

DOGRUSAL DEĞİŞEN FARK TRANSFORMATÖRLERİNİN (LVDT)  
ÇALIŞMA PRENSİPLERİ, ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMALARI

Mustafa ALÇI, Kenan DANIŞMAN

Erciyes Üniversitesi Muh. Fak. Elektronik Böl. KAYSERİ

ÖZET

Doğrusal değişen fark transformatörü (linear variable differential transformer-LVDT) ortak indüktans prensibine göre çalışan bir sensördür. İlk defa 2. Dünya Savaşı yıllarında uçaklar ve denizaltılardaki bir takım kapalı-çevre elektromekanik kontrol sistemleri için düşünülmüş, fakat son yıllara kadar pek kullanılamamıştır. Bir transduser olarak veya işaret işleyici çiplerle (signal-conditioning chips) birlikte, gelişen analog ve sayısal bilgi işleme sistemleri için, bazı firmalar tarafından üretilmeye başlanmıştır. İvme, basınç, açısal ve doğrusal yerdeğişimi (displacement) transduseri olarak bilim ve endüstrinin birçok sahasında kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak; işlem kontrolü, robotik kontrol, ölçü sistemleri ve bilgisayar destekli servo kontrol sistemleri verilebilir.

Bu makalede, modern LVDT'nin çalışma prensipleri, yapım metodları, özellikleri ve işaret işleyici çiplerle kullanımı genel olarak tanıtılmıştır.

PRINCIPLES OF OPERATION, FEATURES and APPLICATIONS of  
LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMERS (LVDTs)

SUMMARY

Linear variable differential transformer is a sensor which operates in accordance with principles of the mutual inductance. During the World War II, it was considered for use in aircrafts and submarines for some closed-loop electromechanical control systems, but did not see wide spread use until more recent times. Nowadays LVDTs are produced as a transducer alone or as a complete unit

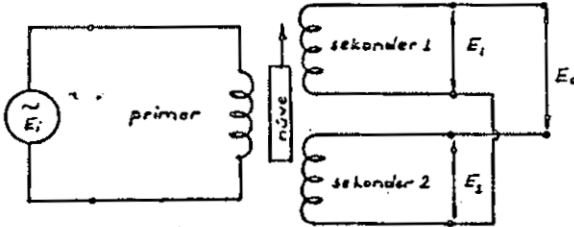
comprising transducer and signal conditioning circuits for connects analog and digital signal processing. These applications employ the LVDT for various measurements, including acceleration, pressure, rotational and linear displacement. They are widely used in science and industry, for example; in process control, robotic control, measurement systems, and computer aided servo-control systems.

In this paper, a review of modern LVDT practice is given such as principles of operation, method of construction, performance specifications, and signal conditioning circuits.

### 1.LVDT'NİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

LVDT, bir sistem veya mekanik bir eleman içerisindeki çok küçük bir doğrusal hareketi ölçebilen elektromekanik bir transduserdir. Yapısı itibarıyla, bir primer bobinin her iki tarafına simetrik aralıklarla yerleştirilmiş, iki sekonder bobinden meydana gelen silindirik bir düzendir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, sekonder bobinler birbirine seri bağlı olmakla beraber, sargı yönleri farklıdır. Yani aralarında 180 derece faz farkı vardır. Bu durumda, primer sargısı sekonderin biri ile aynı fazda iken, diğeri ile aralarında 180 derecelik faz farkına sahiptir. Bobinlerin ortasında nüve olarak, ferromagnetik bir malzemeden rod şeklinde yapılmış, demir bir çubuk kullanılır. Bu nüve, bobinler arasında magnetik akı yolu sağladığı için, nüvenin pozisyonu ortak indüktans vasıtasıyla çıkış voltajlarını kontrol etme imkanı vermektedir. Şekil 2'de bir LVDT'nin kesiti ve çıkış karakteristiği görülmektedir[1].

