

155113

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRU AKIM KARŞILAŞTIRICILI
DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Hab. Müh. Kaan GÜLNİHAR

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman: Doç.Dr. Sarp ERTÜRK

MAYIS 2004

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRU AKIM KARŞILAŞTIRICILI
DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Hab. Müh. Kaan GÜLNIHAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Mayıs 2004

Tezin Savunulduğu Tarih : 6 Temmuz 2004

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Sarp ERTÜRK

(.....)

Üye

Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

(.....)

Üye

Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ

(.....)

Mayıs 2004

DOĞRU AKIM KARŞILAŞTIRICILI DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜ

Kaan GÜLNİHAR

Anahtar Kelimeler: Doğru Akım Karşılaştırıcı, Direnç Ölçümü, Direnç Ölçüm Köprüsü, Düşük Seviyeli Gerilim ve Akım Ölçme, Direnç Kalibrasyonu.

ÖZET: Bilimin hangi dalında araştırma yapılırsa yapılsın, araştırılan konu ile ilgili parametrelerin doğru ve hassas bir şekilde ölçülmesi büyük önem taşır. Günümüzde, hassas ölçüm yapan cihazlar, bilimsel araştırma laboratuvarları ve metroloji enstitüleri tarafından sürekli kullanılmaktadırlar. Bu tezde, elektriksel direncin doğru ve hassas bir şekilde ölçülmesi ele alınmış ve doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüleri incelenmiştir. Bu ölçüm köprüleri, iki direncin oranını ppm düzeyinde belirsizlik ile ölçmekte ve standart direnç kalibrasyonunda kullanılmaktadır. Yapılan pratik çalışmalarda, bu tip bir köprünün önemli bir kısmını oluşturan doğru akım karşılaştırıcı gerçekleştirilmiş ve iyi sonuçlar alınmıştır.

Tez çalışması sürecinde, zamana ve sıcaklığa bağımlılığı çok düşük akım kaynaklarının yapımı, düşük seviyeli gerilim ve akım ölçme teknikleri ve doğru akım ile oluşturulan manyetik akıların sezilmesi konularında iyi sonuçlar alınmıştır.

Tez çalışması, TÜBİTAK-UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü) bünyesinde bulunan Empedans Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma halen devam etmekte ve 0.1 ppm ölçüm belirsizliği hedeflenmektedir.

DIRECT CURRENT COMPARATOR RESISTANCE MEASUREMENT BRIDGE

Kaan GÜLNİHAR

Keywords: Direct Current Comparator, Resistance Measurement, Resistance Measurement Bridge, Low Level Voltage and Current Measurement, Resistance Calibration

ABSTRACT: Parameters about the subject of scientific research have to be measured correctly and accurately. Nowadays, sensitive measurement devices are being used by scientific research laboratories and metrology institutes. In this master thesis, accurate measurement of electrical resistance has been examined and direct current comparator resistance measurement bridges have been studied. These measurement bridges give the ratio of two resistance values in ppm level uncertainty and they are used for standart resistor calibration. In practical study, direct current comparator which is the main part of the resistance measurement bridge has been realized and suitable results have been obtained.

During this work, realization of current sources whose time and temperature dependencies are very low, measurement techniques of low level voltage and current, and DC (direct current) magnetic flux sensitivity have been concluded.

This master thesis has been realized in Impedance Laboratory at TÜBİTAK-UME (National Metrology Institute). Completion of the measurement system are in progress to achieve 0.1 ppm measurement uncertainty.

TEŞEKKÜR

Bu konuda çalışma fırsatını bana sunan sayın Doç. Dr. Sarp ERTÜRK'e (KO.Ü), sayın Doç. Dr. Sevilay UĞUR'a (TÜBİTAK-UME), araştırma ve geliştirme safhasında yardımlarını esirgemeyen sayın Yakup GÜLMEZ'e (TÜBİTAK-UME) ve Ulusal Metroloji Enstitüsü, Empedans Laboratuvarındaki değerli meslektaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK-UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü) 'de gerçekleştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. DİRENÇ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	3
2.1. Temel Direnç Ölçüm Yöntemleri	3
2.1.1. Voltmetre-ampermetre yöntemi	3
2.1.2. Akım kaynağı ve voltmetre yardımı ile dirençleri karşılaştırma yöntemi ...	4
2.1.3. Doğru akım köprü devresi	5
2.1.4. Doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsü	6
2.2. Düşük Değerli Direnç Ölçümlerinde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar	6
2.2.1. Bağlantı noktası direnci ve direnç ölçümündeki bağlantı şekilleri	6
2.2.1.1. İki uçlu ölçüm tekniği	7
2.2.1.2. Dört uçlu ölçüm tekniği	8
2.2.2. Termal EMF	10
2.2.2.1. Akımı ters çevirme metodu	10
2.3. Güç Katsayıları	12
BÖLÜM 3. AKIM KARŞILAŞTIRICILAR	13
3.1. Alternatif Akım Karşılaştırmacılar	13

3.2. Doğru Akım Karşılaştırmacılar	17
3.2.1. Amper-tur denge dedektörü	18
3.2.1.1. Manyetik nüveler	18
3.2.1.2. Dedeksiyon/modülasyon sarımları	18
3.2.1.3. Elektrostatik ekranlama	19
3.2.1.4. Manyetik ekranlama	19
3.2.2. Doğru akım karşılaştırmacıların çalışması	20
BÖLÜM 4. DOĞRU AKIM KARŞILAŞTIRICILI DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜ ...	24
4.1. Direnç Ölçüm Köprüsünün Çalışma Prensipleri	24
4.2. Direnç Ölçüm Köprüsünün Çözünürlüğü	29
4.2.1. Gerilim dengelemede çözünürlük	30
4.2.2. Akım dengelemede çözünürlük	31
4.3. Yardımcı Oran Sarımları ile N_x Oran Sarımına Çözünürlük Verilmesi	34
BÖLÜM 5. OTOMATİK DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜ	36
5.1. Mikroişlemci Kontrollü Otomatik Çalışma	36
5.2. Ölçüm Süreci ve İşlemler	38
5.3. R_x/R_s Oranının Hesaplanması	40
BÖLÜM 6. DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜNÜ OLUŞTURAN DEVRELER	45
6.1. Howland Akım Kaynakları	45
6.2. DA ve AD Çeviriciler	49
6.2.1. DA çevirici	49
6.2.2. AD çevirici	52
6.3. EM-A10 Nanovolt Yükselteç	56
6.4. Royer Tipi Osilatör	57
6.5. Demodülatör Devresi	58
6.6. PI Kontrol Geri Besleme Devresi	59
6.7. 80C535 Mikrokontrolör Kartı	60
6.8. AD ve DA Çeviriciler İçin Arabirim Kartı	62

6.9. Tuş Takımı ve LCD Ekran	64
BÖLÜM 7. SONUÇLAR	66
7.1. Ölçüm Yöntemi	66
7.2. Guildline Doğru Akım Karşılaştırmalı Ölçüm Sonuçları	67
7.3. UME Yapımı Doğru Akım Karşılaştırmalı Ölçüm Sonuçları	68
7.4. Ölçüm Sonuçlarının Analizi	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	72



SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

B	: Manyetik akı yoğunluğu
B_{SAT}	: Nüvenin doymaya gittiği manyetik akı yoğunluğu
f	: Frekans
H	: Manyetik alan
I_x	: Birincil akım kaynağının oluşturduğu akım
I_s	: İkincil akım kaynağının oluşturduğu akım
N	: Sarım tur sayısı
N_x	: Oran sarımlarında, birincil kısmın sarım tur sayısı
N_s	: Oran sarımlarında, ikincil kısmın sarım tur sayısı
nV	: Nanovolt yükseltecin çıkış gerilimi
R_b	: Direnç bağlantısını yapan kablonun direnci
R_x	: Ölçülmesi istenen direnç
R_s	: Standart direnç
T_{N_x}	: Denge durumundaki N_x oran sarımı tur sayısı
t	: Dengeleme için N_x sarımına $\pm$ yönde eklenen küçük sarım sayısı
V_x	: R_x direnci üzerine düşen gerilim
V_s	: R_s direnci üzerine düşen gerilim
V_{EMF}	: Termal EMF'in oluşturduğu gerilim
V_{out}	: Çıkış gerilimi
V_{os}	: Nanovolt yükseltecin oluşturduğu ofset gerilimi
Φ	: Manyetik akı
μ	: Manyetik permabilite

AD	: Analog-digital
ADC	: Analog-digital converter
D	: Dedektör
DA	: Digital-analog
DAC	: Digital-analog converter
DNL	: Differential non-linearity
EMF	: Electromotor force
EPROM	: Electrically programmable read only memory
FFT	: Fast fourier transform
G	: Galvanometre
INL	: Integral non-linearity
INT	: Interrupt
LCD	: Liquid crystal display
LSB	: Last significant bit
MSB	: Most significant bit
ppm	: part per million
P.C.	: Power coefficient
PC	: Personal computer
PI	: Proportional integration
PGA	: Programmable gain amplifier
RAM	: Random access memory

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Voltmetre – ampermetre yöntemi	4
Şekil 2.2. Akım kaynağı ve voltmetre yardımı ile dirençleri karşılaştırma yöntemi	4
Şekil 2.3. Wheatstone köprüsü devresi	5
Şekil 2.4. Bağlantı noktalarında oluşan kontak dirençleri	7
Şekil 2.5. İki uçlu direnç ölçüm tekniği	8
Şekil 2.6. Dört uçlu direnç ölçüm tekniği	9
Şekil 2.7. Termal EMF etkisinin akımı ters çevirme yöntemi ile ortadan kaldırılması	11
Şekil 3.1. <i>B-H</i> histerisiz eğrisi	13
Şekil 3.2. Manyetik nüvede akının oluşumu	14
Şekil 3.3. Alternatif akım karşılaştırıcısının temel yapısı	15
Şekil 3.4. Alternatif akım karşılaştırıcısının fiziksel yapısı	16
Şekil 3.5. Doğru akım karşılaştırıcısının fiziksel yapısı	17
Şekil 3.6. Elektrostatik ekranlama	19
Şekil 3.7. Manyetik ekranlama türleri	20
Şekil 3.8. Doğru akım uygulanmadığı durumda nüve manyetizasyonu ve denge noktasından kaçış	21
Şekil 3.9. Oran sarımlarına doğru akım uygulanması durumunda nüve manyetizasyonu ve dengeden kaçış	22
Şekil 3.10. Doğru akım uygulanmasının çıkış işaretine etkisi	23
Şekil 4.1. Karşılaştırılacak dirençlerin köprüye bağlantısı	24
Şekil 4.2. Direnç ölçüm köprüsü temel blok şeması	26
Şekil 4.3. Karşılaştırıcı çıkışının geri besleme ile kontrolü	27
Şekil 4.4. Osilatör/modülatör ve demodülatör eklenmiş blok şema	28
Şekil 4.5. İki ayrı oran sarımının seri bağlantı seçenekleri	29
Şekil 4.6. Yardımcı oran sarımları ile N_x oran sarımına çözünürlük verilmesi	35
Şekil 5.1. Doğru akım karşılaştırıcılı otomatik direnç ölçüm köprüsü blok şema	37

Şekil 5.2. Nanovolt yükseltecin oluşturduğu Vos ofset gerilimi	41
Şekil 6.1. Howland tipi akım kaynağı	45
Şekil 6.2. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan howland tipi akım kaynağı	47
Şekil 6.3. Vishay S102K tipi dirençlerin sıcaklık ile değişimi	48
Şekil 6.4. AD669 DA çevirici bacak dizilişi ve iç yapısı	49
Şekil 6.5. REF01 +10 V gerilim referans entegresi ve çıkış gerilimi ayarı	50
Şekil 6.6. DA çeviriciye uygulanan sayısal veri ile çıkış geriliminin değişimi	51
Şekil 6.7. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan DA çevirici devresi	51
Şekil 6.8. LTC1605 AD çevirici bacak dizilişi ve iç yapısı	52
Şekil 6.9. REF192 +2.5 V gerilim referans entegresi ve bağlantı şekli	53
Şekil 6.10. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan AD çevirici devresi	54
Şekil 6.11. AD çevirici girişinde kullanılan programlanabilir kazanç yükselteci	54
Şekil 6.12. PGA204 programlanabilir kazanç yükselteci entegresi	55
Şekil 6.13. EM-A10 nanovolt yükselteç	56
Şekil 6.14. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan royer tipi osilatör	57
Şekil 6.15. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan demodülatör devresi	58
Şekil 6.16. Manyetik akıyı otomatik sıfırlayan PI kontrol geri besleme devresi	59
Şekil 6.17. PI kontrol sistemi ile doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsü	59
Şekil 6.18. Intel 80C535 mikrokontrolör	60
Şekil 6.19. Direnç ölçüm köprüsü mikrokontrolör kartı	61
Şekil 6.20. AD ve DA çeviriciler için arabirim kartı	62
Şekil 6.21. Mikrokontrolör kartına 74C922 entegresi ile 4x4 tuş takımı bağlantısı	64
Şekil 6.22. Mikrokontrolör kartına 2x16 karakter LCD ekran bağlantısı	65
Şekil 7.1. Doğru akım karşılaştırmalı duyarlılık ölçüm yöntemi	66
Şekil 7.2. Guildline doğru akım karşılaştırmalı duyarlılık grafiği	67
Şekil 7.3. UME yapımı doğru akım karşılaştırmalı duyarlılık grafiği	68

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Is ölçüm akımı değişiminin çözünürlüğe etkisi	32
Tablo 4.2. Ns oran sarımının tur sayısının değiştirilmesinin çözünürlüğe etkisi	33
Tablo 4.3. Karşılaştırılacak dirençlerin değerinin değişiminin çözünürlüğe etkisi	33
Tablo 6.1. PGA204 sayısal kazanç ayarı	55
Tablo 6.2. Arabirim kartı hafıza haritası adresleri	63
Tablo 7.1. Guildline doğru akım karşılaştırmacı ölçüm sonuçları	67
Tablo 7.2. UME yapımı doğru akım karşılaştırmacı ölçüm sonuçları	68
Tablo 7.3. Guildline doğru akım karşılaştırmacı duyarlılığı	69
Tablo 7.4. UME yapımı doğru akım karşılaştırmacı duyarlılığı	70

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Teknolojinin baş döndürücü bir hızla geliştiği günümüzde, bilimsel araştırma, sanayi, ticaret, ulusal savunma, sağlık gibi alanlarda yapılan çalışmaların başarıyla sonuçlandırılması hassas, güvenilir ve doğru ölçümlere bağlıdır. Bugün toplumun hemen her kesiminin sahip olmayı olağan saydığı ev eşyalarının, otomotiv ürünlerinin vs. ekonomik olabilmesini sağlayan seri üretim, bu ürünleri oluşturan yüzlerce parçanın hassas olarak aynı karakterde yapılabilmesinin sonucudur. Bu ise boyutların, sıcaklığın, ağırlığın, gücün, empedansın, akımın, direncin, basıncın ve çeşitli malzeme karakteristiklerinin doğru olarak ölçülebilmesiyle sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra giderek artan uluslararası işbölümü, bir ürünü oluşturan parçaların değişik ülkelerde üretilip daha sonra birleştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Bu durum, ürün kontrolü için ölçülen parametrelerin benzer koşullarda aynı sonuçları vermesiyle olasıdır.

İşte bu nedenle metroloji kavramı ortaya çıkmıştır. Metroloji sözcük anlamı olarak "ölçme bilimi"dir. Bütün ölçü sistemlerinin temeli olan birimlerin tanımlanması metrolojinin başlıca görevidir. Bu birimlerin mümkün olan en yüksek doğrulukla tanımlanabilmesi için, yüksek duyarlıklılı ölçme tekniklerinin ve fiziğin en yeni bilgilerinin kullanılması gereklidir. Bu da her ulusun metroloji enstitüsü tarafından sağlanır. Oldukça geniş kapsamlı bilimsel çalışmalarda elde edilen ve zamanla değişimi yıllık "milyonda bir"ler (ppm-part per million) derecesinde olan standartların doğrulukları kalibrasyon aracılığıyla tüm ölçme ve test cihazlarına aktarılır.

Doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsü direnç standartlarının kalibrasyonunda kullanılmakta olan bir ölçüm cihazıdır. Bu teze konu olan çalışma TÜBİTAK-UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü) bünyesinde bulunan Empedans Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma halen devam etmekte ve 0.1 ppm belirsizlik hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında, doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsünün ortaya çıkarılması amaç olmakla birlikte, zamana ve sıcaklığa bağımlılığı çok düşük akım kaynaklarının yapımı, düşük seviyeli gerilim ve akım ölçme teknikleri, doğru akım ile oluşturulan manyetik akıların sezilmesi konularında da başarılı sonuçlar alınmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, temel direnç ölçüm metodları verilmiştir. Hassas direnç ölçümü yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar ve teknikler bu bölümde anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, akım karşılaştırmalıların temel çalışma prensipleri anlatılmıştır. Anlaşılması daha kolay olan alternatif akım karşılaştırmalıları hakkında bilgi verildikten sonra, doğru akım karşılaştırmalıların yapısı anlatılmıştır. Bu bölümde doğru akım karşılaştırmalıların yapım teknikleri hakkında da bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, doğru akım karşılaştırmalı kullanılarak iki direncin oranının nasıl bulunabileceği hakkında teorik bilgi ve köprü mantığı anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsünün yapısı anlatılmış ve mikroişlemci kontrollü bir sistemin R_x / R_s oranını nasıl hesaplayabileceği verilmiştir.

Altıncı bölümde, yapılan pratik çalışmalar ile ilgili bilgi verilmiştir. Direnç ölçüm köprüsünün temel blokları, kullanılan elektronik devre elemanları, bunların özellikleri, şemalar verilmiştir.

Yedinci bölümde, gerçekleştirilen doğru akım karşılaştırmalıının ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar ile ticari bir köprünün doğru akım karşılaştırmalıısının sonuçları kıyaslanmıştır.

BÖLÜM 2. DİRENÇ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

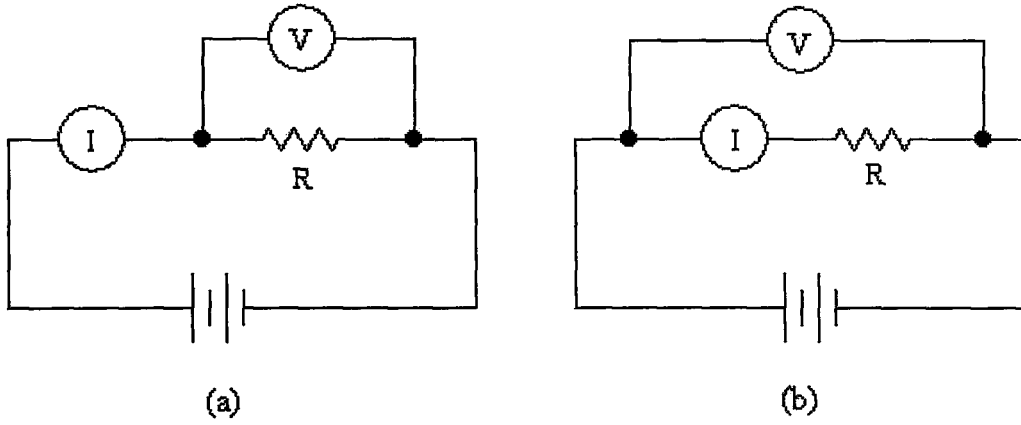
2.1. Temel Direnç Ölçüm Yöntemleri

2.1.1. Voltmetre-ampermetre yöntemi

Bu yöntem, kullanılan cihazların hemen her laboratuvarında bulunabilmesi açısından oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Eğer bir direnç üzerine düşen gerilim ve bu direnç üzerinden akan akım ölçülebilirse, bilinmeyen direnç değeri R_x , ohm kanunundan kolayca hesaplanabilir;

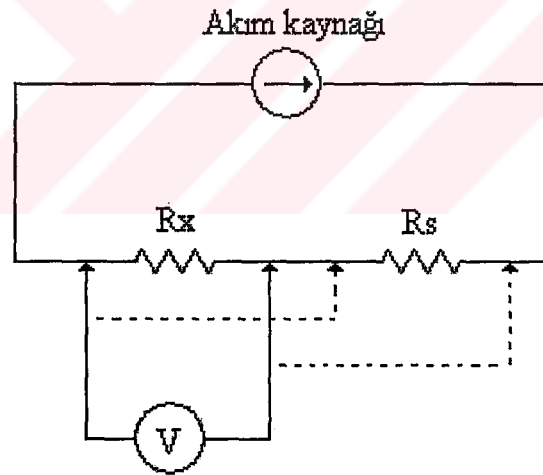
$$R_x = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'e göre ampermetrenin iç direnci sıfır ve voltmetrenin iç direnci de sonsuz olmak durumundadır. Şekil 2.1'de gösterildiği üzere, voltmetre ve ampermetreyi devreye bağlamak için iki yöntem mevcuttur. Şekil 2.1 a'daki düzenekte ampermetre, hem voltmetre hem de direncin üzerinden geçen akımı okumaktadır. Voltmetrenin iç direncinin pratikte sonsuz olmadığı düşünülürse ölçülen akımın sadece dirençten akan akım olmadığı ve voltmetreden akan akımın da ampermetrede okunduğu görülmektedir. Şekil 2.1 b'deki düzenekte ise voltmetre, ampermetre ve bilinmeyen direnç üzerine düşen gerilimi ölçer. Burada, bilinmeyen direncin değeri, ampermetrenin direncinden büyük alındığında, ölçüm hatası mümkün olduğunca azaltılmış olur. Böylece, şekil 2.1 a'daki yöntem küçük değerli dirençler için, şekil 2.1 b'deki yöntem ise büyük değerli dirençler için en uygun seçim olacaktır. Ölçülmüş olan akım ve gerilim değerlerinin bilinmesiyle, direncin değeri denklem 2.1 ile verilmiş olan ohm kanunu ile kolayca hesaplanır. Bu yöntem, ölçüm doğruluğunun $\pm \%1$ olmasının yeterli olduğu durumlar için uygundur.



Şekil 2.1. Voltmetre - ampermetre yöntemi.

2.1.2. Akım kaynağı ve voltmetre yardımı ile dirençleri karşılaştırma yöntemi



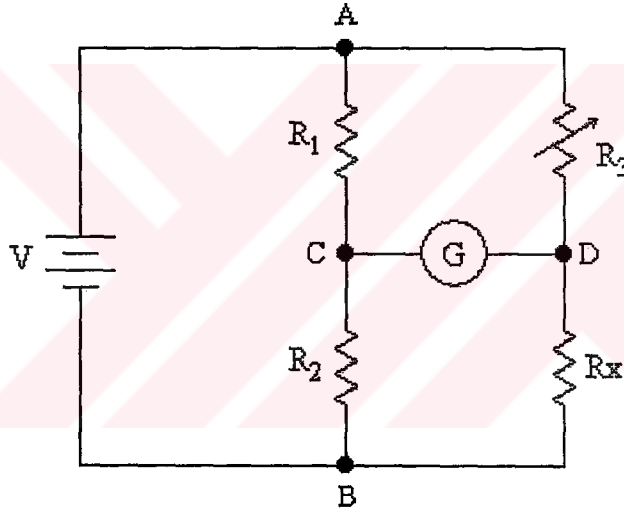
Şekil 2.2. Akım kaynağı ve voltmetre yardımı ile dirençleri karşılaştırma yöntemi.

