Şekil-4.4 de bir toplama ve Şekil-4.5 de ise bir fark alma devresi verilmiştir.

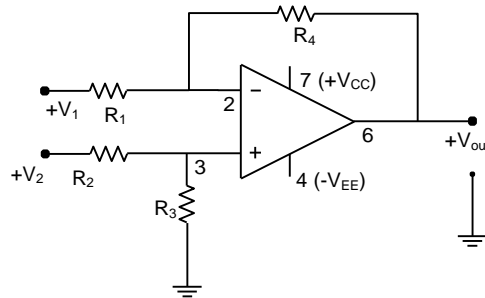


Şekil-4.4 Toplama devresi.

Şekil-4.4 deki toplama devresi esasında iki tane faz çeviren kuvvetlendirici içermektedir.  $V_2$  gerilimi sıfıra getirildiğinde devre  $V_1$ 'den  $V_0$ 'ya  $-\frac{R_3}{R_1}$  kazançlı,  $V_1$  sıfıra getirildiğinde ise devre  $V_2$ 'den  $V_0$ 'ya  $-\frac{R_3}{R_2}$  kazançlı bir faz çeviren kuvvetlendirici gibi davranmaktadır. Bu nedenle toplamsallık ilkesi uygulanırsa devrenin çıkış gerilimi giriş gerilimi cinsinden,

$$V_o = -\left(\frac{R_3}{R_1}V_1 + \frac{R_3}{R_2}V_2\right) = -(aV_1 + bV_2) \quad (4.9)$$

biçiminde ifade edilebilir.



Şekil-4.5 Fark devresi.

Şekil-4.5 de verilen fark kuvvetlendiricisi de hem faz çeviren hem de faz çevirmeyen kuvvetlendirici yapısı içermektedir. Fark devresindeki mantıkla devre analiz edilirse devrenin  $V_1$ 'den  $V_0$ 'ya  $-\frac{R_4}{R_1}$  kazançlı  $V_P$ 'den (işlemsel kuvvetlendiricinin evirmeyen girişi)  $V_0$ 'ya  $(1 + \frac{R_4}{R_1})$  kazançlı bir devre gibi davrandığı görülür. İşlemsel kuvvetlendirici girişleri akım çekmediği için  $R_2$  ve  $R_3$  dirençleri bir gerilim bölücü

oluşturacaktır. Bu gerilim bölücünden yararlanılarak  $V_P$  yerine  $V_2 \frac{R_3}{R_1+R_2}$  konulur ve toplamsallık ilkesi uygulanırsa çıkış gerilimi giriş gerilimleri cinsinden,

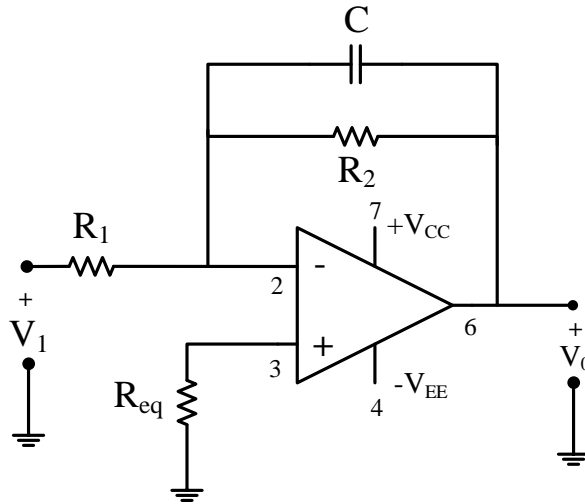
$$V_O = V_2 \frac{R_3}{R_2+R_3} \left[ 1 + \frac{R_4}{R_1} \right] - \frac{R_4}{R_1} V_1 = aV_2 - bV_1 \quad (4.10)$$

biçiminde ifade edilir.