Primere bir ac voltaj uygulandığı zaman sekonder sargılarından da voltaj indüklenir. Eğer nüve tam ortadaysa, her iki sekonder sargısından da herhangi bir çıkış alınamaz. Sargılar arasında 180 derece faz farkı olduğu için, çıkış voltajları birbirini yokeder. Bu özel duruma denge (null) pozisyonu denir ki, ihmal edilebilecek kadar çok küçük bir artık (residual) voltaj dışında, çıkış sıfırdır. Nüve hareket ettirilerek sekonder sargılarından birine yaklaştırılıp diğerinden uzaklaştırılırsa, nüvenin yaklaştığı sargıda çıkış voltajı artarken diğerinde aynı oranda azalmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, denge pozisyonunun her iki tarafında da düzgün bir doğrusal çıkış elde edilmektedir. Buradaki doğru-



Şekil 1: LVDT'nin devre şeması

sallık (linearity), genellikle tam skalanın  $\pm 0.025$  ile  $\pm 0.05$ 'i arasında değişmektedir[2]. Bu büyüklükler elde edilirken primere uygulanan ac voltaj, normal olarak 50 ile 20000 Hz arasında frekansa sahip, 3 ile 15 voltluk rms değerindeki sinusoidal bir voltajdır. Bazı özel uygulamalar için frekans üst sınırı 1MHz'e kadar çıkarılabilmesine rağmen, en iyi performans 1 KHz ile 10 KHz arasında elde edilmektedir[3].

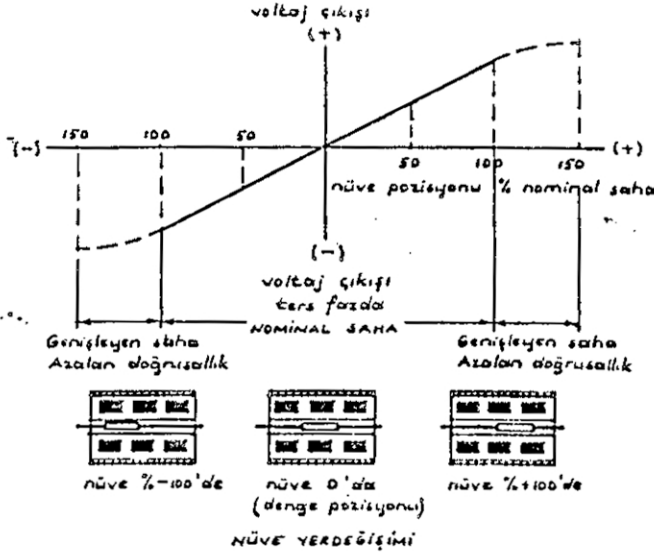
## 2. LVDT'NİN ÖZELLİKLERİ

LVDT'ye geniş bir uygulama imkanı sağlayan bazı özellikleri vardır. Bu özelliklerden bir kısmı sadece kendisinde vardır ve henüz başka bir transduserde mevcut değildir. LVDT'nin bütün özellikleri şu şekilde sıralanabilir[4]:

a. Sürtünmesiz Ölçme. Bobinler ve nüve arasında herhangi bir fiziksel temas yoktur. Bu sebeple, LVDT sürtünmesiz bir elemandır. Bu özellik, sürtünme toleransı olmayan hassas bazı malzemelerin, titreşim veya dinamik sapma testleri gibi kritik ölçümlerinde LVDT'nin kullanılmasına imkan sağlar.

b. Sonsuz Mekaniksel Ömür. Bir LVDT'de bobinler ve nüve arasında herhangi bir temas veya sürtünmenin olmaması, aşınmanın da olmadığı anlamına gelir. Bu durum, LVDT'ye sonsuz bir ömür vermektedir ve malzemelerin yorulma ömrü gibi bazı testleri için en önemli özelliği teşkil etmektedir. Ayrıca, sonsuz mekaniksel ömür; uçaklar, füzeler, uzay araçları ve kritik endüstriyel cihazların güvenilirliğinin yüksek olmasında da çok önemlidir.

c. Nüve ve Bobin Ayrılığı. Bobin ve nüvenin bir LVDT'de bir-



Şekil 2: LVDT'nin kesiti ve çıkış karakteristiği

birinden ayrı olması, ikisinin arasının magnetik olmayan bir malzemeyle yalıtılarak, basınç veya aşındırıcı herhangi bir sıvıdan bobin kısmının korunmasına da imkan vermektedir. Bu özellik, LVDT nin servo-valf'larda, hidrolik ve pünomatik kontrol sistemlerinde bir geribesleme transduseri olarak kullanımını sağlamaktadır.