Bu yöntemde, seri olarak bağlanan standart direnç ile değeri bilinmeyen direnç üzerine kararlı bir kaynaktan akım uygulanır ve dirençler üzerine düşen gerilim değeri voltmetre yardımı ile ölçülür. R_x direncinin değeri, $R_x / R_s = V_x / V_s$ bağıntısından hesaplanır. Ölçüm düzeneği şekil 2.2’de gösterildiği gibidir. Bu yöntem çok düşük ölçüm belirsizliği

gerektiren durumlarda kullanılamaz, ancak bu yöntemle voltmetre-ampermetre yönteminden daha düşük belirsizlik elde etmek mümkündür.

2.1.3. Doğru akım köprü devresi

Doğru akım köprü devreleri, genellikle bir direncin değerini hassas olarak tespit etmek gerektiğinde kullanılırlar. En iyi bilinen ve en çok kullanılan direnç köprüsü Wheatstone köprüsüdür. Bu köprüye ait devre şeması şekil 2.3’de görüldüğü gibidir. Bu köprü devresi genelde değeri 1 Ω ’dan daha yüksek dirençler için kullanılır.



Şekil 2.3. Wheatstone köprü devresi.

Bu köprü devresinde R_x bilinmeyen direnci, R_3 ise köprüyü dengeye getirmek için kullanılan değişken direnci göstermektedir. Köprünün çalışması, C ve D noktaları arasındaki galvanometre üzerinden hiç akım akmayacak şekilde köprünün kollarının ayarlanması prensibine dayanmaktadır. Köprünün denge konumuna gelmesi, denklem 2.2’nin sağlanması anlamına gelecektir.

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.2)$$

Eğer R_x bilinmeyen direnç ve R_1 , R_2 ve R_3 'de değerleri bilinen dirençler ise, R_x değeri denklem 2.3 ile hesaplanabilir.

$$R_X = R_3 \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.3)$$

2.1.4. Doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsü

Doğru akım karşılaştırma köprüleri, oldukça hassas oldukları için genellikle birincil seviye laboratuvarlar tarafından, çok düşük belirsizlik gerektiren ölçümlerde kullanılırlar. Kullanılan bağlantı tellerinin dirençlerinden ve akımın kararlılığından etkilenmediği ve aynı zamanda dirençlerin her biri kendi güç seviyesinde ölçüldüklerinden oldukça kullanışlıdır.

2.2. Düşük Değerli Direnç Ölçümlerinde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

2.2.1. Bağlantı noktası direnci ve direnç ölçümündeki bağlantı şekilleri

Direnç standartlarının ölçümlerinde, iki uçlu ve dört uçlu olmak üzere iki tip bağlantı şekli mevcuttur. Genellikle direnç ölçümlerinde her iki yöntemi de kullanmak mümkündür. Düşük değerli direnç ölçümlerinde, bağlantı tellerinden gelen direnç etkisini azaltmak için dört uçlu ölçüm yönteminin kullanılması uygun olmaktadır. Dört uçlu ve iki uçlu bağlantı şekilleri için ölçüm bölgeleri aşağıdaki gibidir;

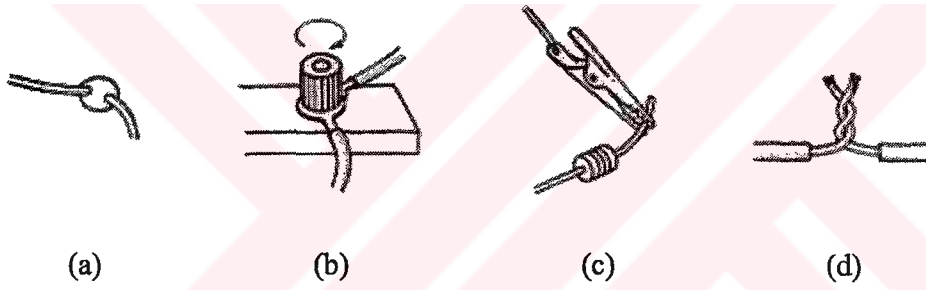
Dört uçlu bağlantı : 0.1 mΩ - 10 kΩ

İki uçlu bağlantı : 10 kΩ - 1 MΩ

Ancak hangi bağlantı şekli kullanılırsa kullanılsın, direncin kontak bağlantılarının nasıl olduğu, ölçümün doğruluğu açısından çok önemlidir. Direncin devreye bağlandığı noktada, direnç teli ile devredeki diğer elemanlara bağlantı yapılan nokta arasında bir kontak direnci oluşur. Bu kontak direnci genellikle devrede ihmal edilir. Bu durum,

kontak direncinin devredeki diğer dirençlerden çok küçük olduğu durumlarda bir sorun yaratmaz, ancak 1Ω ve daha düşük değerli dirençlerin ölçüldüğü devrelerde kontak direncinin etkisi önem kazanır ve hata getirir.

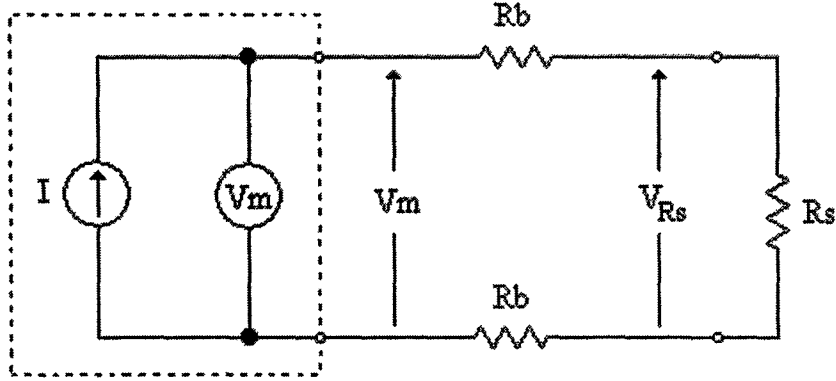
Tellerin birbirine lehimlenmesi (şekil 2.4 a) ya da sıkı ve temiz bir şekilde sıkıştırılması (şekil 2.4 b) durumunda oluşacak olan kontak direnci oldukça düşük olurken, timsah klips kullanılarak (şekil 2.4 c) ya da birbirine dolamak (şekil 2.4 d) suretiyle yapılan bağlantılar da göz ardı edilemeyecek kadar büyük olabilir. Ayrıca bazı kirli ve korozyona uğramış bağlantı elemanları da istenmeyen kontak dirençleri oluşturabilirler. Bu yüzden kontak noktalarının temiz olması oldukça önemlidir.



Şekil 2.4. Bağlantı noktalarında oluşan kontak dirençleri.

2.2.1.1. İki uçlu ölçüm tekniği

Değeri $10 k\Omega$ 'dan büyük ya da eşit olan dirençlerin ölçümünde genellikle şekil 2.5'de görülen iki uçlu bağlantı yöntemi kullanılır. Ancak çok yüksek doğruluk gerektiren ölçümlerde, yüksek değerli dirençler için de dört uçlu ölçüm yöntemi kullanılabilir. Ölçülecek olan R_s direnci ve bağlantı kabloları üzerinden test akımı geçirilir. Multimetre, bu bağlantı kablolarının dirençleri üzerine düşen gerilimi ölçer ve buna bağlı olarak direnç değerini hesaplar.



Şekil 2.5. İki uçlu direnç ölçüm tekniği.

V_m : voltmetre tarafından ölçülen gerilim

V_{Rs} : direnç üzerindeki gerilim

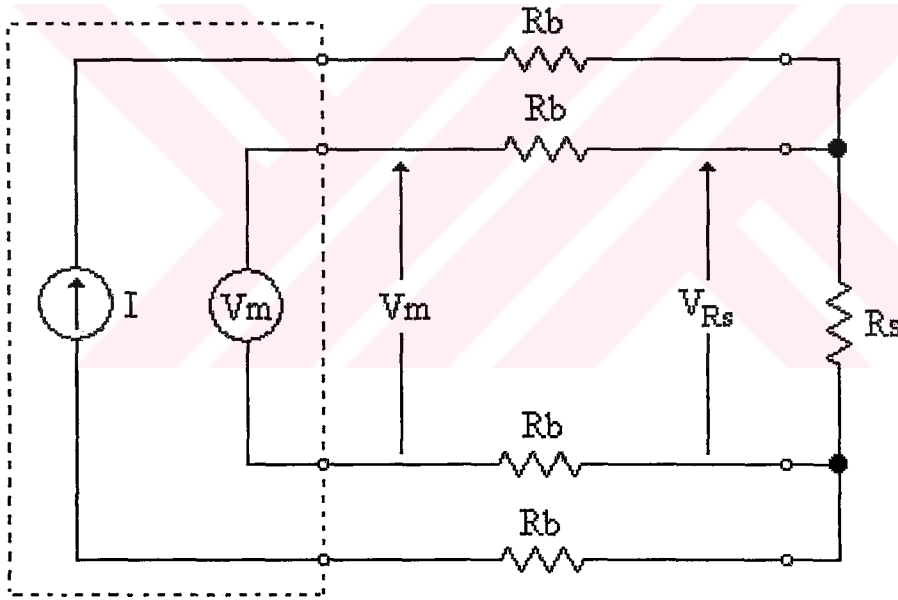
Ölçülen direnç : $R = V_m / I = R_s + (2.R_b)$

Düşük değerli direnç ölçümlerinde, iki uçlu ölçüm yönteminin kullanılması sırasında ortaya çıkan temel problem, bağlantı kablolarının sahip olduğu R_b direncidir. Uygulanan I akımı, bağlantı kabloları üzerinde küçük, fakat belirgin bir gerilim düşümüne sebep olur. Multimetre tarafından okunan V_m gerilimi, R_s direnci üzerine düşen V_{Rs} gerilimine tam olarak eşit değildir ve buradan kaynaklanan hata göz ardı edilemez. Tipik bir bağlantı kablosunun direnç değeri 0.01Ω ile 1Ω arasındadır.

2.2.1.2. Dört uçlu ölçüm tekniği

İki uçlu ölçüm tekniğinin sınırlayıcı olmasından dolayı, genellikle dijital multimetre ve mikro-ohmmetre kullanılarak yapılan düşük değerli direnç ölçümlerinde şekil 2.6'da gösterilen, dört uçlu ölçüm tekniği kullanılır. Dört uçlu ölçüm tekniğinde, bağlantı kablolarının biri üzerinden R_s direncine I akımı uygulanır. Bu sırada, algılama kablosu olarak adlandırılan ikinci bağlantı kablosu üzerinden V_m gerilimi ölçülür. Algılama kabloları üzerinden akan akım önemsenmeyecek kadar küçüktür. (tipik olarak pA veya

daha azdır). Bütün pratik kullanımlarda genellikle göz ardı edilir. Algılama kabloları üzerindeki gerilim düşümleri önemsenmediğinden, multimetre tarafından ölçülen V_m geriliminin, R_s direnci üzerindeki V_{R_s} gerilimi ile aynı olması gereklidir. Sonuç olarak, direnç değeri bu yöntemle, iki uçlu ölçüm yöntemine göre daha doğru olarak ölçülür. Ölçüm sırasında bağlantı kabloları üzerindeki gerilim düşümünden kaynaklanan etkiyi daha da azaltmak için gerilim algılama kablolarının bağlantılarının ölçülen dirence yeteri kadar yakın olmasına dikkat edilmelidir. Yüksek değerli direnç ölçümlerinde bağlantı kablosunun direnci, hataya büyük bir katkı yapmayacağından, iki uçlu ölçüm yöntemi kullanılabilir. Ancak, yüksek değerli dirençlerin ölçümünde tam bir kesinlik aranıyorsa, dört uçlu bağlantı kullanılması uygundur.



Şekil 2.6. Dört uçlu direnç ölçüm tekniği.

Algılama akımı önemsenmeyeceğinden dolayı $V_m = V_{R_s}$ alınabilir. Bu durumda ölçülen direnç $R_s = V_m / I = V_{R_s} / I$ olmaktadır.

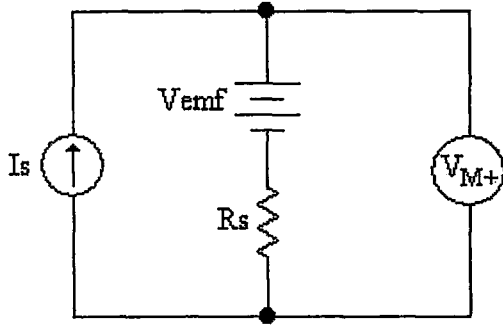
2.2.2. Termal EMF

Termal EMF, farklı sıcaklıklardaki aynı tür iletkenlerin bir araya gelmesinden kaynaklanır. Farklı malzemelerden yapılmış fakat aynı sıcaklıkta iletkenlerin bir araya gelmesi de potansiyel fark EMF'e sebep olur. Bu sebeple devrelerde, sıcaklıkları farklı ve değişik tür iletkenler kullanılması sonucu, mikrovoltlar mertebesinde bir EMF (elektro motor kuvvet) meydana gelir. Bu EMF, düşük seviyeli doğru akım ve gerilim ölçümlerinde hatalara sebep olur. Düşük seviyeli direnç ölçümleri, düşük seviyeli gerilim ölçümü gerektirdiğinden, termal EMF etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer sıcaklık değişimi zamana bağımlı ise, buna bağlı olarak ortaya çıkan termoelektrik gerilimdeki değişiklik, düşük frekanslı bir gürültüye de sebep olacaktır. Bu etkiyi azaltmak için, devre içindeki bağlantıları mümkün olduğu kadar birbirine yakın yapmak ve mümkün olduğu kadar termal iletkenliği az olan yalıtkan malzemeler kullanmak faydalı olacaktır.

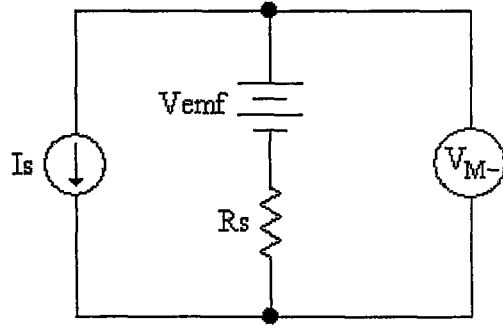
Cihazların kullanımdan önce yeteri kadar ısınmalarının beklenmesi ve ölçüm yapılacak cihazların ya da devrelerin mümkün olduğu kadar ısı kaynaklarından ve soğutucu fanlardan uzak tutulması gerekmektedir. Giriş terminallerini örtmek (termal açıdan izole etmek), terminalleri hava akımından korumak ve terminaller arasındaki sıcaklık farkını azaltmak açısından faydalı olabilir. Eğer termal EMF'in nanovolt mertebesine düşmesi gerekiyorsa, devrenin her yerinde oksitlenmeyen saf bakır kullanılmalıdır. Kablolardaki gerilmeler de termal EMF'e sebep olurlar. Lehim, bakıra göre daha yüksek termal EMF'e sahip olduğundan dolayı, lehimle yapılan bağlantılar daha yüksek termal EMF'e sebebiyet verirler. Düşük seviyeli doğru gerilim ölçümlerinde, akımı ters çevirme metodu kullanılarak termal EMF etkisinden kurtulmak mümkün olabilir.

2.2.2.1. Akımı ters çevirme metodu

Şekil 2.7'deki sistem kullanılarak gerçekleştirilen direnç ölçümlerinde, farklı polaritelerde iki ayrı ölçüm alınarak termal EMF etkisi ortadan kaldırılabilir. Bu devrede voltmetre, çift yönlü bir akım kaynağı ile beraber kullanılmıştır.



(a) Pozitif polariteli ölçüm



(b) Negatif polariteli ölçüm

Şekil 2.7. Termal EMF etkisinin akımı ters çevirme yöntemi ile ortadan kaldırılması.

$$V_{M+} = V_{EMF} + I_S R_S \quad (2.4)$$

$$V_{M-} = V_{EMF} - I_S R_S \quad (2.5)$$

$$V_M = \frac{V_{M+} - V_{M-}}{2} = I_S R_S \quad (2.6)$$

Bu durumda ölçülen direnç ;

$$R_S = \frac{V_M}{I_S} \quad (2.7)$$

denklemleri ile hesaplanır. Bu yöntemle termal EMF tamamen ortadan kaldırılmış olur. Ancak kullanılan voltmetrenin algılama süresinin, devrede herhangi bir sıcaklık değişimi meydana gelmeden ölçüm sonucunu verebilecek kadar hızlı olması gerekmektedir.

2.3. Güç Katsayıları

Herhangi bir direncin ölçülebilmesi için, üzerinden bir akım geçirilmesi gereklidir. Geçen akım direnç üzerinde mutlaka bir ısınmaya sebep olacaktır. Bu ısınma, ortam sıcaklığının yeteri kadar üzerine çıktığında bir güç dağılımı meydana gelecektir. Dirençlerin güç katsayıları (P.C. - power coefficient), üzerlerine uygulanan farklı akımlara karşılık gelen direnç değerlerinin ölçülmesi ile aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$P.C. = \frac{\Delta R}{\Delta P} \frac{1}{R} \quad (2.8)$$

Burada;

P.C. = Güç Katsayısı

ΔR = $R_2 - R_1$

ΔP = $P_2 - P_1$

R_1, R_2 = Direnç standardının farklı I_1 ve I_2 akımları için aldığı değerler,

P_1, P_2 = Farklı I_1 ve I_2 akımları için R direnci üzerinde oluşan güçler,

R = Direnç standardının nominal değeri

Düşük direnç değerlerinde (örneğin $< 1K\Omega$), güç katsayıları, 30 ppm/Watt mertebelerinde kendinden ısınma etkisine sebep olur. Daha düşük direnç değerlerinde (örneğin $< 1\Omega$), bu etki 100 ppm/Watt büyüklüğüne kadar çıkabilir. Sıcaklık katsayıları doğrudan güç katsayıları ile orantılıdır. Bu nedenle, düşük değerli dirençler genellikle yüksek sıcaklık katsayılarına sahiptirler. Bazı dirençler için sıcaklık katsayısının değeri, telin kalitesine ve ısının ortama ne kadar aktarılabilmesine bağlıdır. Eğer bu koşullar iyi değilse direnç ısınacaktır ve ölçülen direncin değeri de değişecektir. Herhangi bir direnç ölçüm zincirinde ölçüme, doğruluğu iyi ve kararlı bir birincil standart dirençle başlamak gereklidir. Standart dirençler, birincil standartlara göre kalibre edildiğinden kalibrasyon zincirinin her safhası aynı güç değerinde çalışmalıdır. Bunun için aynı değerdeki dirençler her zaman aynı akım değerinde ölçülür. (UME 2003)

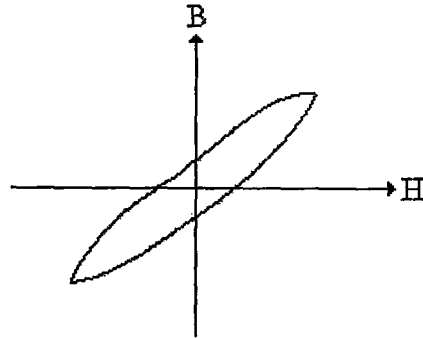
BÖLÜM 3. AKIM KARŞILAŞTIRICILAR

Elektrik akımı ile manyetik alan arasındaki bağıntıyı ortaya koyan Amper yasası, akım karşılaştırıcıların temel çalışma prensibidir. Amper yasası gereği, kapalı bir dl alanı boyunca H manyetik alanının integrali, bu kapalı alan boyunca çevrenmiş I akımını verir. (Moore and Miljanic 1988)

$$\oint H \cdot dl = \sum I \quad (3.1)$$

3.1. Alternatif Akım Karşılaştırıcılar

En basit yapıda düşünüldüğünde, bir alternatif akım karşılaştırıcı, üç temel sargıdan ve bu sargıların üzerinde bulunduğu manyetik permabilitesi yüksek, toroid şeklinde bir manyetik nüveden oluşur. Manyetik akı Φ 'nin mümkün olan en az kayıpla iletilebileceği ve zıt yönlü iki manyetik akının farkının alınabileceği fiziksel ortamın yüksek permabiliteye sahip olması gereklidir (Cheng 1989). Şekil 3.1'de manyetik alan H ile manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişkiyi gösteren histerisiz eğrisi verilmiştir.

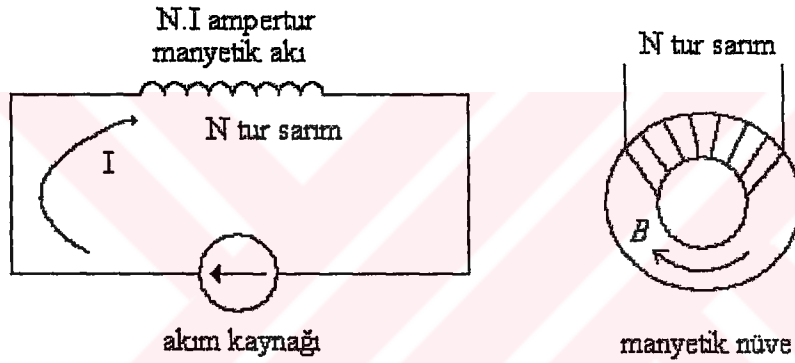


Şekil 3.1. B - H histerisiz eğrisi.

B - H ilişkisi, μ manyetik permabiliteyi verir.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.2)$$

N tur sarım yapılmış bir manyetik nüveden I akımının aktığı düşünülürse, $N.I$ (amper.tur) ile orantılı manyetik akı oluşacaktır. Oluşan manyetik akının yönü, hem sarımın hem de uygulanan akımın yönüne bağlıdır ve sağ el kuralı ile belirlenir. Sağ el parmakları sarım yönünde nüveyi kavradığında boşta kalan baş parmak oluşacak manyetik akının yönünü verir. (Cottingham and Greenwood 1991)



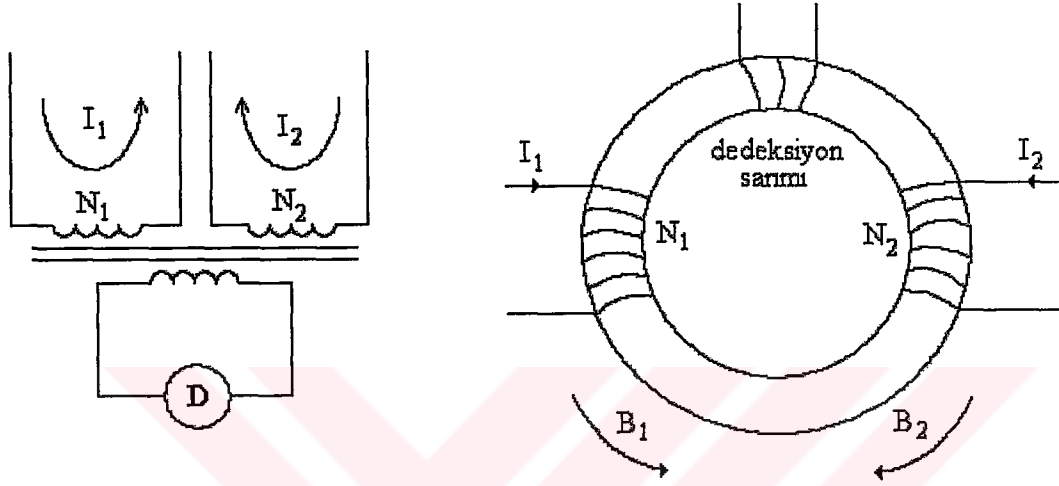
Şekil 3.2. Manyetik nüvede akının oluşumu.