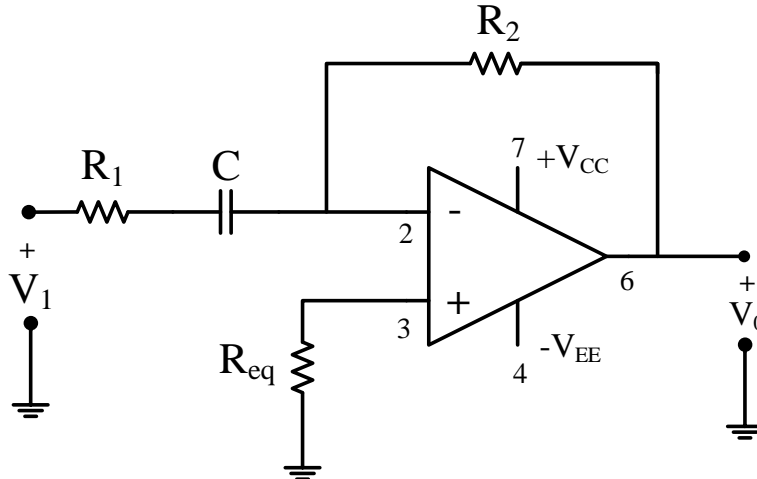
**Deney-2.3:**  $V_1$  girişine 5V DC gerilim,  $V_2$  girişine uygun genlikli 1kHz frekanslı sinüs işareti vererek iki devre için de “a=1” ve “b=3” için bulduğunuz direnç değerlerini kullanarak devreleri kurunuz. İki devrenin de çıkış gerilimini inceleyin.

## 5. TÜREV VE İNTEGRAL ALICI DEVRELER

Elektronikte türev ve integral işlemini yapmak için dinamik elemanlardan (kapasite ve endüktans elemanlarından) yararlanılır. Bir işlemsel kuvvetlendirici yardımıyla bu işlemleri yapmak son derece kolaydır. Şekil-4.6 ve 4.7 de sırasıyla bir integral ve türev alma devresi gösterilmiştir.



Şekil-4.6 İntegral devresi.



**Şekil-4.7** Türev devresi.

Uygun çalışma frekanslarında integral devresinde R<sub>2</sub> direncinden akan akım ile türev devresinde R<sub>1</sub> direncinin gerilimi ihmal edilebilir. Böylelikle integral devresi için R<sub>2</sub> sonsuz, türev devresi için R<sub>1</sub> sıfır kabul edilerek ve önceki bölümlerde bahsedilen yöntemler kullanılarak integral devresinin gerilim transfer fonksiyonun,

$$V_o = -\frac{1}{R_1 C} \int V_1 dt + V_o(t=0) \quad (4.11)$$

türev devresinin gerilim transfer fonksiyonun,

$$V_o = -R_2 C \frac{dV_1}{dt} \quad (4.12)$$

olduğu kolayca gösterilebilir.

İşlemsel kuvvetlendiricinin kazancının giriş geriliminin frekansı arttıkça azaldığı önceden belirtilmişti.  $\sin(\omega t)$  fonksiyonunun türevinin  $\omega \cdot \cos(\omega t)$  olduğu göz önüne alınırsa, türev alıcı devrenin frekansı arttıkça kazancı artan bir devre olduğu görülür. Bu nedenle işlemsel kuvvetlendiricinin diğer lineer uygulamalarıyla karşılaştırıldığında türev alıcı devrenin çalışabildiği frekans aralığı genelde daha düşük kalmaktadır.

**Deney-2.4:** İntegral alıcı devreyi R<sub>1</sub>=10K, R<sub>2</sub>=100K, C=10nF, R<sub>eq</sub>=10K olacak şekilde kurarak girişine uygun frekans ve genlikte asimetrik kare dalga uygulayın, çıkışı gözlemleyip kaydedin.

Türev alıcı devreyi aynı eleman değerleriyle kurarak girişine uygun frekans ve genlikte asimetrik üçgen dalga uygulayın, çıkışı gözlemleyip kaydedin.