d. Sonsuz Kararlılık. Bir LVDT'de kararlılık, en küçük nüve hareketinin çıkışta meydana getirdiği, ölçülebilen değişiklik olarak tanımlanır. İdealde sonsuz olmakla beraber bu büyüklük, yaklaşık olarak bir milimetrenin milyonda birkaçı kadardır. Esasında kararlılık, LVDT çıkışındaki değişikliği hissedebilecek elektronik devrenin hassasiyeti ile sınırlanmaktadır. Elektronik devrenin kazanç ve gürültü seviyesi gibi bazı faktörler kararlılığı olumsuz yönde etkileyerek onu sonlu duruma getirmektedirler.

e. Denge (Null) Tekrarlanabilirliği. LVDT'nin yapısındaki doğal simetri, onun tekrarlanabilir denge özelliğini de meydana getirir. Bir LVDT'deki denge durumu son derece kararlıdır. Bu durum onun yüksek kazançlı kapalı-çevre kontrol sistemlerinde, mükemmel bir denge durumu göstericisi olarak kullanılmasına imkan vermektedir.

f. Giriş/Çıkış İzolasyonu. Aslında LVDT bir transformatör



olduğundan, giriş ve çıkışı, yani primer ve sekonderi arası tamamen izole edilmiştir. Bu hali, LVDT'nin herhangi bir ara tampon katına ihtiyaç duymadan, bir analog hesaplayıcı elamanı olarak kullanılmasını sağlar.

g. Çapraz Eksen Duyarsızlığı. LVDT esas olarak ekstenel nüve hareketine karşı duyarlıdır. Pratik olarak çapraz ekstenli iki harekete karşı duyarsızdır.

### 3. BİR LVDT'NİN SEÇİMİNDE DİKKATE ALINACAK FAKTÖRLER

Piyasada genellikle ac ve dc olmak üzere iki temel tip LVDT ile karşılaşmaktadır. Bunlardan ac LVDT, yukarıda çalışma prensibi anlatılan elemandır. Dc LVDT ise, birisi ac LVDT kısmı diğeri de işaret işleyici (signal conditioning) modül olmak üzere iki bölümden meydana gelmektedir. İşaret işleyici modül amaca göre, osilatör, çevirici (converter), senkronizasyon, demodülatör gibi bir çok katı ihtiva etmekte ve tek bir silikon çip üzerine yerleştirilmektedir. Böylece, sistemin ağırlığı ve hacmi küçüldüğü gibi fiyatı da düşmektedir.

Bir LVDT'nin seçiminde, 2.kısımda anlatılan özelliklerin dışında, uygulama yapılacak yere göre aşağıdaki faktörlerinde dikkate alınması gerekir[5].

1. Nominal Doğrusal Saha. Bir LVDT'nin nominal doğrusal sahası, nüvenin denge pozisyonundan her bir yöne hareket ettirilmesi ile çıkış voltajında elde edilen doğrusal hattır. Bu nominal doğrusal sahanın dışında çıkış, doğrusallıktan eğriselliğe doğru kaymaya başlar. Şekil 2'de bu durum açıkça görülmektedir.

2. Doğrusallık. Nominal doğrusal saha içerisinde, en ideal doğrudan maksimum sapma doğrusallık olarak tanımlanır. Nüve hareketine karşı çıkış voltajındaki değişimin grafiği olarak gösterilir. Doğrusallık, genellikle tam skalanın yüzdesi şeklinde ifade edilmektedir.

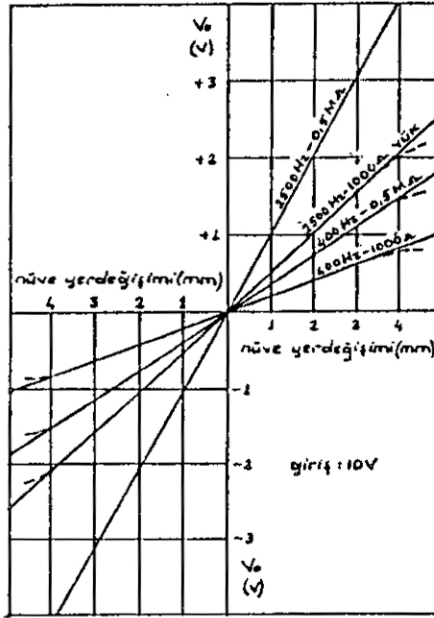
3. Duyarlılık. Bir LVDT için diğeri bir önemli karakteristik, primerin belli bir giriş voltajıyla uyarılarak, tam skala sapmasının transduserin çıkışında ölçülmesiyle elde edilir. Duyarlılık genellikle 1 V'luk giriş voltajında, bir mil'lik (=0.0254mm) nüve yerdeğişiminin mV cinsinden çıkışı olarak ifade edilir. Bir LVDT'nin gerçek çıkış voltajı yüke ve frekansa bağlı olduğundan, duyarlılıkla ilgili grafikler farklı yük değişimlerine göre verilmektedirler (Şekil 3).