Aynı nüve üzerine aynı tur sayısında iki ayrı sarımın (N_1 ve N_2) yapıldığı düşünölsün. Bu sarımlardan birbirine eşit fakat zıt yönde iki akım (I_1 ve I_2) aktığında, yine büyüklük olarak birbirine eşit fakat zıt yönde iki ayrı manyetik akı (Φ_1 ve Φ_2) oluşur. Nüve içindeki toplam manyetik akı ise ;

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (3.3)$$

denklemleri ile belirlenebilir ve $N_1 = N_2$, $I_1 = I_2$ durumunda toplam manyetik akı sıfırdır. Bu durumda akım karşılaştırmacının dengede olduğu söylenebilir. Böyle bir denge durumunu algılamak ve toplam manyetik akının değerini ölçebilmek için manyetik nüveye üçüncü bir sargı eklenir. Bu sargıya dedeksiyon sargısı adı verilir

ve üzerine toplam manyetik akı indüklenir. Şekil 3.3'de alternatif akım karşılaştırıcıların temel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.3. Alternatif akım karşılaştırıcının temel yapısı.

Dedeksiyon sargısına indüklenen gerilim D dedektörü yardımı ile okunabilir. Denge durumunda indüklenen gerilim sıfırdır ve denklem 3.3 ile verilen eşitlik, aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 \quad (3.4)$$

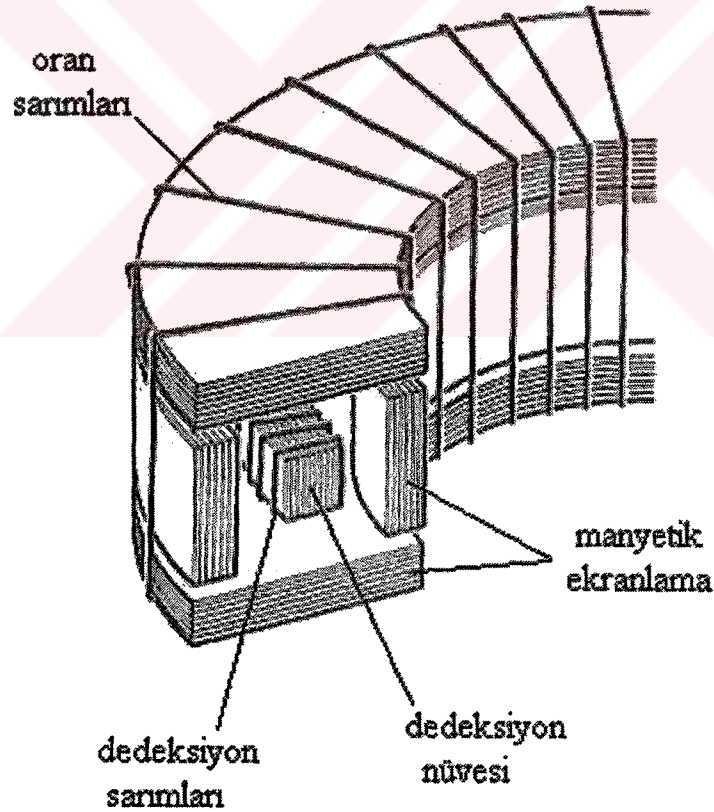
Denklem 3.4 ile verilen eşitlik, tüm akım karşılaştırıcılar için genel denge ifadesidir. Bu denklemde akımlar ve sarım sayıları eşitliğin iki yanına ayrılırsa ;

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.5)$$

denklemini elde edilir.

Bu denklem, akım karşılaştırıcıların, iki akımın oranını sarım sayılarının oranına nasıl bağladığını göstermektedir. Dedektör çıkışı sıfır iken akımların oranı, sarım sayılarının oranına eşittir.

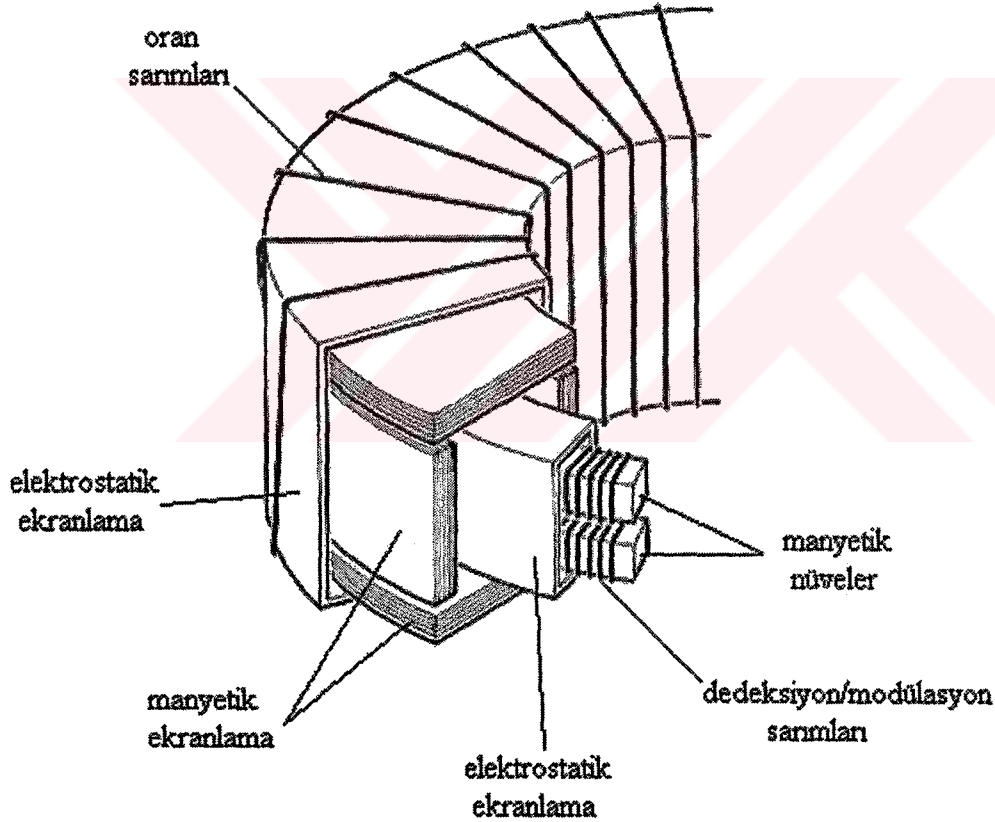
Şekil 3.3'de görülen manyetik nüve üzerindeki oran sarımları (N_1 ve N_2) ile dedeksiyon sarımının bir arada olması pratikte iyi sonuç vermez. Bu tip bir yapıda, dedeksiyon sarımı gerekli düzgün ve eşit dağılım ile sarılamaz. Sarımlar arasında istenmeyen etkileşimler söz konusu olur. Alternatif akım karşılaştırıcının gerçekleştirilmesinde iç içe iki nüveli sistem kullanılır. İçteki birinci nüveye dedeksiyon sarımı yapılır. Bu nüvenin dışında, diğer parçaların biraraya gelmesi ile, dedeksiyon nüvesini içte bırakacak şekilde daha büyük bir nüve oluşturulur. Bu nüve üzerine de oran sarımları yapılır.



Şekil 3.4. Alternatif akım karşılaştırıcının fiziksel yapısı.

3.2. Doğru Akım Karşılaştırıcılar

Alternatif akım karşılaştırıcılarda, oran sarımlarına alternatif akım uygulanması durumunda oluşan indüktif kuplaj sayesinde, fark işaretinin dedeksiyon sargısına indüklenmesi söz konusudur. Uygulanan işaretlerin frekansı düştükçe duyarlılık da azalır ve frekans sıfırlanıp sadece doğru akım bileşeni kalırsa duyarlılık da sıfır olur, dedektörden hiçbir işaret alınamaz. Çünkü doğru akımda indüktif kuplajın varlığından bahsedilemez. Bu sorunu aşmak için doğru akım karşılaştırıcılarda iki ayrı dedeksiyon sargısı bulunur. Bu ikili sistem ‘amper-tur denge dedektörü’ adını alır. Şekil 3.5’de doğru akım karşılaştırıcıların fiziksel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.5. Doğru akım karşılaştırıcının fiziksel yapısı.

3.2.1. Amper - tur denge dedektörü

3.2.1.1. Manyetik nüveler

Manyetik nüvelerin tam olarak birbirine eşit olması gerekir. Aynı zamanda aynı ham materyalden üretilmiş olması tercih edilir. Bu manyetik ham materyalin tavlanaarak sertleştirme işleminin yapılmış olması gereklidir. Tavlama işlemi sonucu materyalin manyetik karakteristiği sabitlenir. Ayrıca histerisiz karakteristiğinin köşeli olması engellenir. Aşırı karesel histerisiz karakteristiği, yüksek duyarlılık sağlamasına rağmen, osilasyona sebep olabileceğinden tercih edilmez. Genelde bu nüveler 0.05 mm kalınlıkta şeritlerin uygun şekilde preslenmesi ile yapılır ve kesit alanının 0.8 - 1 cm² aralığında olması tercih edilir. Üzerine yapılacak dedeksiyon sarımının empedansı, nüvenin kesit alanına bağlıdır ve yapılan denemeler sonucunda sarım empedansının 1 KHz frekansında 40 KΩ'lar değerinde olmasının en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Doğru akım karşılaştırıcıların duyarlılığını sınırlayan önemli etkenlerden biri, nüvelerde oluşan manyetik gürültüdür ve etkisini azaltmak için nüve çapının mümkün olduğunca küçük tutulması gereklidir. Fakat oran sarımlarının ne miktarda sarılabileceğini de nüve iç çapı belirler. Belirli bir sarım değerinden sonra nüve iç deliği kapanır ve sarım yapılamaz. Nüve iç çapı belirlenirken bu nokta da dikkate alınmalıdır.

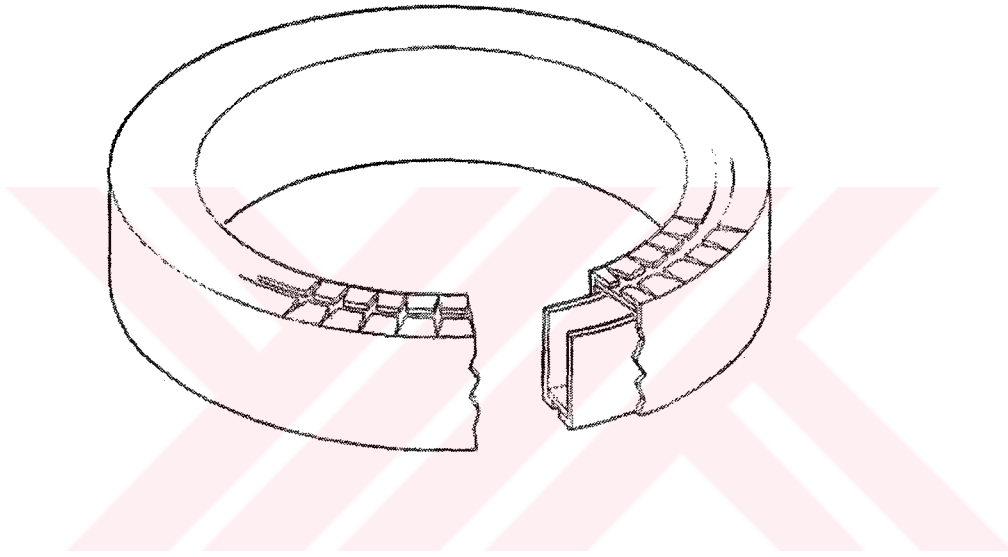
3.2.1.2. Dedeksiyon / modülasyon sarımları

Tek kat olarak yapılan bu sarımlar iki nüvede de eşit olarak dağıtılmış olmalıdır. Her iki sarımda eşit aralıklarla ve eşit tur sayısında sarılmalıdır. Bu özelliklerde sarımların elle yapılması çok zordur. Teze konu olan bu çalışmada TUBİTAK-UME Empedans laboratuvarında bulunan Jovil marka özel bir toroidal nüve sarım cihazı kullanılmıştır.

Sarım tur sayısı, dedektör duyarlılığını ve modülasyon geriliminin değerini doğrudan etkiler. Modülasyon gerilimini makul bir değerde tutmak için 700 Hz'lik modülasyon frekansında 1000 turluk sarım yapmanın ideal olduğu görülmüştür.

3.2.1.3. Elektrostatik ekranlama

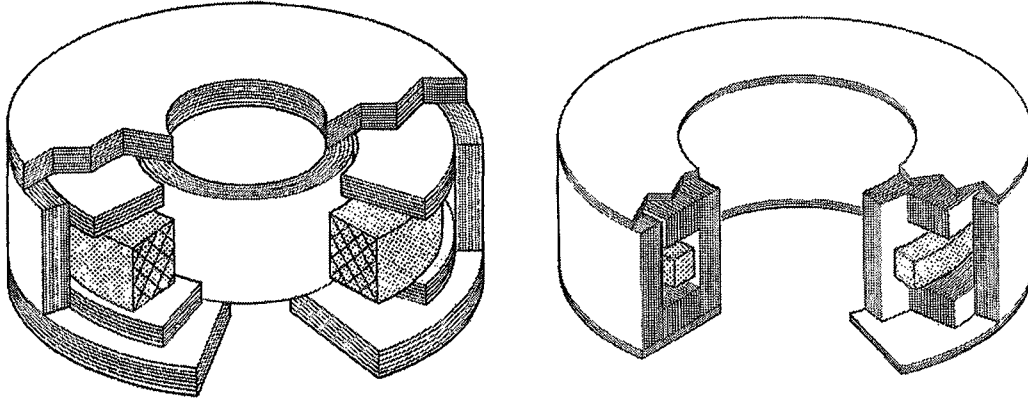
Elektrostatik ekranlama, manyetik nüveleri ve dedeksiyon / modülasyon sarımlarını çevresel elektrik alanlardan korur. Bu ekranlama işleminde metal yapraklar halindeki ince bakır levhalar kullanılır. Yapılan ekranlamadan dörtlü, ekranlı bir kablo ile dedeksiyon/modülasyon sarımlarının uçları çıkartılmıştır. Kablonun ekranlaması elektrostatik ekrana bağlıdır ve sistem toprağına iletilir. Elektrostatik ekranın yapısı Şekil 3.6'da görölmektedir.



Şekil 3.6. Elektrostatik ekranlama.

3.2.1.4. Manyetik ekranlama

Elektrostatik ekranlamanın üzerinde manyetik ekranlama yer alır. Şekil 3.7'de iki ayrı türde manyetik ekranlama görölmektedir. Manyetik ekranlama kullanılarak oran sarımlarından gelebilecek kaçak manyetik akılardan ve çevresel manyetik alanlardan amper-tur denge dedektörü korunmaktadır. Manyetik ekran üzerine tekrar ikinci elektrostatik ekranlama yapılır. Yapılan bu elektrostatik ekran üzerine oran sarımlarının yapılması işlemine geçilir.



Şekil 3.7. Manyetik ekranlama türleri.

3.2.2. Doğru akım karşılaştırıcıların çalışması

Doğru akım karşılaştırıcılarda denge durumunu algılayan kısım, karşılaştırıcının iç kısmında bulunan birbirine eş iki adet dedeksiyon/modülasyon sarımlarıdır. Bu sarımlara alternatif akım uygulanarak modüle edilirler. Nüveler sürekli birbirine zıt yönde manyetize olurlar. Alternatif modülasyon akımı, kare dalga çıkışlı Royer tipi bir osilatörden sağlanır. Dedeksiyon/modülasyon sarımları birbirine seri bağlıdır ve elektriksel olarak Royer tipi osilatörün bir parçasıdır. Bu sebeple sarım sayıları modülasyon frekansını doğrudan etkiler. (Macmartin and Kusters 1966) Modülasyon frekansı f ;

$$f = \frac{V}{4.N.S.B_{SAT}} \quad (3.6)$$

denklemleri ile belirlenir. Denklem 3.6'da ;

V = Osilatör besleme gerilimi

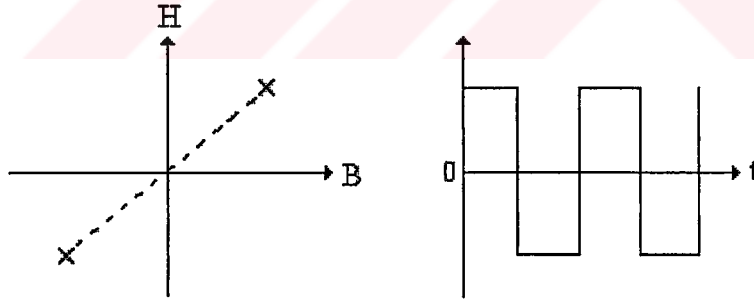
N = Dedeksiyon/modülasyon nüvelerine yapılan sarım sayısı

S = Dedeksiyon/modülasyon nüvelerinin kesit alanı

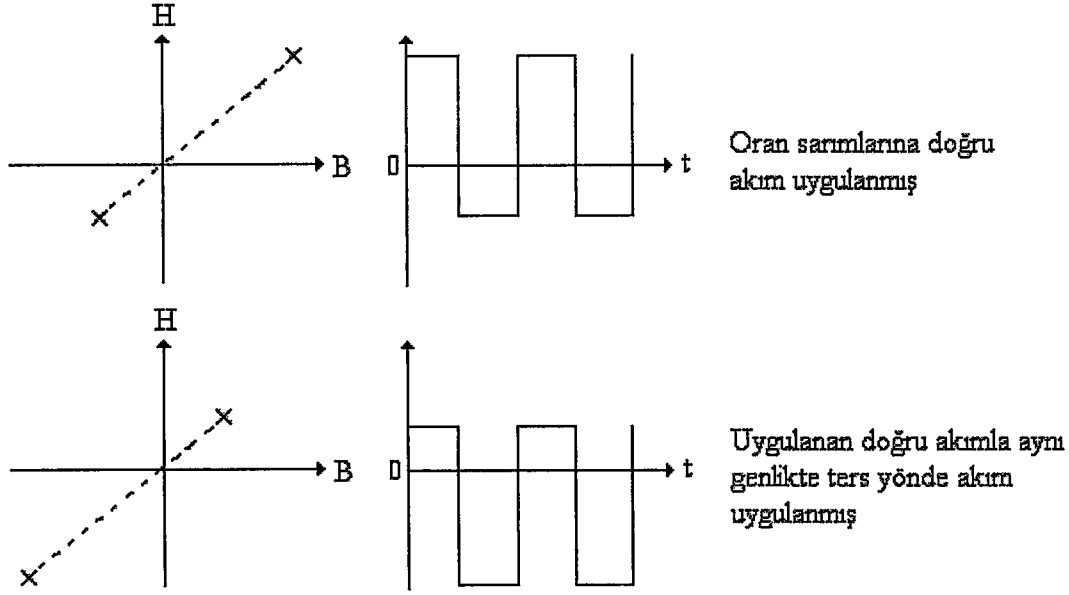
B_{SAT} = Dedeksiyon/modülasyon nüvelerinin doyma manyetik akı yoğunluğu

Denklem 3.6'ya göre sarım sayısı N 'yi arttırmak, modülasyon frekansını düşürür ve duyarlılığı azaltır. N 'yi azaltmak ise frekansı kabul edilebilir bölgenin dışına çıkarabilir. Çünkü manyetik nüvelerin permabilitesi frekansa bağlıdır ve frekans yükseldikçe permabilite düşer. Ticari üretilmiş doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüleri incelendiğinde modülasyon frekansının 500 ile 1000 Hz arasında değiştiği genelde ise 700 Hz frekansının seçildiği ve sarım sayısının 1000 alındığı görülmektedir.

Seri bağlı olarak çalışan dedeksiyon/modülasyon sarımları üzerinde kare dalga osilatörün ana frekansı ile birlikte tek sayılı harmonikleri oluşur. Bunun sebebi, zaman eksenine göre sıfır merkezli salınan kare dalga işaretin fourier açılımında sadece tek harmonik bileşenlerinin olmasıdır. Oran sarımlarına hiçbir doğru akım uygulanmadığı durumda, dedeksiyon/modülasyon nüveleri hem pozitif hem de negatif yönde eşit olarak doyuma giderler. Sıfır merkezli kare dalga salınımı, artı veya eksi alternans yönüne kaymaz. Sarımların seri bağlantı noktasındaki işaret, sadece ana frekans ve tek sayılı harmonikleri bulundurmaya devam eder. Bu durum şekil 3.8'de gösterilmiştir.



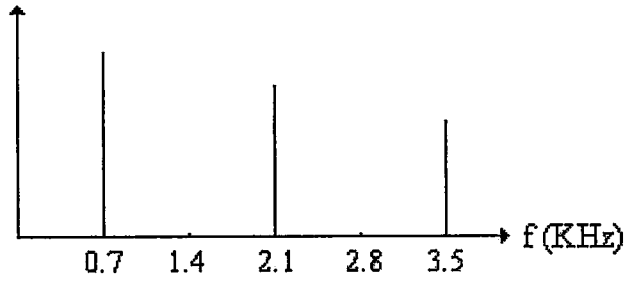
Şekil 3.8. Doğru akım uygulanmadığı durumda nüve manyetizasyonu ve denge noktasındaki işaret.



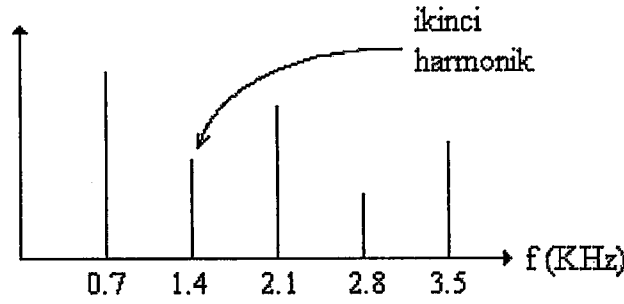
Şekil 3.9. Oran sarımlarına doğru akım uygulanması durumunda nüve manyetizasyonu ve dengeden kaçış.

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi oran sarımlarına, birbirine eşit olmayan iki ayrı doğru akım uygulanması ve karşılaştırmada dengesizlik oluşturulması durumunda, dedeksiyon/modülasyon nüvelerinden biri diğerine göre daha kolay manyetize olacak ve seri bağlı sarımların orta denge noktasındaki işaret bir yöne kayacaktır. Bu durumda oluşan işaret, merkez frekans bileşeni ve tek sayılı harmonikleri dışında çift sayılı harmonikler de içerecektir. Bu çift sayılı harmoniklerden birincisinin genliği ve yönü uygulanan doğru akım farkı ile orantılı olarak değişir (Macmartin and Kusters 1966).

Bu sebeple doğru akım karşılaştırmalara, ‘ikinci harmonik sezici’ ismi de verilmektedir. Laboratuarda yapılan doğru akım karşılaştırmacının, çıkış işaretinin FFT analizi sonucu şekil 3.10’da gösterilmiştir. Oran sarımlarına doğru akım uygulanmadığında şekil 3.10 a’da görüldüğü gibi sadece tek harmonikler mevcuttur. Doğru akım uygulanması durumunda şekil 3.10 b’de görüldüğü gibi çift sayılı harmonikler oluşmaya başlar. 700 Hz modülasyon frekansı seçildiğinde, 1400 Hz’deki ikinci harmoniğin genliğinin değişiminin, uygulanan doğru akım farkına bağlı olduğu yapılan deney sonucu gözlenmiştir.