Deneyi yaptıran Ar. Gör.:

Deney Tarihi:

Deneyi yapan öğrencinin

Grup Nu:

Adı Soyadı:

Öğreci Nu:

e-posta:

## ÖLÇME SONUÇLARINI İŞLEME KISMI

(Genlik değerlerini tepeden tepeye ölçünüz)

### EK-A (DENEY-2.1)

$R_1 = 10K$  Giriş Genliği =

$R_2$	Çıkış Genliği
100K	
75K	
50K	
25K	
10K	

### EK-B (DENEY-2.2)

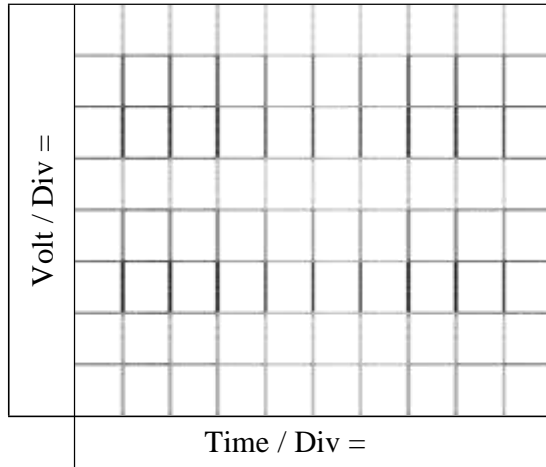
$R_1 = 10K$  Giriş Genliği =

$R_2$	Çıkış Genliği
100K	
75K	
50K	
25K	
10K	

### EK-C (DENEY-2.3)

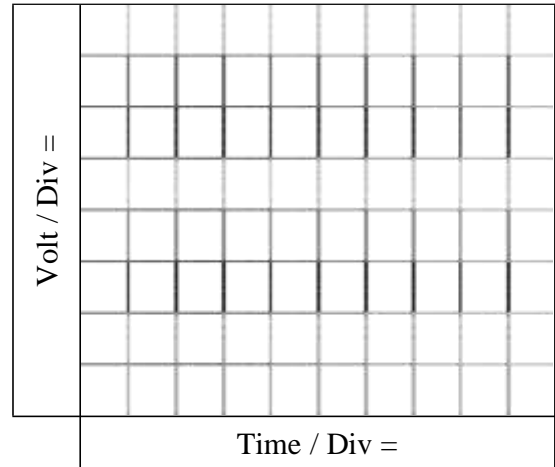
#### Toplama Kuvvetlendiricisi

Sinüs Genliği =



#### Fark Kuvvetlendiricisi

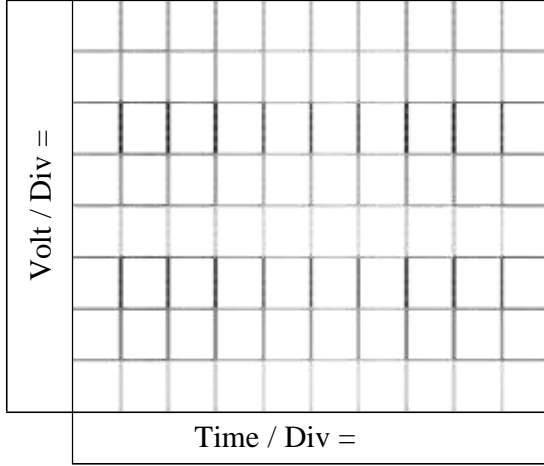
Sinüs Genliği =



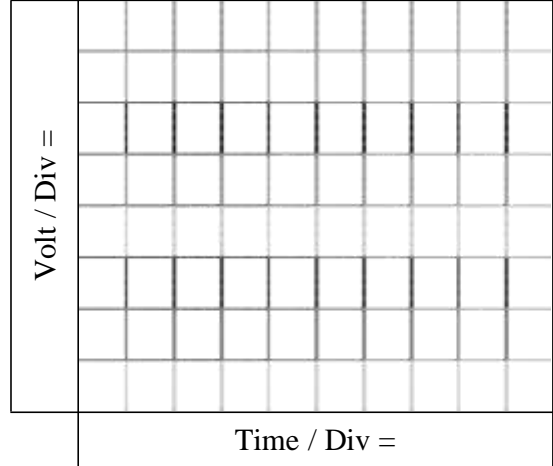
## EK-D (DENEY-2.4)