4. Çevre Faktörleri. Bir LVDT'nin seçiminde çevre faktörleri oldukça önemlidir. Mesela, LVDT'nin çıkışı sıcaklıkla değişeceğinden, yüksek hassasiyet istenen devrelerde, sıcaklığı kompanse edecek özel devrelere ihtiyaç duyulabilir.

Bobinlerin yalıtımını olumsuz yönde etkileyeceğinden veya metallerde aşınmaya (corrosion) sebep olacağından, sistem nemden korunmalıdır. Titreşim ve şoklar LVDT için ciddi bir problem meydana getirmektedir.

5. Nüvenin Boyutları ve Ağırlığı. Duyarlılığı artırmak için, doğrusallık ve maksimum doğrusal saha azalmasına rağmen gerekirse, magnetik nüvenin boyu küçültülebilir. Nüvenin kütlesi ise tüp şeklinde nüve kullanılarak azaltılabilir.

6. Magnetik Ekranlama. Yakın çevresindeki magnetik veya ferromagnetik malzeme LVDT'nin magnetik alanının dağılmasına sebep



Şekil 3: Yük ve frekansın LVDT'nin çıkış karakteristiği üzerine etkisi.

olacağından, magnetik ekranlama oldukça önemlidir. Hatta, LVDT'ye çok yakın fakat magnetik olmayan malzemedeki eddy akımları bile LVDT'nin çıkışını etkileyebilmektedir. Çünkü böyle bir durumda, eddy akımları zıt yönde magnetik akı oluşturarak, gerçek akının azalmasına sebep olabilirler. Bu sakıncaları ortadan kaldırmak için standart LVDT'ler genellikle, yüksek geçirgenliği olan demir, paslanmaz çelik veya bunların alaşımlarından yapılmış özel muhafazalar içinde bulundurulularak bir çeşit magnetik ekranlama yapılmış olur.

7. Artık Voltaj. Bir LVDT'de nüve eğer denge pozisyonunda ise çıkış voltajının ideal olarak sıfır olması gerekir, fakat gerçekte sıfır değildir. İhmal edilebilecek kadar çok küçük bir çıkış voltajı mutlaka vardır. Artık voltaj denilen bu çıkışa, girişteki uyarma voltajının harmonik bileşenleri ve primer ile sekonder arasındaki kaçak kuplaj kapasitesi sebep olmaktadır. Bu voltajın büyüklüğü, çıkış voltajının tam skala değerinin %1'i kadardır. Kaçak kuplaj kapasitesinin değerini azaltabilen bir takım metodlarla bu değer daha da küçültülebilmektedir[6].

#### 4. LVDT'NİN UYGULAMA ALANLARI

Şimdiye kadar literatüre geçen LVDT uygulamaları sayılamayacak kadar çok değildir. Bu sebeple, çalışmanın bu bölümünde LVDT'nin günümüze kadar endüstriyel uygulamasının yapıldığı çalışmaların hemen hepsi isim olarak verilmekte ve içlerinden bazıları hakkında daha geniş açıklama yapılmaktadır.