(a)



(b)

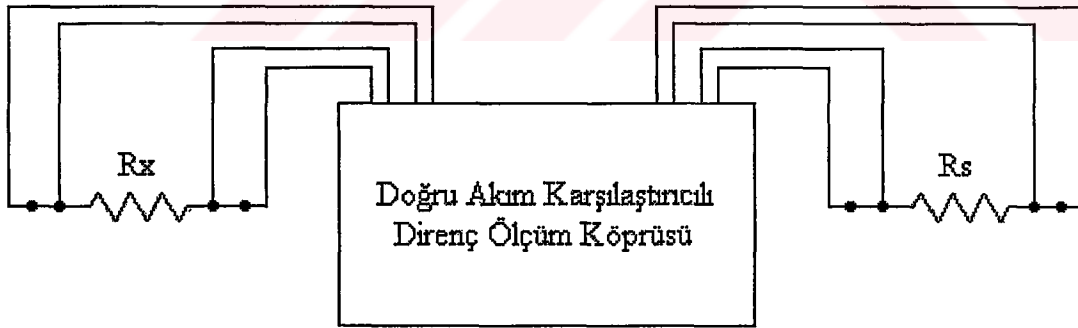
Şekil 3.10. Doğru akım uygulanmasının çıkış işaretine etkisi.

Bu noktada, oluşan ikinci harmoniğin sezilmesi, genliğine ve yönüne bağlı olarak bir hata işareti elde edilmesi gereklidir. Bu amaçla 'ikinci harmonik demodülatörü' adı verilen devre kullanılır. Bu devre çıkışında, karşılaştırmadaki dengesizlik ile orantılı bir doğru gerilim işareti üretilir. Bu işaret ile, iki ayrı doğru akımın farkı çok hassas bir şekilde ölçülebilir. Bu prensip, iki direncin oranının bulunmasında doğru akım karşılaştırmacıların kullanılmasını sağlar.

BÖLÜM 4. DOĞRU AKIM KARŞILAŞTIRICILI DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜ

4.1. Direnç Ölçüm Köprüsünün Çalışma Prensibi

Direnç ölçümünün çok düşük belirsizlikle yapıldığı bu köprülerde, ölçüm sonucunda direncin değeri doğrudan okunmaz. Köprü, yapısı gereği iki direncin oranını verir. R_x ölçülecek bilinmeyen direnci, R_s ise metroloji laboratuvarında sıcaklık kontrollü bir ortam içinde tutulan ve değeri başka yöntemler ile önceden belirlenen standart direnci göstermektedir. Ölçüm sürecinin sonunda R_x / R_s oranı alınır. Bu noktada direnç ölçüm köprüsü bir teraziye benzetilebilir (Şekil 4.1). R_x ve R_s dirençleri 0.1 ppm (10^{-7}) düzeyinde birbirine eşit ise ölçüm sonucunda $R_x/R_s = 1.0000000$ oranı alınır. Burada ppm, milyonda birlik farkı ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Karşılaştırılacak dirençlerin köprüye bağlantısı.

Bölüm 3’de anlatıldığı üzere doğru akım karşılaştırmacının çıkışı, karşılaştırılan iki akımın birbirine eşit olması durumunda sıfır olmaktadır ve buna denge durumu adı verilir. İlk olarak, karşılaştırılacak iki direncin üzerinden geçen akımların oranının, direnç değerlerinin oranına eşit olması sağlanmalıdır. Bunun için de dirençlerin üzerine düşen

gerilimlerin eşitlenmesi gereklidir. Bu duruma ‘gerilim dengesi’ adı verilir. I_x ve V_x , R_x direncinden geçen akımı ve üzerine düşen gerilimi; I_s ve V_s ’de R_s direncinden geçen akımı ve üzerine düşen gerilimi gösterebilir. Bu durumda ;

$$V_x = I_x \cdot R_x \quad \text{ve} \quad V_s = I_s \cdot R_s \quad (4.1)$$

olmaktadır. $V_x = V_s$ şartının sağlandığı düşünülür ise ;

$$I_x \cdot R_x = I_s \cdot R_s \quad (4.2)$$

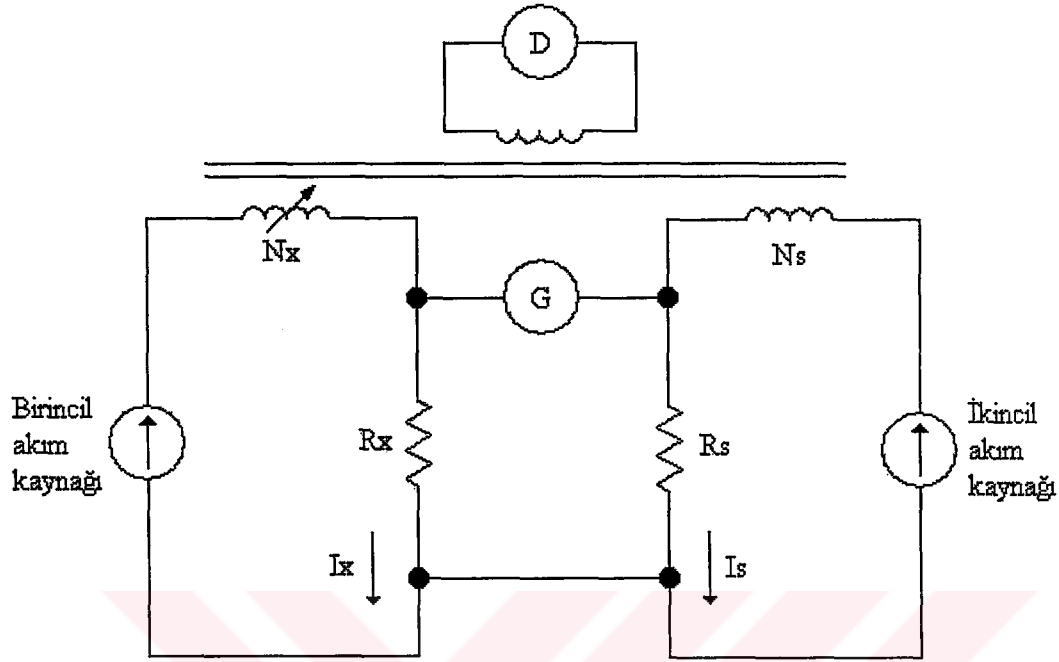
olur. Buradan ;

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{I_s}{I_x} \quad (4.3)$$

oranı yazılabilir. Böylece gerilim dengesi oluşturularak dirençlerin oranı akımların oranına taşınır. Şekil 4.2’de direnç ölçüm köprüsünün temel blok şeması verilmiştir.

Bu noktada, akımların oranını gösterecek birime ihtiyaç duyulur ve bu amaçla doğru akım karşılaştırıcı kullanılır. Bölüm 3’de verilen denklem 3.5 ile akım karşılaştırıcının, iki akımın oranını sarım sayılarının oranına nasıl bağladığı gösterilmiştir. İncelenir ise, N_x ve N_s oran sarımlarından birinin toplam sarım sayısı ayarlanabilir türde olması gerektiği görülmektedir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi N_x sarımları bu yapıdadır.

Birincil ve ikincil akım kaynaklarının ayarlanması ile G galvanometresinin sıfırlanması durumunda gerilim dengesi sağlanmış olur. Bu durumda dirençlerin oranı akımların oranına eşittir. Birbirinden farklı I_x ve I_s akımlarının N_x ve N_s oran sarımlarından geçmesi ile doğru akım karşılaştırıcıda dengesizlik oluşur ve D dedektöründe bu durum gözlenir. (Macmartin and Kusters 1966)



Şekil 4.2. Direnç ölçüm köprüsü temel blok şeması.

Ayarlı N_x sarımları değiştirilir ise, $N_x \cdot I_x$ amper.tur manyetik akısı değişir ve ;

$$I_x \cdot N_x = I_s \cdot N_s \quad (4.4)$$

durumu sağlanır ve D dedektöründen sıfır okunur. Buradan ;

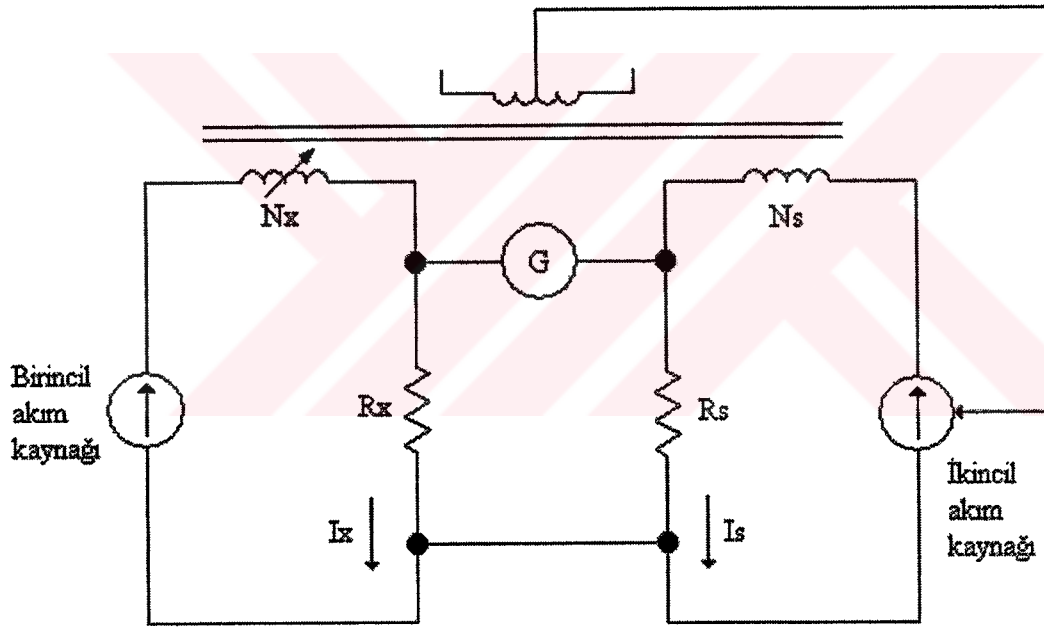
$$\frac{I_s}{I_x} = \frac{N_x}{N_s} \quad (4.5)$$

elde edilir. Denklem 4.3 ile denklem 4.5 birleştirilir ise ;

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{I_s}{I_x} = \frac{N_x}{N_s} \quad (4.6)$$

denklemleri elde edilir. Denklem 4.6 doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüsünün en temel ifadesidir. Her iki dengelemenin (gerilim dengesi ve akım dengesi) yapılmasından sonra dirençlerin oranı, N_x / N_s sarım oranından bulunur.

İki dengelemenin de ayrı ayrı yapılması uygulamalarda bazı zorluklar getirir. Bu sebeple pratikte, akım karşılaştırıcının çıkışı (dedektördeki akım dengesizliği), bir geri besleme sistemi ile ikincil akım kaynağına verilir. Sistem, akım karşılaştırıcının çıkışını kontrol ederek ikincil akım kaynağını sürekli ayarlar. Böylece denklem 4.5’de verilen eşitlik otomatik olarak sağlanır. Şekil 4.3’de bu geri besleme gösterilmiştir.

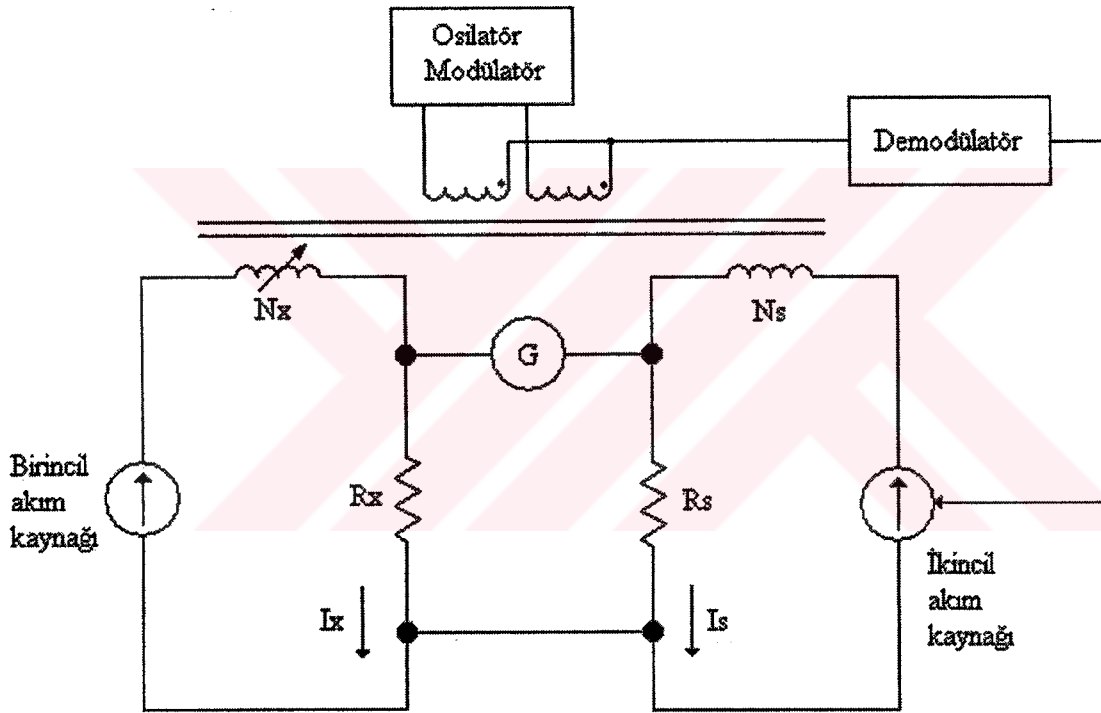


Şekil 4.3. Karşılaştırıcı çıkışının geri besleme ile kontrolü.

Uygulamada bu geri beslemeye ‘otomatik amper.tur dengesi’ adı verilmektedir. N_x ayarlı oran sarımının değiştirilmesi ile karşılaştırıcı içinde manyetik dengesizlik oluşturulacak, fakat bu dengesizlik geri beslemenin değiştireceği ikincil akım kaynağı ile giderilecektir. Bu noktada, değişen akım değeri ile gerilim dengesi de değişecektir. Buradan anlaşılacağı üzere dengeleme işlemi sadece N_x sarımlarının ayarlanması

işlemine indirgenmiş olur. Eş zamanlı iki ayar yapmanın zorluğu ortadan kalkar. Birincil akım kaynağı ölçme sürecinin başlangıcında sabit bir değere ayarlanır ve süreç boyunca değiştirilmez. (Macmartin and Kusters 1966)

Bölüm 3’de anlatıldığı üzere doğru akım karşılaştırıcılarda, karşılaştırılacak akımların doğru akım olmasından dolayı osilatör / modülatör ve demodülatör kısımlarının olması gereklidir.

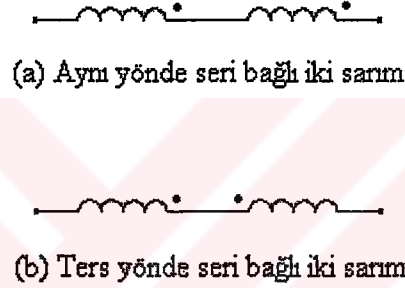


Şekil 4.4 Osilatör / modülatör ve demodülatör eklenmiş blok şema.

Şekil 4.4’de akım karşılaştırıcının seri bağlı dedeksiyon/modülasyon sarımları görülmektedir. Bu iki sarım osilatör ile modüle edilir. Orta denge noktası demodülatöre bağlıdır ve fark manyetik akısı, demodülatör çıkışındaki işaret ile izlenir. Bu işaret, ikincil akım kaynağını sürekli kontrol altında tutar.

4.2. Direnç Ölçüm Köprüsünün Çözünürlüğü

Doğru akım karşılaştırıcı üzerinde bulunan oran sarımlarından N_x 'in toplam tur sayısı değiştirilebilir yapıdadır. Bunu gerçekleştirmek için uygun sayıda sarım, birbirinden bağımsız olarak sarılır. Her sarım, bir röle ile devreye eklenebilir yapıdadır. İki ayrı sarımın birbirine ters veya düz bağlanabileceği düşünülürse, sarımların üreteceği toplam manyetik akı, iki manyetik akının toplanması veya farkı şeklinde olabilir. Şekil 4.5'de bu durum verilmiştir.



Şekil 4.5. İki ayrı oran sarımının seri bağlantı seçenekleri.

Bağlantı, şekil 4.5 a'daki gibi olursa iki sarımında üreteceği manyetik akı aynı yönde olur ve toplanır. Eğer bağlantı, şekil 4.5 b'deki gibi olursa toplam manyetik akı, iki sarımın üreteceği manyetik akıların farkı olacaktır. Mikroişlemci kontrollü yapıda, gerekli tur sayısı hesaplandıktan sonra röle kontrol kartına gerekli komutlar gönderilerek sarımların uygun yönde devreye eklenmesi sağlanır. Bunun sonucunda sistemi dengeleyecek toplam manyetik akı elde edilir.

N_s sarımı, sabir tur sayısında bir kere sarılır. Ticari olarak üretilmiş direnç ölçüm köprüleri incelendiğinde N_s sarımının 800 tur veya 1000 tur sarılmasının tercih edildiği görülmüştür. Kaç tur sarılacağı, akım dengelemedeki çözünürlüğü belirler. N_s sarımının 1000 tur olduğu düşünölsün. Karşılaştırılan dirençler birbirine eşit ise, denge durumunda denklem 4.6 gereği N_x sarımının da 1000 tur olması gerekir. Dirençler arasındaki küçük

farklılıkların dengelenmesi mutlaka gerekeceği için Nx sarımlarının tek bir 1000 tur yerine, 1000 tur + ‘çeşitli küçük sarımlar’ şeklinde (parçalı) olması gereklidir. Bu küçük sarımların kaç adet ve kaç tur olması gerektiği, direnç ölçüm köprüsünün kullanılacağı ölçüm bölgesine göre değişir. Bu sebeple oran sarımlarının yapımına geçmeden önce, yapılacak köprünün hangi çözünürlükte ve hangi direnç değerleri ile (ölçüm bölgeleri) çalışması istendiğinin belirlenmesi gereklidir.

Belirlenmesi gereken önemli bir nokta da direnç karşılaştırmada ölçülmesi istenecek en yüksek orandır. Genelde 1/10 veya 1/13 maksimum oranları kapsayacak şekilde tasarım yapılmaktadır. 1/10’luk oran ölçümü yapılacağını düşünelim ($R_x=10\Omega$, $R_s=100\Omega$ gibi). Bu noktada, $N_s = 1000$ tur sabit yapılmış ise 1/10’luk oranı ölçebilmek için Nx sarımı olarak devreye en az 10000 tur girmelidir. Ayrıca dirençlerin farkından dolayı, oranın tam olarak 1/10 olamayacağı düşünülür ise daha önce ‘çeşitli küçük sarımlar’ dediğimiz sarımlarında olması ve gerekli durumlarda bu sarımların 10000 tur sarımına uygun yönlerde seri bağlanması gerekmektedir.

4.2.1. Gerilim dengelemede çözünürlük

Doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsünün iki denge şartı bulunmaktadır. Bunlardan gerilim dengesinin ne kadar iyi yapılabileceği (ppm düzeyinde), blok şemalarda ‘G galvanometre’ olarak görünen ölçüm birimine bağlıdır. Pratik uygulamada yüksek çözünürlüklü hassas AD çeviriciler kullanılır. Aşağıdaki örnek değerler ile ölçüm yapıldığı düşünölsün ;

$$R_x = R_s = 1\Omega \quad (\text{Ölçülecek dirençler})$$

$$I_x = I_s = 50 \text{ mA} \quad (\text{Ölçümede kullanılacak akım})$$

$$\text{İstenilen çözünürlük} = 0.1 \text{ ppm}$$

Bu durumda her bir direncin üzerine ;

$$V = I.R = 1\Omega.50mA = 50mV \quad (4.7)$$

gerilim düşümü olur. Bu teze konu olarak tasarlanan köprünün on milyonda birlik (0.1 ppm) çözünürlüğü olması için 50 mV'luk gerilimin 0.1 ppm'ini, dolayısıyla 5 nV'u sezebilen bir gerilim dengeleyicinin yapılması gereklidir. Burada önemli nokta, AD çeviricinin girişine konacak yükselteç devresinin 5 nV'luk gerilime kadar doğrusal çalışabilmesi ve bu kadar düşük gerilim seviyesini sezebilmesi ve giriş gürültüsünün bu seviyenin oldukça altında olmasıdır.

Bir köprünün tasarımında bu işlemler, oluşabilecek en zor ölçüm koşulu için yapılmalıdır. Eğer 1Ω'luk direnç 50 mA yerine 10 mA akım ile ölçülecek ise, 0.1 ppm çözünürlük için 5 nV yerine 1 nV'u sezebilen nanovolt yükselteç gereklidir.

4.2.2. Akım dengelemede çözünürlük

Doğru akım karşılaştırıcı iki akımı karşılaştırır ve çıkışında akım farkına bağlı bir gerilim üretir. Eğer karşılaştırıcı çıkışı sıfır ise, akımların oranı ile, N_x ve N_s sarımlarının oranı birbirine eşittir. Aşağıdaki örnek verilen değerler ile ölçüm yapıldığı düşünülürse ;

$$\begin{aligned} R_x &= R_s = 1\Omega && (\text{Ölçülecek dirençler}) \\ I_x &= I_s = 50 \text{ mA} && (\text{Ölçümede kullanılacak akım}) \\ N_s &= 800 \text{ tur} && (\text{Sabit oran sarımının tur sayısı}) \\ \text{İstenilen çözünürlük} &= 0.1 \text{ ppm} \end{aligned}$$

Bu durumda sabit oran sarımı N_s 'de oluşacak manyetik akı ;

$$50mA * 800tur = 40.000mA \cdot tur = 40.000.000 \mu A \cdot tur \quad (4.8)$$

İstenilen çözünürlük 0.1 ppm ise, akım karşılaştırıcı içinde 4 $\mu\text{A.tur}$ 'luk fark manyetik akısı oluşacaktır. Bu fark manyetik akısının dedeksiyon/modülasyon sarımları tarafından sezilebilmesi gereklidir.

Gerilim dengeleme çözünürlüğünde olduğu gibi bir köprünün tasarımında bu işlemler, oluşabilecek en zor ölçüm koşulu için yapılmalıdır. Eğer ölçüm akımı 50 mA yerine 10 mA olursa, 0.1 ppm çözünürlük için 4 $\mu\text{A.tur}$ fark manyetik akısı yerine, 0.8 $\mu\text{A.tur}$ fark manyetik akısını sezebilen akım karşılaştırıcı tasarlanması gereklidir.

Sabit N_s oran sarımının tur sayısının değiştirilmesi de akım karşılaştırıcının çözünürlüğünü etkileyecektir. 50 mA ölçüm akımında, 800 tur N_s sarımının, 0.1 ppm direnç farkında üreteceği fark manyetik akısının 4 $\mu\text{A.tur}$ olacağı gösterilmişti. Eğer N_s sabit oran sarımı 1000 tur yapılır ise, 0.1 ppm çözünürlük için sezilmesi gereken fark manyetik akısı 5 $\mu\text{A.tur}$ olmaktadır.

Tablo 4.1'de, I_s ölçüm akımının değişiminin doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüsünün akım ve gerilim çözünürlüğüne etkisi verilmiştir. Burada, N_s oran sarımının tur sayısı sabit tutulmuştur.

Tablo 4.1. I_s ölçüm akımı değişiminin çözünürlüğe etkisi.

$R_x = R_s = 1 \Omega$, $N_s = 800$ tur sabit , İki direnç arasındaki ölçülmek istenen fark 0.1 ppm	
$I_s = 50 \text{ mA}$	$I_s = 10 \text{ mA}$
5 nV Nanovolt dedektör duyarlılığı	1 nV Nanovolt dedektör duyarlılığı
4 $\mu\text{A.tur}$ Akım karşılaştırıcı duyarlılığı	0.8 $\mu\text{A.tur}$ Akım karşılaştırıcı duyarlılığı

Tablo 4.2'de, N_s oran sarımının iki farklı tur sayısında sarılmasının doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüsünün akım ve gerilim çözünürlüğüne etkisi verilmiştir. Burada, I_s ölçüm akımı sabit tutulmuştur.