### İntegral Alıcı Devre

Giriş İşareti

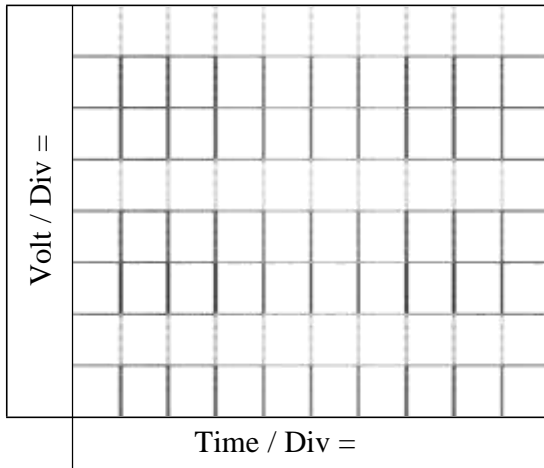


Çıkış İşareti

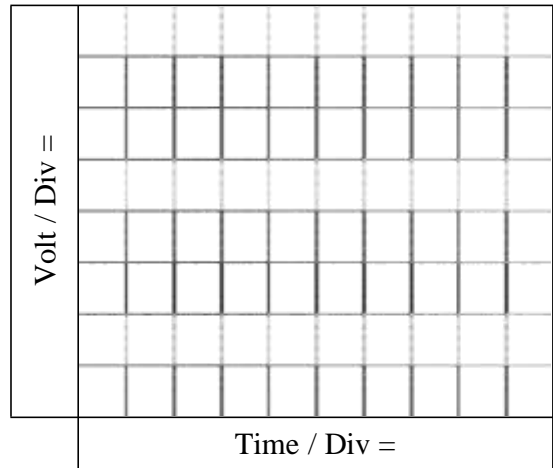


### Türev Alıcı Devre

Giriş İşareti

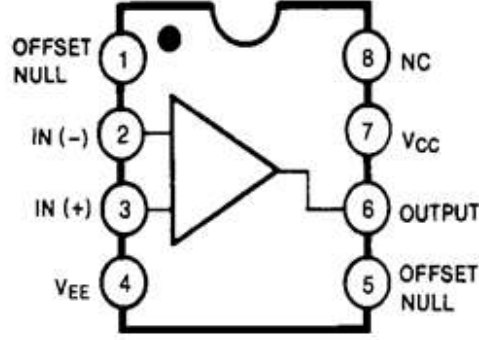


Çıkış İşareti



## EK-BİLGİLER

### 741 İşlemsel Kuvvetlendirici Bağlantıları



## DENEY 4 – RAPORDA İSTENENLER

- Deneydeki bütün elektronik devreleri bilgisayar destekli bir analiz aracıyla tekrar inceleyiniz (PSpice, LTspice, Cadence vb). (Eviren ve evirmeyen kuvvetlendiricide bütün direnç değerlerine ait kazançları tek bir grafik üzerinde gösterebilirsiniz). Devreyi ve benzetim sonuçlarını rapora ekleyiniz. Ölçümler ile karşılaştırın.
- Deney 2.1 ve 2.2’de elde ettiğiniz kazanç –  $R_2$  eğrilerini ideal eğrilerle karşılaştırınız.
- Deney 2.2’de  $R_1$  direncinin sonsuz,  $R_2$  direncinin sıfır olması halinde kazancın hangi değeri alacağını ve bu durumda devrenin işlevinin ne olacağını araştırınız.
- Aşağıdaki terimlerin anlamlarını araştırınız:
  - Ortak İşareti Bastırma Oranı (CMRR – Common Mode Rejection Ratio)
  - Birim Kazanç Bant Genişliği (Unity Gain Bandwidth)
  - Yükselme Eğimi (SR - Slew Rate)
  - Besleme Gerilimi Seviyesi Çıkış (Rail to Rail)