##### LVDT'nin Kullanıldığı Yerler (7):

- a. Basınç transduserlerinde Bourdon tüpü, kapsül veya bir diyaframın yerdeğişiminin ölçülmesinde,
- b. Otomatik valf pozisyonu kontrollerinde,
- c. Uçaklarda aracın hızını kontrol etmek için kullanılan, motor yakıtını kontrol sistemlerinde,
- d. Göz içerisindeki hidrostatik basıncı elektronik olarak ölçmeye yarayan Tonometre'lerde,
- e. Rüzgar gülü gibi, biri sabit diğeri hareketli şekilde mıknatıslanmış demirler bulunan sistemlerde itici kuvvetin ölçülmesinde (vane-type measurements),
- f. Gerilme ölçen cihazlarda (Strain Gages),
- g. Hareketli bir parçanın veya gövdenin hızını ölçerek onu

elektriksel büyüklüğe çeviren ivme ölçerlerde (accelerometers),

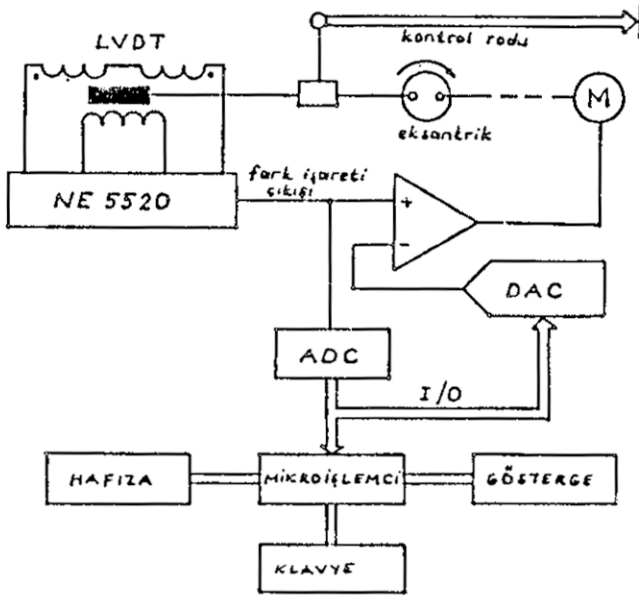
h. Yatay düzleme göre, yer kürenin magnetik kuvvetinin yönünü ölçmeye yarayan ve bilhassa sismik araştırmalar ile uçaklarda kullanılan inklinometrelerde (inclinometers),

i. Otomobil gövdelerinin robotlar yardımıyla kontrol edilmesinde [8],

j. Tv tüplerinin yüzey tabakalarının ölçülmesi ve kontrolünde,

k. Yüksek kararlılığa sahip pozisyon-frekans çevirici devrelerde,

1. Servo başlatıcılı (servo-actuator) uçuş kontrollerinde ve mekanik takipçili servo kapalı çevrelerinde (mechanical follower servo-loop): LVDT'nin kullanıldığı servo sistemlerden birine örnek olarak, NE 5520 işaret işleyicisi çiple gerçekleştirilen, mikroişlemcili bir endüstriyel veri elde edici (data acquisition) sistemi gösterilebilir[9]. Şekil 4'de blok şema olarak gösterilen bu sistemde, ikili (binary) bilgi a/d çeviriciden sonra doğrudan 8 bit'lik bir mikroişlemciye gitmektedir. Bu bilgi gelecekte kulla-



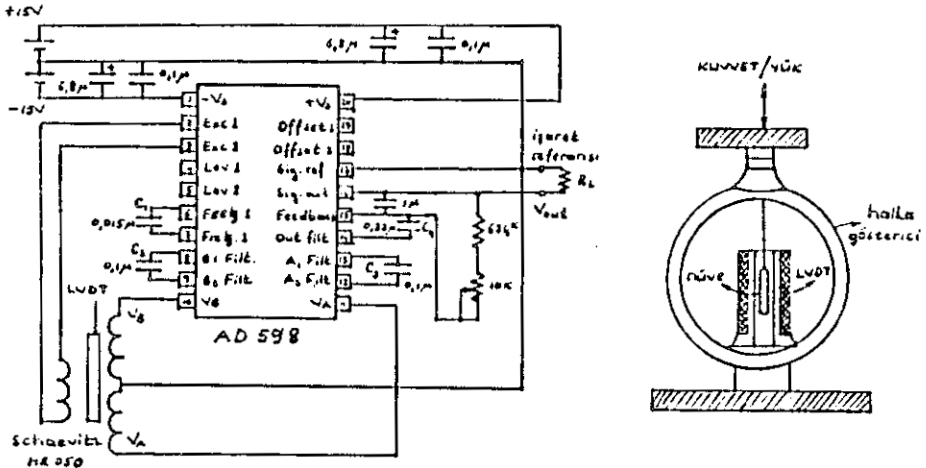
Şekil 4: LVDT fark sensörü kullanılan mikroişlemci kontrollü servo sistem