Tablo 4.2. N_s oran sarımının tur sayısının değiştirilmesinin çözünürlüğe etkisi.

$R_x = R_s = 1 \Omega$, $I_s = 50 \text{ mA}$ sabit , İki direnç arasındaki ölçülmek istenen fark 0.1 ppm	
$N_s = 800 \text{ tur}$	$N_s = 1000 \text{ tur}$
5 nV Nanovolt dedektör duyarlılığı	5 nV Nanovolt dedektör duyarlılığı
4 μA .tur Akım karşılaştırıcı duyarlılığı	5 μA .tur Akım karşılaştırıcı duyarlılığı

Tablo 4.3’de, karşılaştırılacak dirençlerin değerinin değiştirilmesinin doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüsünün akım ve gerilim çözünürlüğüne etkisi verilmiştir. Burada, N_s oran sarımının tur sayısı ve I_s ölçüm akımı sabit tutulmuştur.

Tablo 4.3. Karşılaştırılacak dirençlerin değerinin değiştirilmesinin çözünürlüğe etkisi.

$N_s = 800 \text{ tur}$, $I_s = 50 \text{ mA}$, İki direnç arasındaki ölçülmek istenen fark 0.1 ppm	
$R_x = R_s = 1 \Omega$	$R_x = R_s = 100 \Omega$
5 nV Nanovolt dedektör duyarlılığı	500 nV Nanovolt dedektör duyarlılığı
4 μA .tur Akım karşılaştırıcı duyarlılığı	4 μA .tur Akım karşılaştırıcı duyarlılığı

- I_s ölçme akımının değişimi, hem gerilim hem de akım dengelemedeki çözünürlüğü etkiler. I_s akımının 1/10 seviyesine düşürülmesi, gerekli olan nanovolt dedektör ve akım karşılaştırıcı duyarlılığını 10 kat artırır. Bu sebeple mümkün olan en yüksek akımda karşılaştırmaların yapılması daha iyi olacaktır. Fakat ölçme akımı artırılırken bölüm 2’de anlatılan ‘güç katsayıları’ dikkate alınmalıdır.

- N_s oran sarımının tur sayısının değiştirilmesi, gerilim dengeleme için gerekli çözünürlüğü etkilemez, akım dengelemedeki çözünürlüğü etkiler. N_s oran sarımının tur sayısının 1/10 düşürülmesi, gerekli olan akım karşılaştırıcı duyarlılığını 10 kat artırır. Bu sebeple N_s oran sarımının tur sayısının mümkün olduğunca yüksek tutulması

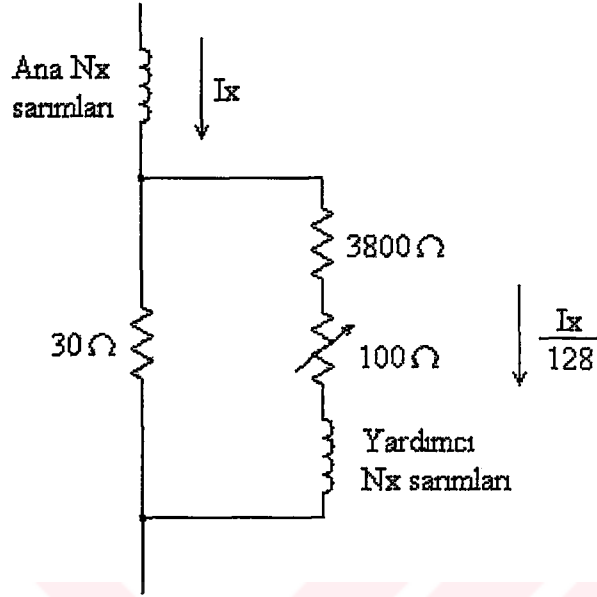
gereklidir. Fakat N_s arttırıldıkça gerekli N_x oran sarımı da artmaktadır. Bunun sonucunda akım karşılaştırıcıyı oluşturan manyetik nüvelerin çapının arttırılması gerekir. Çap artışı ise, nüvedeki manyetik gürültülerin artmasına sebep olur.

- Karşılaştırılacak dirençlerin değerinin değişimi, akım dengeleme için gerekli çözünürlüğü etkilemez, gerilim dengelemedeki çözünürlüğü etkiler. Dirençlerin değerinin 10 kat artması, gerekli olan nanovolt dedektör duyarlılığını 1/10 azaltır. Bu sebeple karşılaştırılacak dirençlerin değeri azaldıkça ölçüm belirsizliği artar. Bütün doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüleri için genel bir durumdur.

4.3. Yardımcı Oran Sarımları ile N_x Oran Sarımına Çözünürlük Verilmesi

Doğru akım karşılaştırıcı üzerinde N_x oran sarımları ile N_s oran sarımı bulunur. Denklem 4.5 , denge durumunda, sarımların oranının akımların oranına eşit olduğunu göstermektedir. Sarımların tur sayısı mutlaka tam sayılarda olabileceğine göre N_x / N_s oranının alabileceği çözünürlük sınırlıdır ve 0.1 ppm gibi bir çözünürlüğe ulaşamaz. Örnek olarak $N_s = 1000$ tur olsun. N_x sarımının alabileceği en yakın değer 999 tur veya 1001 tur olmaktadır (± 1 tur). Bu durumda N_x / N_s oranı da aynı sıra ile, 0.999 veya 1.001 olacaktır. Fakat 0.1 ppm çözünürlükte 0.9999999 veya 1.0000001 oranlarının alınabilmesi gereklidir. (Guildline Inc. 1994)

Bunu sağlamak için yardımcı oran sarımları yapılır. Bu yardımcı sarımlara, N_x ana sarımlarından geçen I_x ölçüm akımının bir kısmı uygulanır. Bunun için de dirençler ile yapılmış akım bölücü devresi kullanılır. Şekil 4.6'da akım bölücü ve yardımcı sarımlar ile N_x oran sarımına çözünürlük verilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Yardımcı oran sarımları ile Nx oran sarımına çözünürlük verilmesi

Bu akım bölücü devresinde, 100Ω 'luk trimpot ayarlanarak yardımcı sarımlardan I_x ölçüm akımının $1/128$ 'i geçmesi sağlanır. Yardımcı sarımlar, ana sarımlar gibi ikili sayı sistemi ile ağırlıklandırılmış olarak sarılır. Sarım sayıları 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ve tekrar 1 tur şeklindedir. Eğer tur sayıları toplanırsa 128 yaptığı görülür.

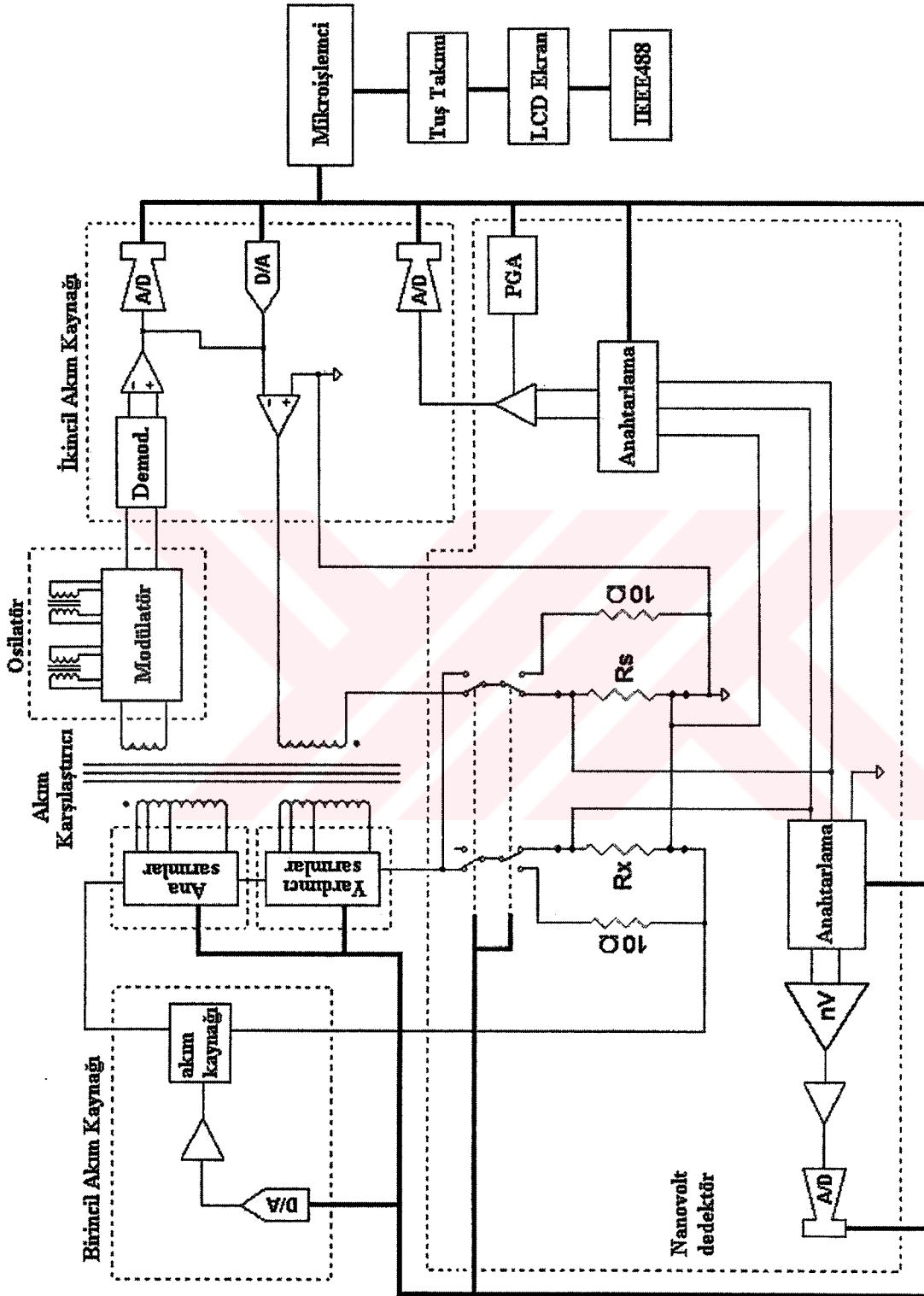
Eğer tüm yardımcı sarımlar, birbirlerine aynı yönde seri olarak devreye girer ise, 128 toplam turdan $I_x / 128$ kadar akım akar. Bunun sonucunda oluşan manyetik akı, ana Nx sarımlarındaki bir tur sarımın üreteceği kadardır. Sonuçta ana Nx sarımlarındaki bir tur sarımın 2^7 oranında (7 bitlik çözünürlük = 128) çözünürlüğünün oluşması sağlanır.

BÖLÜM 5. OTOMATİK DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜ

5.1. Mikroişlemci Kontrollü Otomatik Çalışma

Şekil 5.1’de tasarlanan doğru akım karşılaştırmalı otomatik direnç ölçüm köprüsünün blok şeması verilmiştir. Kalın çizgiler ile gösterilen hatlar, mikrokontrolörden diğer birimlere giden veri ve kontrol hatlarıdır. Birincil akım kaynağı, I_x ölçüm akımını üretir. Sabit bir akım kaynağıdır. Ölçüm işleminin başlangıcında tuş takımından girilen akım değerine mikrokontrolör tarafından set edilir. Ölçüm süreci sonuna kadar birincil akım kaynağının değeri değişmez.

İkincil akım kaynağı, I_s ölçüm akımını üretir. Bu akımın başlangıç değerini mikrokontrolör hesaplar ve uygun veriyi DA çeviriciye yükler. Ölçüm sürecinin devamında, hem akım dengeleme hem de gerilim dengeleme işlemlerinin geri beslemesi ile ikincil akım kaynağının ürettiği I_s ölçüm akımı değişir. Dengeleme işlemlerinin sonunda sabit bir değerde kalır. Bu geri besleme iki ayrı yoldan birlikte yapılır. Birinci yol, AD çeviriciler ile mikrokontrolöre aktarılan akım ve gerilim dengesizlik bilgilerinin değerlendirilerek, I_s akımının ana değerini belirleyen DA çeviriciye yüklenen verinin değiştirilmesidir. İkinci yol, akım dengesizliği bilgisini veren demodülatör çıkışındaki işaretin, opamplar ile yapılmış oransal-integral kontrol (PI – proportional integration) devresine uygulanmasıdır. Bu kontrol devresinin çıkışı, DA çeviricinin çıkışı ile birlikte, bir opamplı toplama devresine girer. Bu kontrol devresi ile yapılan analog geri besleme yöntemi, doğru akım karşılaştırmacı içindeki $\Delta\Phi$ fark manyetik akısının sürekli kontrolünü sağlar. Opamplı toplama devresinin çıkışı, ikincil akım kaynağı devresini sürer.



Şekil 5.1. Doğru akım karşılaştırmalı otomatik direnç ölçüm köprüsü blok şema.

Birincil ve ikincil akım kaynaklarının tasarımında howland tipi akım kaynağı yapısı kullanılmıştır. Bu akım kaynaklarının temel özelliği, akım verilen yükün bir ucunun toprak hattında olmasıdır.

Köprü her çalıştırılışında kendisini kontrol eder (self check). Bu işlem için Rx ve Rs dirençlerinin yanında görünen $10\ \Omega$ 'luk dirençler, röleler yardımı ile sistemin girişlerine bağlanır ve mikrokontrolör, ölçüm işlemi yaparak herhangi bir arıza olup olmadığını test eder. Sistemin açılışında test amaçlı olarak yapılan bu ölçüm işleminde $10\ \Omega - 10\ \Omega$ karşılaştırması yapılmış olur (Measurements International 1997).

Gerilim dengelemesinin yapılmasını iki ayrı kısım sağlar. Birinci kısım mikrovolt mertebelerinde sıfırlamanın yapılmasını sağlar. Mikrovolt mertebesinde dengelemeden sonra ikinci kısım devreye girer. Bu kısım ise nanovolt mertebelerinde sıfırlamayı yapmaktadır. Mikrovolt dengelemeyi sağlayan birinci kısım, 16 bitlik AD çevirici ve programlanabilir kazanç yükseltecinden (PGA – Programmable Gain Amplifier) oluşur. İkinci kısım ise buna benzer yapıdadır. Ek olarak PGA'dan önce, kazancı sabit 1000 olan ve nanovolt bölgesinde doğrusal olarak sorunsuz çalışabilen bir nanovolt yükselteç bulunur.

5.2. Ölçüm Süreci ve İşlemler

1. Ölçüm işleminin başlangıcında, I_x ölçüm akımının değeri tuş takımı ile girilir. Mikrokontrolör, bu akımı elde etmek için gerekli veriyi hesaplar ve birincil akım kaynağındaki DA çeviriciye yükler.
2. I_x akımı, röleli anahtarlama devresi üzerinden Rs direnci üzerine yönlendirilir. Rs direnci üzerine düşen gerilim (V_{Rs}), PGA ile yükseltilir ve AD çevirici ile mikrokontrolöre aktarılır. Rs direncinin ilk değeri, V_{Rs} / I_x ile mikrokontrolör tarafından hesaplanır ve kaydedilir. (R_s kaba değer ölçümü)

3. I_x akımı, röleli anahtarlama devresi üzerinden R_x direnci üzerine yönlendirilir. R_x direnci üzerine düşen gerilim (V_{Rx}), PGA ile yükseltilir ve AD çevirici ile mikrokontrolöre aktarılır. R_x direncinin ilk değeri, V_{Rx} / I_x ile mikrokontrolör tarafından hesaplanır ve kaydedilir. (R_x kaba değer ölçümü)

4. Kaydedilmiş olan direnç değerlerinden R_x / R_s oranının ilk değeri hesaplanır. Bu oran değeri kullanılarak sabit N_s sarımının karşılığı olarak kaç tur ana N_x sarımı ve kaç tur yardımcı N_x sarımının devreye sokulacağı hesaplanır. Bunun sonucunda mikrokontrolör, röle kontrol kartına gerekli verileri yükler. Sarımlar uygun yönlerde birbirine seri bağlı olarak devreye girer.

5. Oran sarımlarının devreye girmesi sonucunda birbirine zıt iki manyetik akı, akım karşılaştırmada oluşur. Bu zıt iki manyetik akının farkı; dedeksiyon/modülasyon sarımları, osilatör ve demodülatör bloklarının oluşturduğu akım farkı sezme sistemi ile gerilime çevrilir. Bu gerilim, AD çevirici üzerinden mikrokontrolöre aktarılır. Mikrokontrolör gerekli düzeltmeyi hesaplar ve ikincil akım kaynağının DA çeviricisine gerekli veriyi yükler. Ayrıca analog PI kontrol bloğu üzerinden I_s akımı değişir. Bunun sonucunda fark manyetik akısı sıfırlanır.

6. R_x ve R_s dirençleri üzerine düşen gerilimlerin farkı, PGA ile yükseltilir ve DA çevirici ile mikrokontrolöre aktarılır. Başlangıçta devreye alınan N_x oran sarımları, mikrokontrolör tarafından değiştirilerek I_s akımının değişmesi (geri besleme üzerinden) sağlanır. Değişen I_s akımı ile, gerilim farkıda değişir ve sıfıra yaklaşır. Geri besleme sistemi sayesinde I_s akımının değişmesi, fark manyetik akısının sıfırdan kaçmasına engel olur. Gerilim farkı, mikrovoltlar mertebesinde sıfır olana kadar 5. adıma geri döndülür.

7. Gerilim farkı mikrovoltlar mertebesinde sıfırlandıktan sonra nanovolt yükselteç devreye girer ve aynı işlemler devam eder. Nanovolt mertebesinde sıfıra en yakın geline nokta işlem bitirilir. Geline bu noktadaki N_x oran sarımının tur sayısı ve nanovolt ölçüm sonucu kaydedilir.

8. Termal EMF etkisinden kurtulmak için I_x akımının yönü mikrokontrolör tarafından çevrilir. Adım 5, 6, 7 tekrarlanarak ters I_x akımı için N_x oran sarımı tur sayısı ve nanovolt ölçüm sonucu bulunur ve kaydedilir.

9. Mikrokontrolör, bulunan değerlerden R_x/R_s oranını hesaplar ve LCD ekrana yazar.

5.3. R_x / R_s Oranının Hesaplanması

Doğru akım karşılaştırıcısının dengede olduğu durumda, toplam manyetik akı sıfırdır. Bu durumda ;

$$I_x \cdot N_x = I_s \cdot N_s \quad (5.1)$$

genel akım dengesi ifadesidir. Bu denklemden I_s çekilir ise ;

$$I_s = \frac{I_x \cdot N_x}{N_s} \quad (5.2)$$

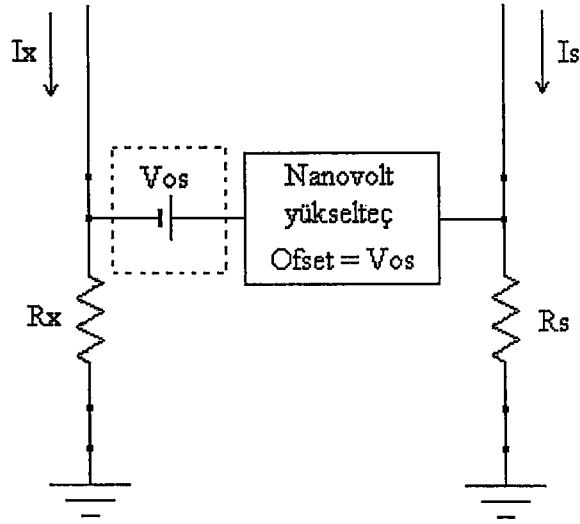
elde edilir. Dirençlerin oranının akımların oranına eşit olabilmesi için dirençlerin üzerine düşen gerilimlerin eşitlenmesi gerekir. Bu gerilim dengelemesi yapıldığında ;

$$I_x \cdot R_x = I_s \cdot R_s \quad (5.3)$$

elde edilir. Bu gerilim dengeleme önce mikrovolt seviyesinde ardından nanovolt seviyesinde yapılırken, nanovolt yükselteçten gelen gerilim ofsetleri göz önüne alınmalıdır. Bu gerilimi V_{os} ile gösterirsek ;

$$I_x \cdot R_x = I_s \cdot R_s + V_{os} \quad (5.4)$$

elde edilir. Ofset geriliminin oluşumu Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2. Nanovolt yükseltecin oluşturduğu Vos ofset gerilimi.

Nanovolt yükseltecin çıkışındaki gerilim nV ile gösterilirse ;

$$nV = I_s \cdot R_s - I_x \cdot R_x + V_{os} \quad (5.5)$$

elde edilir. Denklem 5.2, denklem 5.5’de yerine konursa ;

$$nV = \frac{I_x \cdot N_x}{N_s} R_s - I_x \cdot R_x + V_{os} \quad (5.6)$$

elde edilir. Denklem 5.6 nanovolt yükselteç çıkışı için genel ifadedir.

Uygulamada gerilimin dengeye getirilmesi, sıfır noktasına (+) ve (-) yönlerden yaklaşma ve uygun değerde bırakma şeklinde bir yöntemle yapılır. Bunun sonucunda iki ayrı nanovolt değeri alınır. Aynı işlemlerin akım ters yönde akıtılarak yapılacağı düşünülür ise, toplamda dört ayrı nanovolt değeri elde edilir (Guildline 1994).

Sıfıra yaklaşık bir noktada, N_x oran sarımının alacağı tur sayısı, (+) ve (-) yönlerden yaklaşım tekniği ile iki ayrı değer getirecektir. Yaklaşık denge noktasında $N_x = T_{N_x}$ tur olduğu düşünölsün. Ayrıca sağdan ve soldan sıfıra yaklaşıldığında, T_{N_x} tur sarıma $\pm t$ küçük tur sayısının eklenmesi gerektiği düşünölsün. Bu durumda denge için bulunan toplam tur sayıları ;

$$N_x = T_{N_x} - t \quad \text{ve} \quad N_x = T_{N_x} + t \quad (5.7)$$

şeklinde iki ayrı değerdir. Elde edilen nanovolt değerleri ise aşağıdaki şekilde gösterilsin;

$nV^+(-t)$: akım (+) yönde, T_{N_x} tur sarıma ters yönde t turluk sarım eklenmiş

$nV^+(+t)$: akım (+) yönde, T_{N_x} tur sarımla aynı yönde t turluk sarım eklenmiş

$nV^-(-t)$: akım (-) yönde, T_{N_x} tur sarıma ters yönde t turluk sarım eklenmiş

$nV^- (+t)$: akım (-) yönde, T_{N_x} tur sarımla aynı yönde t turluk sarım eklenmiş

Denklem 5.6 ile verilen, nanovolt yükselteç çıkışı için genel ifade kullanılırsa ;

$$nV^+(-t) = I_x^+ . R_s \frac{T_{N_x} - t}{N_s} - I_x^+ . R_x + V_{os} \quad (5.8)$$

$$nV^+(+t) = I_x^+ . R_s \frac{T_{N_x} + t}{N_s} - I_x^+ . R_x + V_{os} \quad (5.9)$$

$$nV^-(-t) = -I_x^- . R_s \frac{T_{N_x} - t}{N_s} + I_x^- . R_x + V_{os} \quad (5.10)$$

$$nV^- (+t) = -I_x^- . R_s \frac{T_{N_x} + t}{N_s} + I_x^- . R_x + V_{os} \quad (5.11)$$

Denklem 5.9'dan denklem 5.8 çıkarılırsa ;

$$nV^+(+t) - nV^+(-t) = I_x^+ . R_s \frac{2t}{N_s} \quad (5.12)$$

Aynı şekilde denklem 5.10'dan denklem 5.11 çıkarılırsa ;

$$nV^-(-t) - nV^-(+t) = I_x^- . R_s \frac{2t}{N_s} \quad (5.13)$$

elde edilir. Denklem 5.12 ile denklem 5.13 toplanır ;

$$nV^+(+t) - nV^+(-t) + nV^-(-t) - nV^-(+t) = R_s \frac{2t}{N_s} (I_x^+ - I_x^-) \quad (5.14)$$

buradan ;

$$I_x^+ + I_x^- = \frac{N_s}{2t.R_s} [nV^+(+t) - nV^+(-t) + nV^-(-t) - nV^-(+t)] \quad (5.15)$$

Denklem 5.10'dan denklem 5.8 çıkarılırsa ;

$$nV^-(-t) - nV^+(-t) = (I_x^+ + I_x^-) \left(R_x + R_s \frac{t - T_{Nx}}{N_s} \right) \quad (5.16)$$

Denklem 5.15, denklem 5.16'da yerine konursa ;

$$nV^-(-t) - nV^+(-t) = \frac{N_s}{2t.R_s} [nV^+(+t) - nV^+(-t) + nV^-(-t) - nV^-(+t)] \left(R_x + R_s \frac{t - T_{Nx}}{N_s} \right) \quad (5.17)$$

Denklem 5.17'den R_x / R_s oranı çekilirse ;

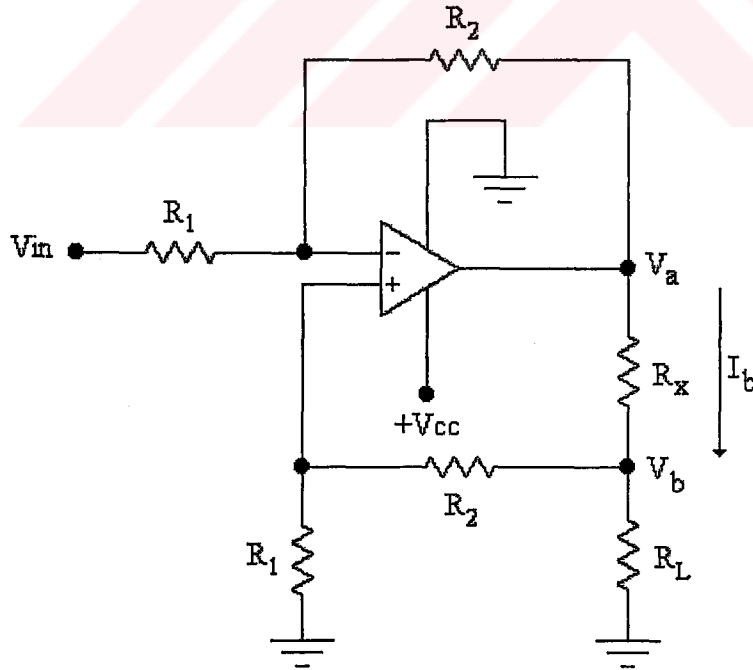
$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{T_{Nx} - t}{N_s} + \left[\frac{2t}{N_s} \cdot \frac{(nV^-(-t) - nV^+(-t))}{(nV^+(+t) - nV^+(-t) + nV^-(-t) - nV^-(+t))} \right] \quad (5.18)$$

bulunur. Mikrokontrolör tarafından denklem 5.18 hesaplanır (Guildline 1994).

BÖLÜM 6. DİRENÇ ÖLÇÜM KÖPRÜSÜNÜ OLUŞTURAN DEVRELER

6.1. Howland Tipi Akım Kaynakları

Doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsünde iki adet akım kaynağı bulunur. Birincil akım kaynağı ve ikincil akım kaynağı olarak isimlendirilirler. Ölçüm sisteminin hassasiyeti gereği iki akım kaynağının da çok kararlı olması gerekmektedir. Ayrıca direnç ölçüm köprüsünün yapısı gereği R_s standart ve R_x ölçülecek direncin birer uçlarının toprak hattında olması gereklidir. Bu sayede diğer uçlarından, üzerlerine düşen gerilimin farkı doğrudan ölçülebilir. Bu tür yük bağlantısına izin veren akım kaynağı, howland tipi akım kaynağıdır.



Şekil 6.1. Howland tipi akım kaynağı.

Bu devrede R_L yük direncinden akacak olan akımın değeri, R_L 'nin değerinden bağımsızdır ve sadece V_{in} gerilimi ile değişir. Doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsünde R_L direnci olarak, ölçülecek direnç ve karşılaştırmacının oran sarımları olacaktır. Bu oran sarımlarının miktarı ölçüm sürecinde değişeceğinden toplam yük direnci sabit kalmayacaktır. Kaynağın vereceği akımın R_L 'nin değerinden bağımsız olması önemlidir. Bu sebeple akım kaynakları kullanılmaktadır.

Burada V_a gerilimi ;

$$V_a = \frac{-R_2}{R_1} V_{in} + V_b \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6.1)$$

Denklem 6.1 basitleştirilirse ;

$$V_a = \frac{-R_2}{R_1} V_{in} + V_b \quad (6.2)$$

Denklem 6.2 düzenlenirse ;

$$V_a - V_b = \frac{-R_2}{R_1} V_{in} \quad (6.3)$$

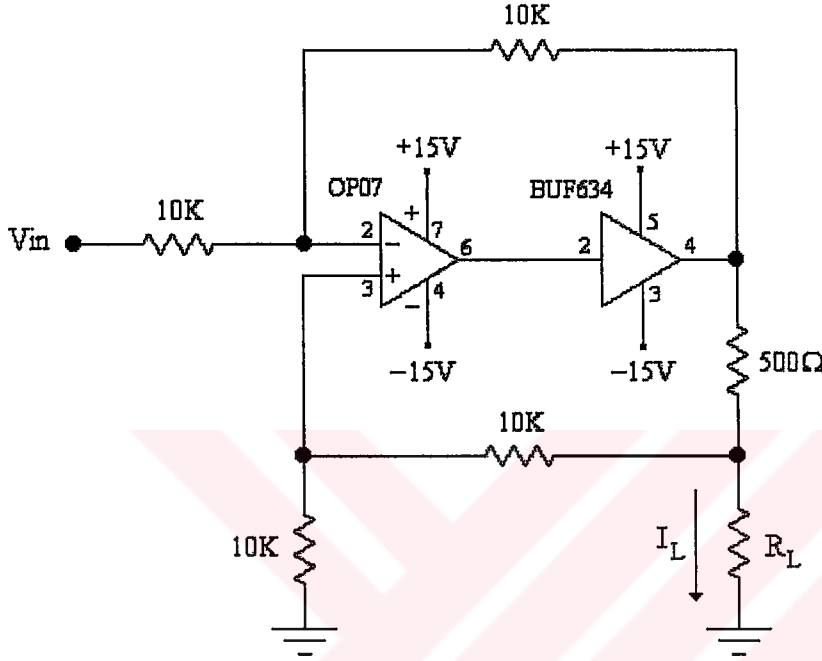
Ohm kanunundan I_b yazılırsa ;

$$I_b R_x = V_a - V_b \quad (6.4)$$

Denklem 6.3 ve 6.4 yardımı ile ;

$$I_b = \frac{-R_2}{R_1} \frac{1}{R_x} V_{in} \quad (6.5)$$

Şekil 6.2’de direnç ölçüm köprüsünde kullanılan howland tipi akım kaynağının şeması gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan howland tipi akım kaynağı.

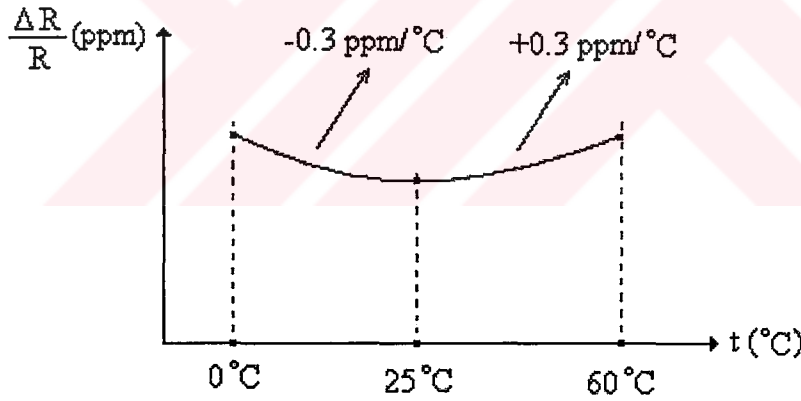
Şekil 6.2’de görülen OP07 opamp entegresinin çıkış akımı, direnç ölçüm köprüsünün ihtiyacını karşılayamaz ve aşırı yük akımı çekilmesi sonucu opamp yanabilir. Bu nedenle BUF634 akım tamponu entegresi çıkışa eklenmiştir. Bu akım tamponu sayesinde max. $\pm 250\text{mA}$ çıkış akımı alınabilir.

Yapılan köprü tasarımında max. $\pm 20\text{mA}$ akım seviyelerine ihtiyaç duyulmuştur. Vin giriş gerilimi ise, sayısal kontrollü bir DA çevirici entegresinden gelmektedir ve $\pm 10\text{V}$ aralığındadır.

Denklem 6.5, şekil 6.2'deki eleman değerleri ve verilen parametreler ile hesaplanırsa ;

$$I_{L\max} = \frac{-10K}{10K} \frac{1}{500\Omega} 10V = -20mA \quad (6.6)$$

Görüldüğü gibi akım kaynağı, $\pm 10V$ giriş gerilimine karşılık $\pm 20mA$ 'lik çıkış akımı vermektedir. Howland akım kaynağının kararlılığı, kullanılan devre elemanlarının kararlılığına doğrudan bağlıdır. Şekil 6.2'deki devrede kullanılan dirençlerin değerinin sıcaklıkla ve zamanla değişiminin mümkün olan en az değerde olması sağlanmıştır. Bu amaçla 'Vishay' firmasının ürettiği S102K tipi dirençler kullanılmaktadır. Bu dirençler 'bulk metal foil' teknolojisi ile üretilmektedir. Şekil 6.3'de Vishay S102K dirençlerinin sıcaklık bağımlılığı verilmiştir. 0 - 60 °C sıcaklık aralığında 0.3 ppm değişim katsayısına sahiptir.



Şekil 6.3. Vishay S102K tipi dirençlerin sıcaklık ile değişimi.

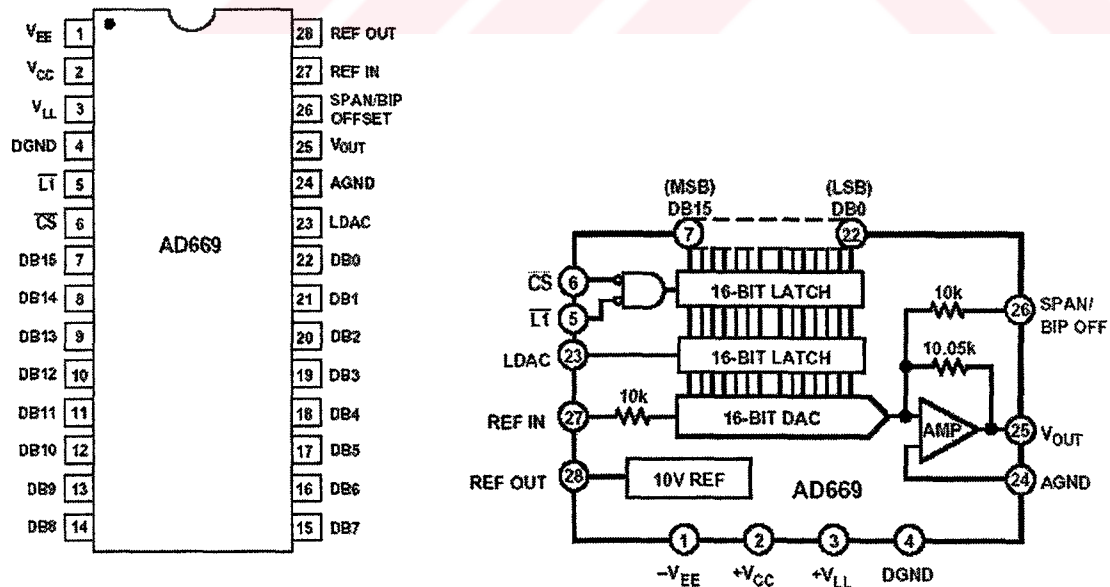
S102K tipi dirençlerin kullanımı, akım kaynağının çıkışının sıcaklık ile değişimini azaltır. Çıkış akımının değerini belirleyen ve akım kaynağının girişine uygulanan V_{in} geriliminin kararlılığı da önemli bir etkidir. Bu sebeple, kullanılan DA çeviricilerin ve gerilim referanslarının kararlılığı önemlidir.

6.2. DA ve AD Çeviriciler

6.2.1. DA çevirici

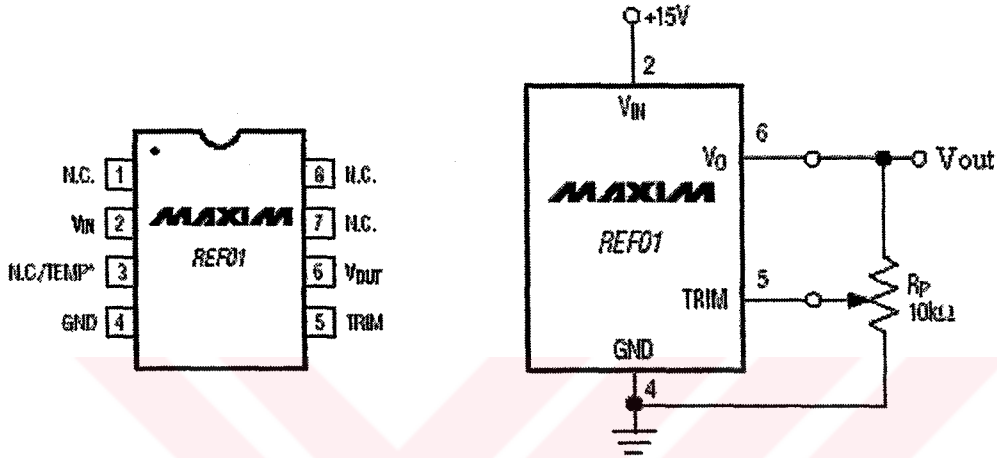
Direnç ölçüm köprüsünde iki adet DA çevirici bulunmaktadır. Yapılan pratik uygulamada, 'Analog Devices' firmasının ürettiği AD669 isimli entegre kullanılmıştır. Kullanılan DA çeviricinin özellikleri ;

- 16 bit dijital-analog çevirici
- ± 1 LSB maksimum INL hatası
- ± 1 LSB maksimum DNL hatası
- 16 bit paralel veri girişi
- Çıkış gerilimi tek polariteli (0 ile +10V) veya çift polariteli (-10V ile +10V) seçilebilir
- 10 V dahili gerilim referansı , 25 ppm/ $^{\circ}$ C sıcaklık katsayısına sahip



Şekil 6.4. AD669 DA çevirici bacak dizilişi ve iç yapısı.

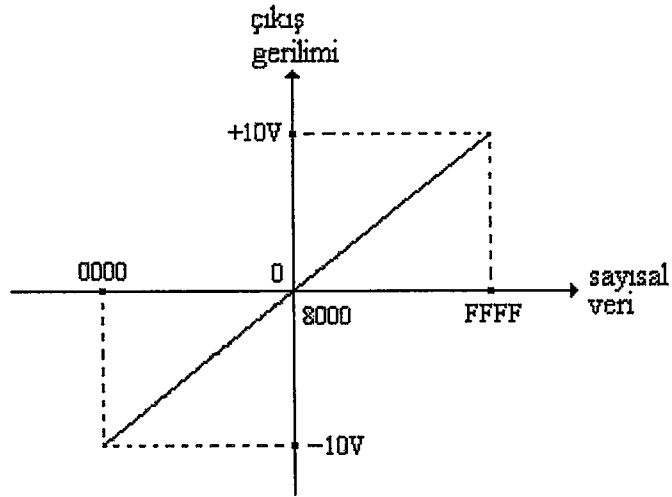
Uygulamada 25 ppm/°C sıcaklık katsayılı dahili gerilim referansı yerine daha iyi özelliklere sahip harici gerilim referansı kullanılmıştır. Şekil 6.5’de ‘Maxim’ firması tarafından üretilen REF01 +10 V gerilim referans entegresi görülmektedir.



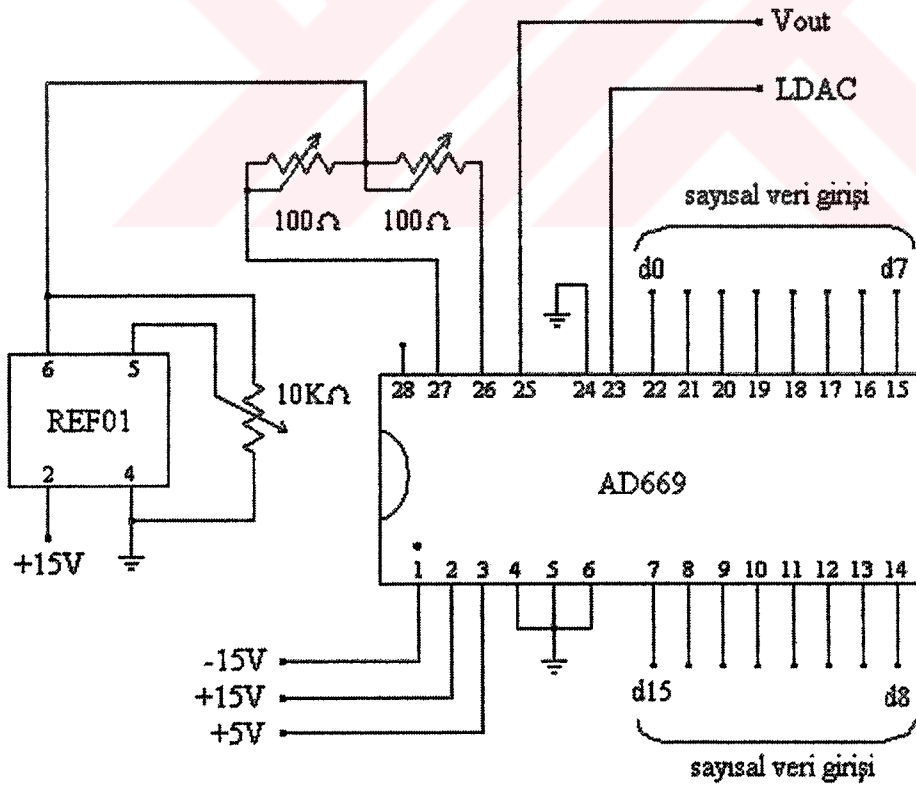
Şekil 6.5. REF01 +10 V gerilim referans entegresi ve çıkış gerilimi ayarı.

REF01 referans entegresinin çıkış geriliminin sıcaklıkla değişim katsayısı 3 ppm/°C ‘dir. DA çeviricinin referans geriliminin kararlılığı, çevirici çıkışının kararlılığını dolayısı ile akım kaynağının kararlılığını etkiler. Şekil 6.6’da DA çeviricinin girişine uygulanan sayısal veri ile çıkış geriliminin değişimi verilmiştir. Akım kaynaklarının (+) ve (–) yönlerde akım verebilmesi için DA çevirici çıkışının da çift yönlü olması gereklidir. Bu sebeple çift yönlü devre konfigürasyonu seçilmiştir.

Şekil 6.7’de kullanılan devre konfigürasyonu verilmiştir. REF01 referans entegresine bağlı 10KΩ’luk trimpot ile referans gerilimi, mikrovolt mertebelerinde ayarlanabilir. 100Ω’luk trimpotlar ile DA çeviricinin çıkış ofseti ve çıkış kazancı (şekil 6.6’daki doğrunun eğimi) ayarlanabilir. LDAC ucu, mikrokontrolör tarafından sürülür ve verinin DA çevirici içindeki veri tamponuna yazılmasını sağlar.



Şekil 6.6. DA çeviriciye uygulanan sayısal veri ile çıkış geriliminin değişimi.

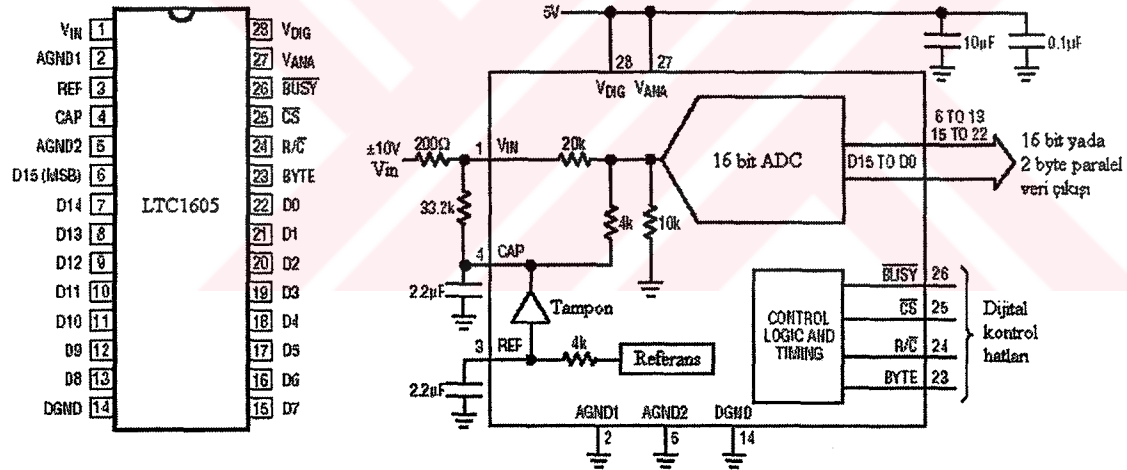


Şekil 6.7. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan DA çevirici devresi.

6.2.2. AD çevirici

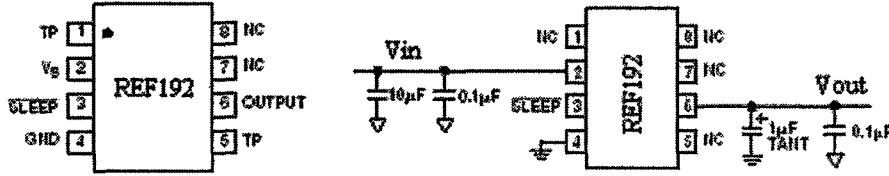
Direnç ölçüm köprüsünde, üç adet AD çevirici bulunmaktadır. Yapılan pratik uygulamada, 'Linear Technology' firmasının ürettiği LTC1605 isimli entegre kullanılmıştır. Kullanılan AD çeviricinin özellikleri ;

- 16 bit paralel veri çıkışı
- Veriyi 2 byte olarak iki ayrı paket halinde alabilme
- ± 10 V analog giriş
- ± 2 LSB maksimum INL hatası
- 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık katsayısına sahip 2.5 V dahili gerilim referansı



Şekil 6.8. LTC1605 AD çevirici bacak dizilişi ve iç yapısı.

Uygulamada 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık katsayılı dahili gerilim referansı yerine, daha iyi özelliklere sahip harici gerilim referansı kullanılmıştır. Şekil 6.9'da 'Maxim' firması tarafından üretilen REF192 +2.5 V gerilim referans entegresi görülmektedir.