nılmak üzere depolanabileceği gibi, özel bir kontrol durumu için gerçek zamanlı (real time) olarak da geliştirilebilmektedir. Gerçek zamanlı çalışmada, mikroişlemciden alınan bilgiyi geriye yani asırlı kontrol çevresine analog bilgi olarak besleyebilmek için bir de d/a çevirici kullanılmaktadır. Burada çevrenin (loop) optimum kontrolü ve maksimum kompanse (damping) için özel bir programa gerek duyulmakla beraber, gerçek zamanlı karar verme ve aynı zamanda sayısız çok artırılmış olan LVDT girişlerini kullanma imkanı sağlanmaktadır.

m. Kuvvet ölçmede kullanılan yük hücrelerinde (load cells) ve ağırlık ölçme sistemlerinde: Bu alandaki en son gelişme AD 598 LVDT işaret işleyicisi ile sağlanmıştır. Şekil 5'de kesiti ve devre şeması gösterilen, Halka Göstericili Ağırlık Skalası (Proving Ring-Weigh Scale) adı verilen bu alet ile, çok küçük ve nispeten büyük olan, ağırlıkların elektronik olarak ölçülmesi mümkün olmuştur. HR 050 Schaevitz tip LVDT kullanılarak yapılan deneylerde, 500 lb (=227 Kg)'de 10 V'luk skala sapması için tasarlanan bu sistemle, 10 gramlık bir ağırlık için, osiloskop ekranında 450  $\mu$ V'luk bir sapma ve LVDT'de 1.32 mikroiçlik bir yerdeğişimi gözlenmiştir[10].

## 5. SONUÇ

Gelişen bilim ve teknoloji ile beraber, LVDT'nin uygulama



Şekil 5: Halka Göstericili Ağırlık Skalası'nın kesiti ve devre şeması.

alanı biraz daha genişlemektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarla, transformatör nüveleri amorf malzemelerden yapılarak, maksimum akı yoğunluğunun artırılabilmesi ve histerisis gibi bazı kayıplarının da azaltılabileceği deneylerle gözlenmiştir. Bu çalışmaların pratikte uygulanabilir olmasıyla, bir işaret transformatörü olan LVDT'nin de kararlılık, duyarlılık ve bilhassa nominal doğrusal saha gibi bazı özelliklerinin daha da iyileşebileceği bilinmektedir. Ayrıca, işaret işleyici çipler ve mikroişlemci kullanılan kontrol sistemlerinin gelişmesine paralel olarak, endüstriyel alanda LVDT'nin kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır.

#### 6.KAYNAKLAR

1. Bennett, B. Use an LVDT to construct a simple scale. EDN August 5, 1979, pp.116-118.
2. Ellis, JF. & Walstrom, PL. Moving coil linear variable differential transformer. Rev. Sci. Instrum., v.49, n.3, March 1978, pp.398-400.
3. Hadley, L. & Herceg, E. Signal-conditioning chip eases LVDT interfacing. Electronic Design, September 17, 1981, pp.151-156.
4. Schaevitz, H. LVDT, Principle of Operation and Application Technics. Force, Pressure, Displacement and Flow Sensor, Proc.of the S & A Symposium-Enschede, Netherlands, 13th-14th May, 1982, pp.63-78.
5. Schaevitz Engineering. Finding the right LVDT. Instrum. & Control System, January 1977, pp.61-62.
6. Doebelin, EO. "Measurement Systems, Application and Design" McGraw-Hill Book Comp. 4th Edition, 1990, pp.233-243.
7. Robinson, IE. Predicting LVDT Performance. Proc.of the Cont. West Conf. (-Part of the International Controls Conf. and Exhibition), CA, USA, 16th-18th Sept.1985, pp.175-185.
8. Weinstein, E. LVDTs on the factory floor. Instrum. & Cont. Systems, May 1982, pp.59-61.
9. Hadley, L. & Herceg H. Interface IC for linear variable differential transformers. Electronic Components and Applications, v.4, n.3, May 1982, pp.180-184.
10. Analog Devices -Linear Databook 1990/1991. LVDT Signal Conditioner, pp. 13:23 - 13:39.