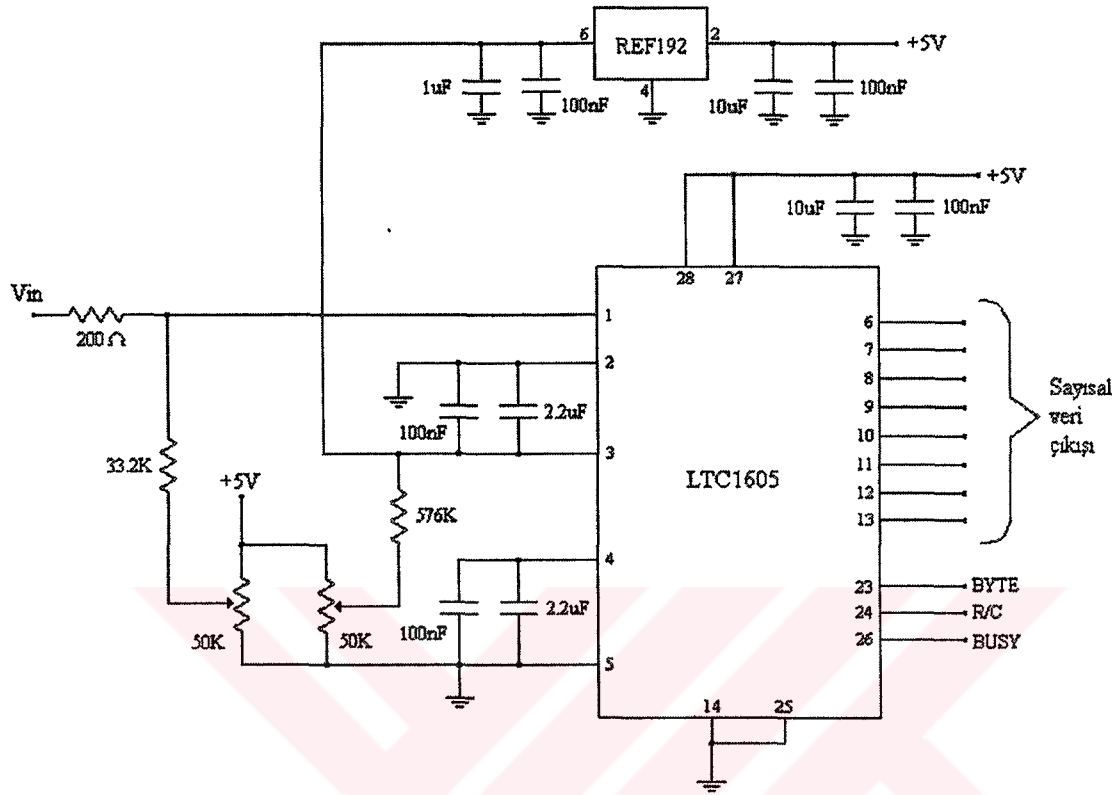
Şekil 6.9. REF192 +2.5V gerilim referans entegresi ve bağlantı şekli.

REF192 entegresinin çıkış geriliminin sıcaklıkla değişim katsayısı 2 ppm/°C 'dir. AD çeviricinin referans geriliminin sıcaklık ve diğer etkenler ile değişimi, çevirici çıkışından alınan sayısal verinin hatalı olmasına neden olur.

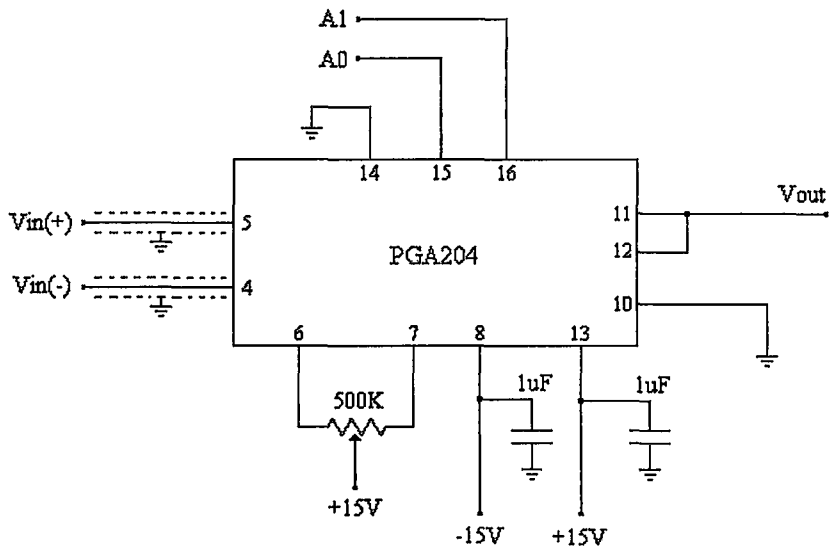
Direnç ölçüm köprüsünde bulunan AD çeviricilerden birincisi, Rx-Rs dirençleri üzerine düşen gerilimlerin farkının mikrovolt mertebelerindeki ölçümü için kullanılmıştır. İkinci AD çevirici, aynı gerilim farkının nanovolt mertebelerindeki ölçümü için kullanılmıştır. Üçüncü AD çevirici ise demodülatör çıkışındaki fark manyetik akısı ile orantılı doğru gerilimin (doğru akım karşılaştırıcının dengesizliği) ölçülmesi için kullanılmıştır.

Mikrovolt ve nanovolt mertebelerindeki gerilim ölçümleri için AD çevirici girişine, uygun yükselteç devrelerinin yapılması gereklidir. Mikrovolt ölçümlerinde programlanabilir kazanç yükselteci PGA (programmable gain amplifier) kullanılmıştır. Nanovolt ölçümlerinde, EM Electronics firmasının ürettiği nanovoltmetre kullanılmaktadır. Çalışmanın devamında, aynı firmanın ürettiği EM-A10 nanovolt yükselteç kullanılması düşünülmektedir.

Şekil 6.10'da, direnç ölçüm köprüsünde kullanılan AD çevirici devresi görülmektedir. 50KΩ'luk trimpotlar ile AD çeviricinin ofset ve kazancı ayarlanabilmektedir. R/C bacağına uygulanacak sayısal işaretin düşen kenarı ile analog çevrim işlemi başlar. Çevrimin başlaması ile AD çevirici, BUSY bacağına sıfıra çeker. Bu bacağın '1' olması çevrimin tamamlandığını, verinin hazır olduğunu gösterir. 8 bitlik ilk veri paketi alındıktan sonra BYTE ucu '1' yapılarak diğer 8 bitlik veri paketi alınır.

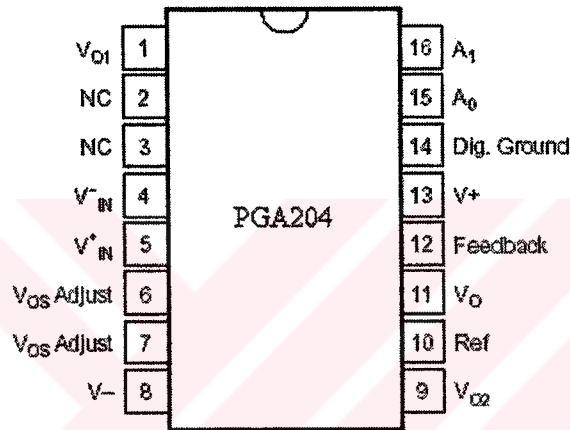


Şekil 6.10. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan AD çevirici devresi.



Şekil 6.11. AD çevirici girişinde kullanılan programlanabilir kazanç yükseltici.

Şekil 6.11’de programlanabilir kazanç yükselteci devresi görülmektedir. ‘Burr-Brown’ firmasının ürettiği PGA204 entegresi kullanılmıştır. Ölçüm yükselteci (instrumentation amplifier) yapısındadır. $V_{in}(+)$, $V_{in}(-)$ girişleri farklı potansiyellerde olabileceği gibi herhangi biri toprak potansiyelinde de olabilir. Bu girişler baskılı devre üzerinde toprak hattı ile çevrelenerek ekranlanmıştır. 500K Ω ’luk trimpot ile yükseltecin ofseti $\pm 250\mu V$ ’luk bölgede ayarlanabilir.



Şekil 6.12. PGA204 programlanabilir kazanç yükselteci entegresi.

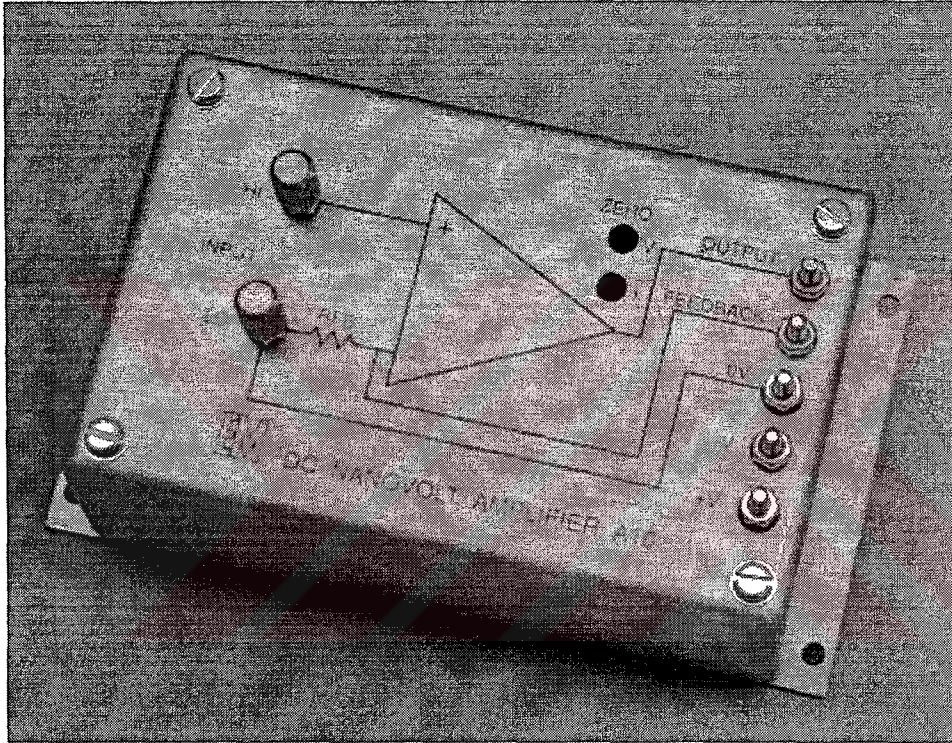
A0 ve A1 sayısal girişleri kullanılarak yükseltecin kazancı ayarlanabilir. Tablo 6.1’de kazanç ayar seçenekleri verilmiştir.

Tablo 6.1. PGA204 sayısal kazanç ayarı.

A1	A0	Kazanç
0	0	1
0	1	10
1	0	100
1	1	1000

6.3. EM-A10 Nanovolt Yükselteç

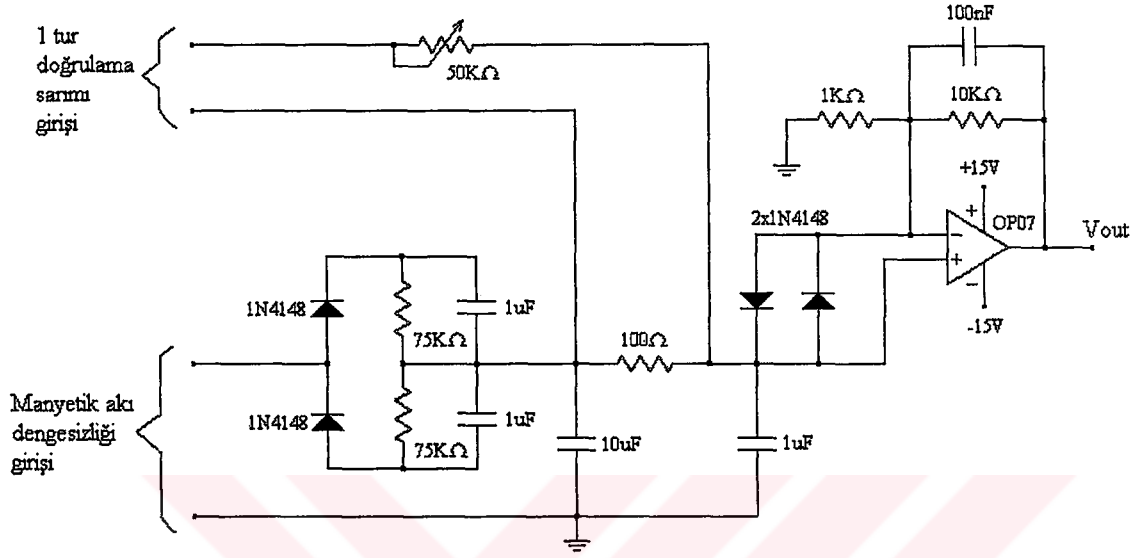
EM-A10 çok düşük seviyeli işaretlerin yükseltilmesi için tasarlanmış, metrolojik amaçlı cihazlarda kullanılan özel bir yükselteçtir. 'EM Electronics' firması tarafından üretilmektedir.



Şekil 6.13. EM-A10 nanovolt yükselteç.

- 1 nV/°C sıcaklığa bağlı gerilim ofseti
- 5 pA/°C sıcaklığa bağlı akım ofseti
- Giriş direnci $> 1 \text{ G}\Omega$
- $\pm 2 \text{ mV}$ maksimum giriş gerilimi
- $\pm 3 \text{ V}$ maksimum çıkış gerilimi
- $\pm 6 \text{ V}$ besleme gerilimi ($\pm 12 \text{ V}$ maksimum)
- 3 mm çaplı saf bakır giriş terminalleri

6.5. Demodülatör Devresi



Şekil 6.15. Direnç ölçüm köprüsünde kullanılan demodülatör devresi.

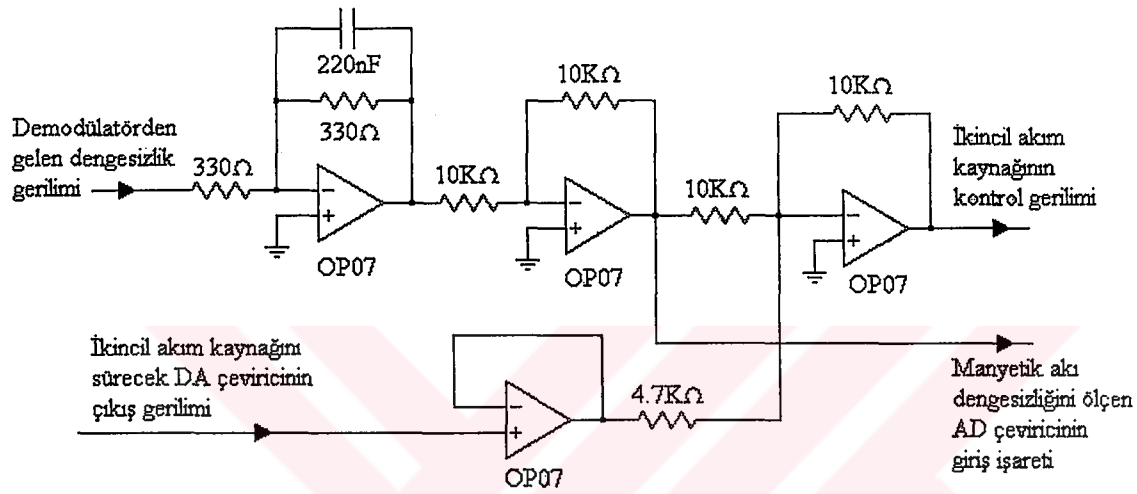
Doğru akım karşılaştırıcısı içinde oluşan manyetik akı dengesizliği ile Vout gerilimi orantılı olarak değişir. 1 turluk doğrulama sarımından gelen işaret 100Ω'luk direnç üzerine düşer. Bu işaret, aynı direnç üzerindeki osilasyon kalıntıları ile ters fazdadır ve birbirlerini yok ederler. Vout işareti osiloskop ile izlenirken, 50KΩ'luk trimpot ile çıkıştaki osilasyon kalıntısı minimum olacak şekilde ayar yapılır.

Akım karşılaştırıcısının duyarlılığının ayarlanmasında bir yöntem olarak, OP07 opamp entegresine bağlı 1KΩ ve 10KΩ dirençlerinin değerleri değiştirilebilir. Böylece opamp'ın kazancı değişir.

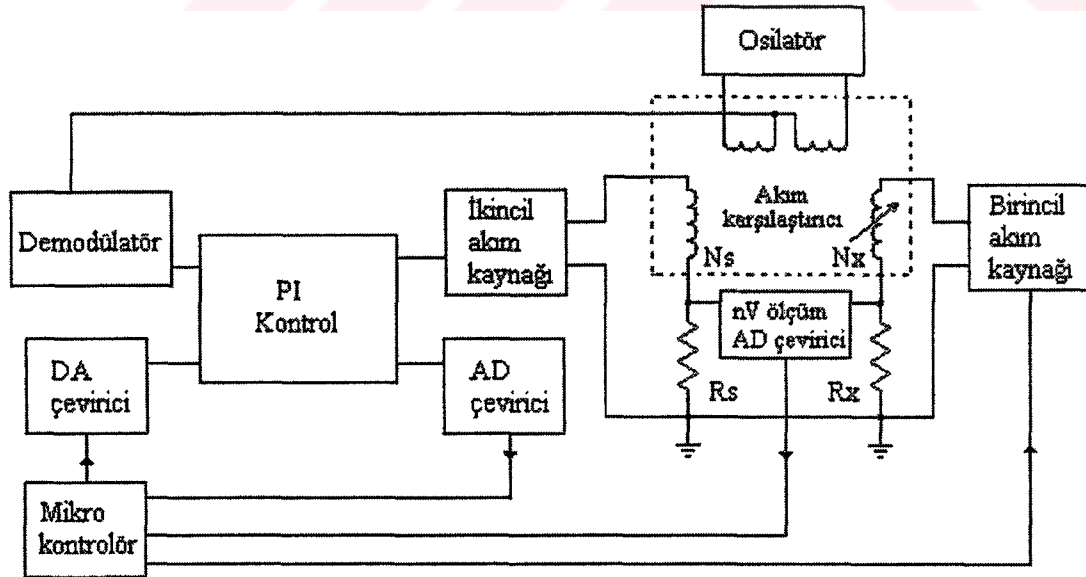
Doğru akım karşılaştırıcısındaki manyetik akı dengesizliği $\Delta\Phi = 0$ iken $V_{out} \neq 0$ ise, girişteki 75KΩ'luk dirençler arasında fark olduğu anlaşılır. Dirençlerden biri ayarlanarak sıfırlama yapılmalıdır. Bu işlem için, dirençlerden birine MΩ'lar mertebelerinde paralel direnç bağlanması, iyi bir yöntemdir.

6.6. PI Kontrol Geri Besleme Devresi

Doğru akım karşılaştırıcı içindeki manyetik akı dengesizliğini sıfırlama işlemi otomatik olarak yapılır. Bunun için PI kontrol mantığına sahip geri besleme devresi kullanılmıştır.



Şekil 6.16. Manyetik akıyı otomatik sıfırlayan PI kontrol geri besleme devresi.

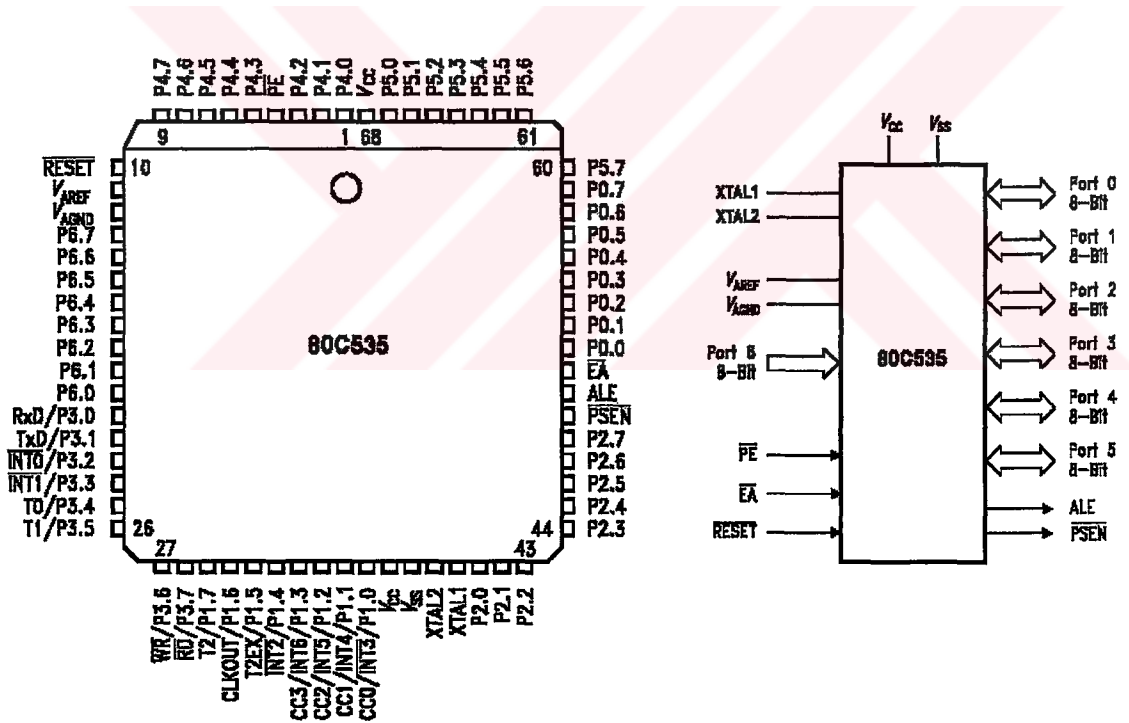


Şekil 6.17. PI kontrol sistemi ile doğru akım karşılaştırıcılı direnç ölçüm köprüsü.

İkincil akım kaynağı, geri besleme sistemi tarafından kontrol edilir. Manyetik akının sıfırlanmasında yeterli hassasiyeti yakalamak ve osilasyonlara engel olmak için PI kontrol mantığı kullanılmıştır.

İkincil DA çeviriciden gelen işaret ile demodülatörden gelen işaret toplanır. Toplama sonucu elde edilen işaret, ikincil akım kaynağına uygulanır. Burada DA çevirici, akımın kaba değerini vermektedir. Demodülatörden gelen dengesizlik işareti de, bu kaba değer üzerinde salınım yapmakta ve dengeye gelerek sabit bir noktaya oturmaktadır.

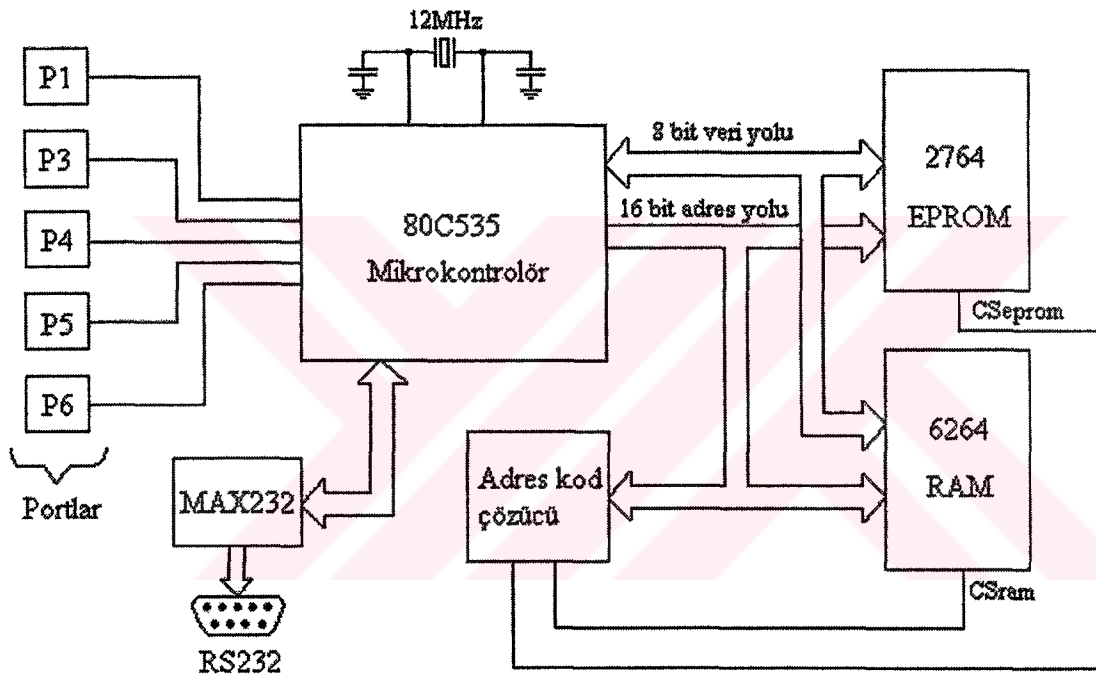
6.7. 80C535 Mikrokontrolör Kartı



Şekil 6.18. İntel 80C535 mikrokontrolör.

Doğru akım karşılaştırmalı direnç ölçüm köprüsünde İntel firmasının ürettiği 80C535 mikrokontrolörü kullanılmıştır. 12 MHz'lik kristal ile 1 μ S komut işlem süresine sahiptir. Her biri 8 bitlik yedi adet port içerir.

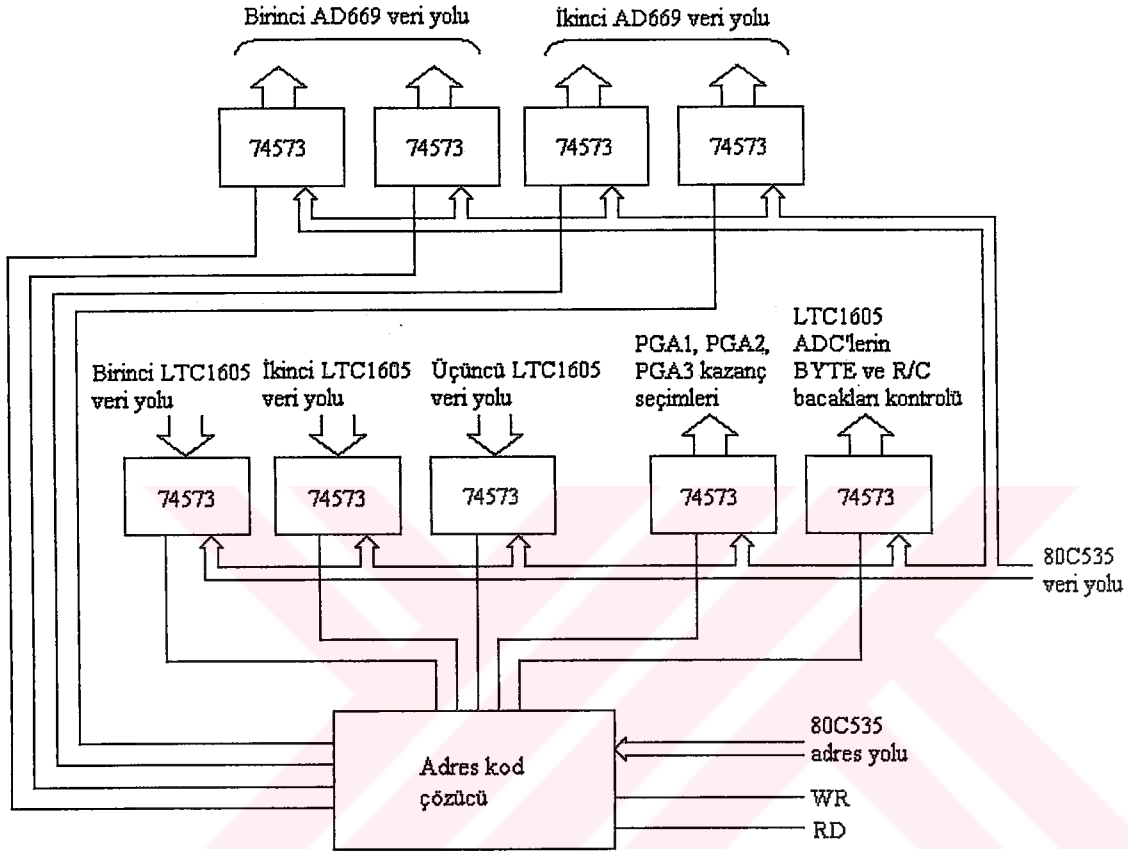
Harici RAM entegresi, ve program belleği olarak EPROM bağlanması gerekliliğinden P0 ve P2 portları, veri yolu ve adres yolu olarak kullanılır. Bu kullanım, mikroişlemci modu olarak adlandırılır. Geri kalan beş portun bazı bacakları da kesme, seri haberleşme gibi özel hizmetlere kullanılır. Sonuç olarak boşta kalan P1, P3, P4, P5 ve P6 portları tuş takımı, LCD ekran ve AD çeviricilerin BUSY işaretlerinin girişi için kullanılmıştır. Şekil 6.19’da mikrokontrolör kartının blok şeması verilmiştir.



Şekil 6.19. Direnç ölçüm köprüsü mikrokontrolör kartı.

Mikrokontrolör kartında 8 Kbyte’lık EPROM ve 8 Kbyte’lık RAM bulunmaktadır. RS232 portu üzerinden PC ile haberleşebilmektedir. Pratik denemelerde EPROM içinde hazır bir monitör program bulunmaktadır. PC ortamında yazılan uygulama programı RS232 üzerinden, monitör program aracılığı ile RAM’e yazılmakta ve RAM’den çalıştırılmaktadır. Son halini alan uygulama programı, bir programlayıcı ile EPROM’a yazılır ve monitör program EPROM’unun yerine takılır. EPROM, hafıza haritasında 0000h ile 1FFFh adresleri arasında; RAM ise 2000h ile 3FFFh adresleri arasında yer almaktadır.

6.8. AD ve DA Çeviriciler için Arabirim Kartı



Şekil 6.20. AD ve DA çeviriciler için arabirim kartı.

AD669 DA çeviricinin 16 bitlik veri yolu bulunmaktadır. LTC1605 AD çevirici de 16 bitlik veri yoluna sahip olmakla birlikte, 8 bit modunda veriyi iki paket halinde verebilme özelliği bulunmaktadır. İki adet DA çevirici ve üç adet AD çeviricinin 80C535 mikrokontrolörüne doğrudan bağlanması mümkün değildir. Bu sebeple şekil 6.20’de görülen arabirim kartı tasarlanmıştır.

74573 entegresi 8 bitlik bir port sağlamaktadır. Uygun adres kod çözme tekniği ile 9 adet 74573 entegresi, mikrokontrolörün hafıza haritasına yerleştirilmiştir. Birinci ve ikinci 74573, birinci AD669 DA çeviricisini sürmektedir. Üçüncü ve dördüncü 74573, ikinci AD669 DA çeviricisini sürmektedir. Beşinci, altıncı ve yedinci 74573, üç adet LTC1605 AD çeviriciyi sürmektedir. Sekizinci 74573, AD çeviricilerin girişinde bulunan PGA'ların (programlanabilir kazanç yükseltici) kazanç seçimini yapmaktadır. Dokuzuncu 74573, AD çeviricilerin BYTE ve R/C bacaklarını sürmektedir.

Tablo 6.2. Arabirim kartı hafıza haritası adresleri.

Heksadesimal adres	Seçilen arabirim
6000h	Birinci AD çevirici
6001h	İkinci AD çevirici
6002h	Üçüncü AD çevirici
6008h	Birinci DA çevirici – Alçak byte
6009h	Birinci DA çevirici – Yüksek byte
600Ah	İkinci DA çevirici – Alçak byte
600Bh	İkinci DA çevirici – Yüksek byte
600Ch	PGA1, PGA2, PGA3 kazanç seçimi
600Dh	AD çeviriciler BYTE ve R/C sürme

600Ch adresinde bulunan PGA kazanç seçim kaydedicisinin içeriği ;

d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1	d0
A1	A0	X	A1	A0	X	A1	A0
PGA3			PGA2			PGA1	

şeklindedir. Burada X ile gösterilen bitlerin alacağı değer önemsizdir.

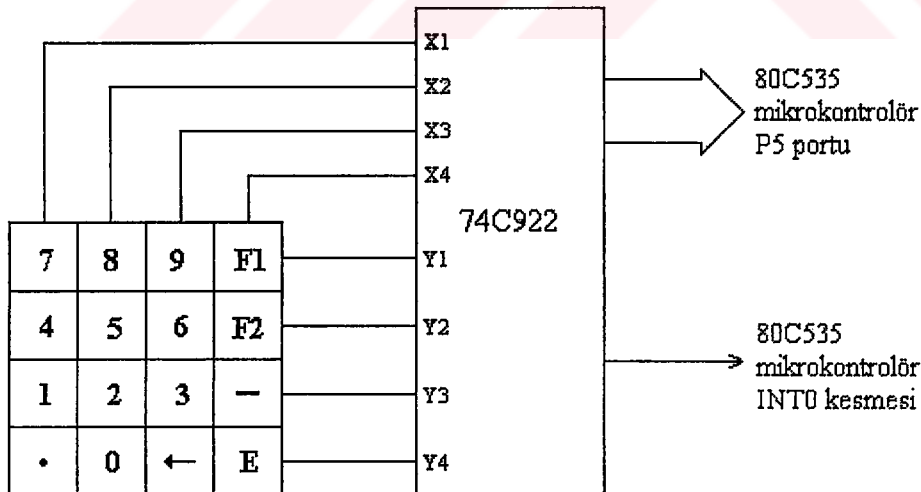
600Dh adresinde bulunan BYTE ve R/C kontrol kaydedicisinin içeriği ;

d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1	d0
R/C	BYTE	X	R/C	BYTE	X	R/C	BYTE
ADC3			ADC2			ADC1	

şeklindedir. Burada X ile gösterilen bitlerin alacağı değer önemsizdir.

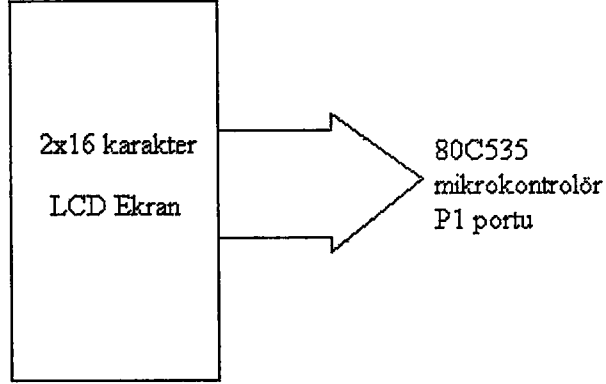
6.9. Tuş Takımı ve LCD Ekran

Mikrokontrolör kartına tuş takımı bağlantısı için 74C922 entegresi kullanılmıştır. 4x4 matris yapısında 16 adet tuş kullanılmıştır. Tuşlardan herhangi birine basıldığında, entegrenin 4 bitlik veri hattında tuşun kodu yer alır ve kesme çıkışında bir donanım kesmesi oluşur. 74C922'nin kesme çıkışı, 80C535'in INT0 kesmesine; 4 bitlik veri çıkışı P5 portuna bağlıdır. Yazılım, sürekli tarama yapmaz ve sadece INT0 kesmesi oluştuğunda P5 portundan basılan tuşun kodunu alır.



Şekil 6.21. Mikrokontrolör kartına 74C922 entegresi ile 4x4 matris tuş takımı bağlantısı.

Mikrokontrolörün P1 portu, LCD ekran bağlantısına ayrılmıştır. Hitachi HD44780 standartında, karakter tabanlı, 2x16 formatlı LCD ekran kullanılmıştır.

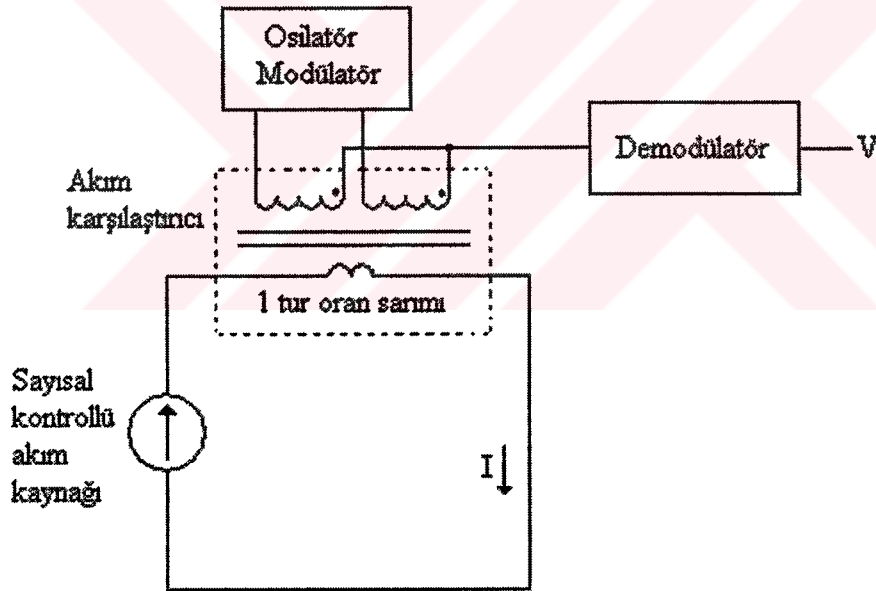


Şekil 6.22. Mikrokontrolör kartına 2x16 karakter LCD ekran bağlantısı.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Bu bölümde, TÜBİTAK-UME’de yapılan doğru akım karşılaştırıcı ile metroloji enstitülerinde kullanılan Guildline firması yapımı ticari doğru akım karşılaştırıcının ölçüm sonuçları ve karşılaştırılmaları verilmiştir.

7.1. Ölçüm Yöntemi



Şekil 7.1. Doğru akım karşılaştırıcı duyarlılık ölçüm yöntemi

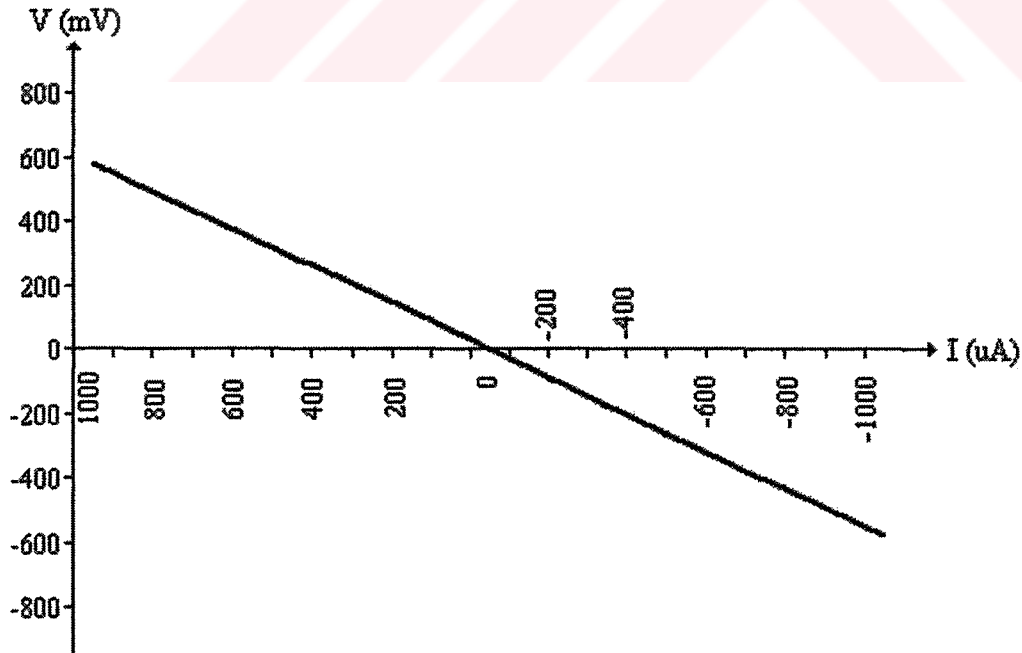
Şekil 7.1’de görülen sistem ile doğru akım karşılaştırıcı ölçümleri yapılmıştır. Sayısal kontrollü akım kaynağından I akımı verilmektedir. Oran sarımı olarak sadece 1 turluk tek sarım yapılmıştır. Bu durumda $I = 100 \mu A$ yapıldığında, $100 \mu A.tur$ ’luk manyetik akı dengesizliği karşılaştırıcıda oluşacaktır. -1 mA ile $+1 \text{ mA}$ akım aralığı, $100 \mu A$

ölçüm adımları ile taranmıştır. Oluşan dengesizliğin etkisi demodülatör çıkışındaki V geriliminden ölçülmektedir. Ölçümlerde Keithley 2002 model multimetre kullanılmıştır.

7.2. Guildline Doğru Akım Karşılaştırmalı Ölçüm Sonuçları

Tablo 7.1. Guildline doğru akım karşılaştırmalı ölçüm sonuçları.

Akım (μA)	Gerilim (mV)	Akım (μA)	Gerilim (mV)
1000,3	575,8		
899,8	518,5	-99,9	-58,1
800,3	461,6	-199,9	-116,2
700,3	404,4	-300	-174,5
600,1	346,7	-400	-232,5
500,1	289,1	-500	-290,4
400,1	231,4	-600,1	-348,3
300,2	172,8	-700,3	-406,1
200	115,6	-800,2	-463,7
100	57,7	-899,8	-521,8
0	0	-1000,3	-579,3



Şekil 7.2. Guildline doğru akım karşılaştırmalı duyarlılık grafiği.

7.3. UME Yapımı Doğru Akım Karşılaştırmalı Ölçüm Sonuçları

Tablo 7.2. UME yapımı doğru akım karşılaştırmalı ölçüm sonuçları.

Akım (μA)	Gerilim (mV)	Akım (μA)	Gerilim (mV)
1000	734,7		
900,3	661,7	-100,3	-72,5
800,1	587,7	-200	-145,8
700,1	513,6	-300,1	-219,5
599,9	440,5	-400,1	-292,1
500,2	367,9	-500,3	-365,3
400	294,4	-600	-437,5
300	220,9	-700,2	-510,5
199,9	147,2	-800,3	-583,8
100,3	73,8	-900,4	-657
0	0	-1000	-729,9



Şekil 7.3. UME yapımı doğru akım karşılaştırmalı duyarlılık grafiği.

7.4. Ölçüm Sonuçlarının Analizi

Tablo 7.3. Guildline doğru akım karşılaştırıcı duyarlılığı.

Akım (μA)	Gerilim (mV)	Duyarlılık (mV/ $\mu\text{A.tur}$)
1000,3	575,8	0,570149254
899,8	518,5	0,571859296
800,3	461,6	0,572
700,3	404,4	0,575848303
600,1	346,7	0,576
500,1	289,1	0,577
400,1	231,4	0,586586587
300,2	172,8	0,570858283
200	115,6	0,579
100	57,7	0,577
0	0	0,581581582
-99,9	-58,1	0,581
-199,9	-116,2	0,582417582
-300	-174,5	0,58
-400	-232,5	0,579
-500	-290,4	0,578421578
-600,1	-348,3	0,576846307
-700,3	-406,1	0,576576577
-800,2	-463,7	0,583333333
-899,8	-521,8	0,572139303
-1000,3	-579,3	

Duyarlılığın ortalaması : 0.5774 mV / $\mu\text{A.tur}$

Duyarlılığın standart sapması : 0.004453

Sistem : Guildline doğru akım karşılaştırıcı ve Guildline demodülatör

Tablo 7.4. UME yapımı doğru akım karşılaştırıcı duyarlılığı.

Akım (μA)	Gerilim (mV)	Duyarlılık (mV/ $\mu\text{A.tur}$)
1000	734,7	0,73219659
900,3	661,7	0,738522954
800,1	587,7	0,741
700,1	513,6	0,729540918
599,9	440,5	0,728184554
500,2	367,9	0,733532934
400	294,4	0,735
300	220,9	0,736263736
199,9	147,2	0,736947791
100,3	73,8	0,735792622
0	0	0,722831505
-100,3	-72,5	0,735205617
-200	-145,8	0,736263736
-300,1	-219,5	0,726
-400,1	-292,1	0,730538922
-500,3	-365,3	0,724172518
-600	-437,5	0,728542914
-700,2	-510,5	0,732267732
-800,3	-583,8	0,731268731
-900,4	-657	0,731927711
-1000	-729,9	

Duyarlılığın ortalaması : 0.7323 mV / $\mu\text{A.tur}$

Duyarlılığın standart sapması : 0.004786

Sistem : UME yapımı doğru akım karşılaştırıcı ve demodülatör

Bu sonuçlar, gerçekleştirilen doğru akım karşılaştırıcının iyi olduğunu göstermiştir. Duyarlılığı, uzun yıllardır referans olarak kullanılan cihaza göre daha iyidir. Bundan sonraki çalışmalar duyarlılığın standart sapmasının düşürülmesine yönelik olacaktır. Tez konusu olan çalışma halen TÜBİTAK-UME Empedans laboratuvarında devam etmektedir.

KAYNAKLAR

1. CHENG, D.K., 1989. Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company Inc. ISBN:0-201-52820-7
2. COTTINGHAM, W.N. and GREENWOOD, D.A., 1991. Electricity and Magnetism, Cambridge University Press. ISBN:0-521-36229-6
3. GUILDLINE Instruments Inc., 1984. Guildline Instruments Model 9975 Direct Current Comparator Resistance Bridge Technical Manual
4. GUILDLINE Instruments Inc., 1994. An Automatic DCC for Resistance Ratio Measurements Technical Note
5. KUSTERS, N.L. and MACMARTIN, M.P., 1973. A Direct Current Comparator Bridge for High Resistance Measurements, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 22, No. 4, pp. 382-386
6. MACMARTIN, M.P. and KUSTERS, N.L., 1966. A Direct Current Comparator Ratio Bridge for Four Terminal Resistance Measurements, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 15, No. 4, pp. 212-220
7. MEASUREMENTS International Inc., 1997. Automatic DC Resistance Bridge Model 6010 Technical Manual
8. MOORE, W.J.M. and MILJANIC, P.N., 1988. The Current Comparator, Peter Peregrinus Publishing Ltd. ISBN:0-86341-112-6
9. REN, S., DING, H., LI, M. and SHE, S., 1995. Magnetic Shielding Effectiveness for Comparators, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, No. 2, pp. 422-424
10. UME Empedans Laboratuarı DC Direnç Kalibrasyonu Eđitim Notları, 2003. Ulusal Metroloji Enstitüsü, Marmara Araştırma Merkezi, TÜBİTAK
11. VAN PUTTEN, A.F.P., 1996. Electronic Measurement Systems, IOP Publishing Ltd. ISBN:0-7503-0339-5

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İstanbul’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmit’te tamamladı. 1995 yılında Kocaeli Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümü’nden mezun olarak lise öğrenimini tamamladı. 1995 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Kocaeli Meslek Yüksek Okulu Endüstriyel Elektronik Bölümü’nden 1997 yılında mezun oldu. 1997 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü’nden 2001 yılında mezun oldu. Eylül 2001’de Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

2002 yılında TÜBİTAK-UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü) Sıcaklık Standartları Laboratuvarında Araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır.