

mV GENLİKLİ AC GERİLİMLERİN KALİBRASYONU

1. GİRİŞ

Çağımızın yüksek teknolojileri artık çok presiz ölçme yapabilen cihazlara ihtiyaç duymaktadır. Kalite güvence sistemlerinin vazgeçilmez bir kısmını kapsayan konu izlenebilirliği sağlanmış ölçme faaliyetleri olup, günümüzde mV genlikli AC gerilimlerin izlenebilir tarzda ölçülmesi ciddi bir problem olarak önümüzde durmaktadır.

Bu tebliğde, yaklaşık üç yıldır üzerinde tartışılan kalibrasyon metodlarından en kullanışlı ve en küçük “ölçme belirsizliğine” sahip iki metod ele alınacaktır.

Bu metodlardan bahsetmeden önce, bu konuda tartışılan metodları bir cümle ile de olsa hatırlatmakta fayda vardır.

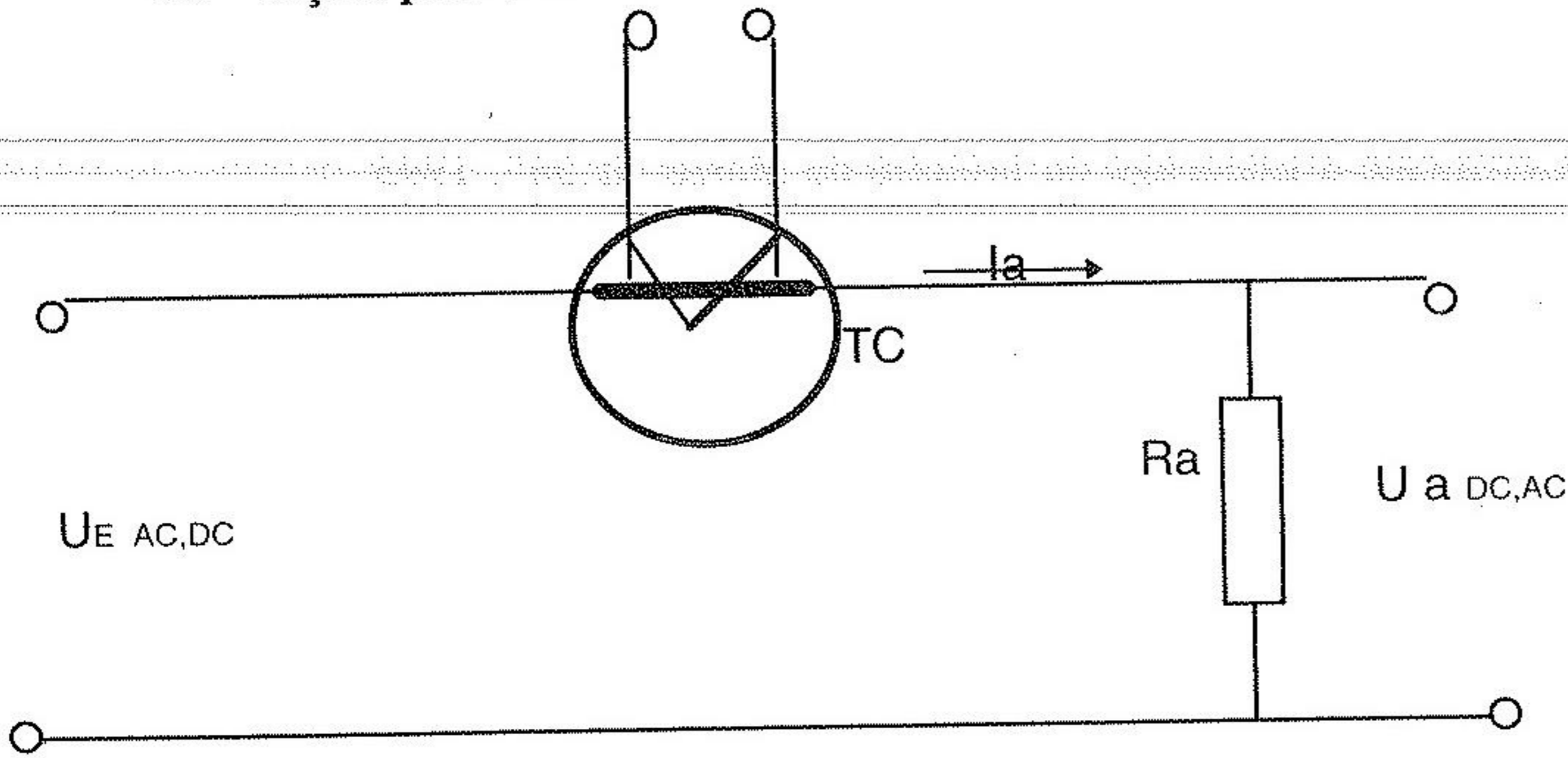
mV GENLİKLİ AC GERİLİM KALİBRASYON METODLARI

1. İndüktif Gerilim Bölücü Metodu
2. Yükselmeç Metodu
3. Mikropotansiyometre Metodu (μ Pot)
4. Çok Katlı Termokonverter Metodu (MJTC)

Tebliğde son iki metod hakkında çok fazla detaya girmeden kısa bilgiler sunulacaktır.

2. MİKROPOTANSİYOMETRE METODU (μ Pot)

2.1 Ölçme prensibi



Şekil 2.1 μ Potansiyometre ölçme prensibi

Mikropotansiyometre metodu, prensip olarak frekansbağımlılığı en aza indirgenmiş bir sonlandırma direnci R_a ve Vakum içerisinde çalışan basit yapıları bir Termokon-verter (TC) den oluşmuştur.

Bu noktada termokonverter(TC) 'in çalışma prensibini kısaca açıklamakta fayda vardır.

Termokonverter, bir ısıtıcı direnç ve bu dirence termik olarak irtibatlandırılmış termokupl'dan oluşmuştur. Isıtıcı direnç önce DC gerilimle ısıtılarak, termokupl uçlarından termik bir gerilim elde edilir($U_{th, dc}$). Daha sonra aynı ısıtıcı AC bir gerilimle ısıtılarak, DC gerilimin oluşturduğu termik gerilime eşdeğer termo gerilim ($U_{th, ac}$) elde edilir. Yani DC gerilim kadar iş yapan bir AC gerilim Termokonverter uçlarına tatbik edilmiş olur. Bu durumda,

$$U_{th, dc} = U_{th, ac} \quad (1)$$

olacak ve uygulanan AC gerilimin efektif değeri;

$$U_{ac, rms} = U_{dc} \text{ olacaktır.} \quad (2)$$

Şekil-2.1 de ise TC'in küçük genlikli AC gerilimler için yapılan değişik bir uygulama görülmektedir. Bu sistemde kullanılan TC'in ısıtma direnci ve R_a sonlandırma direnci küçük genlikli gerilimlerin sağlayacağı akımın da küçük olacağı düşünülerek mümkün olduğunca küçük seçilmelidir. Ölçme sistemindeki temel yaklaşım U_a çıkış geriliminin, Termogerilimin U_{th} nın bir fonksiyonu olarak düşünülmüş olmasıdır.

$$U_a = f(U_{th}) \quad (3)$$

Tabiidir ki, U_{th} geriliminin kaynağı, TC'in ısıtıcı direncinden geçen akımdır.

$$U_{th} = f(U_a)_{AC} = f(U_a)_{DC} \quad (4)$$

Şartını sağlamak için, μ Potansiyometrenin giriş gerilimi önce Stabil DC gerilim kaynağına, ardından stabil gerilim kaynağına AC anahtarlanır. Dolayısıyla çıkış direnci R_a üzerinde elde edilen AC gerilim, DC gerilime izlenebilir hale getirilmiş olur. Çıkış gerilimini, akım cinsinden ifade edersek;

$$U_a (AC) = I_a (AC) * R_a \quad (5)$$

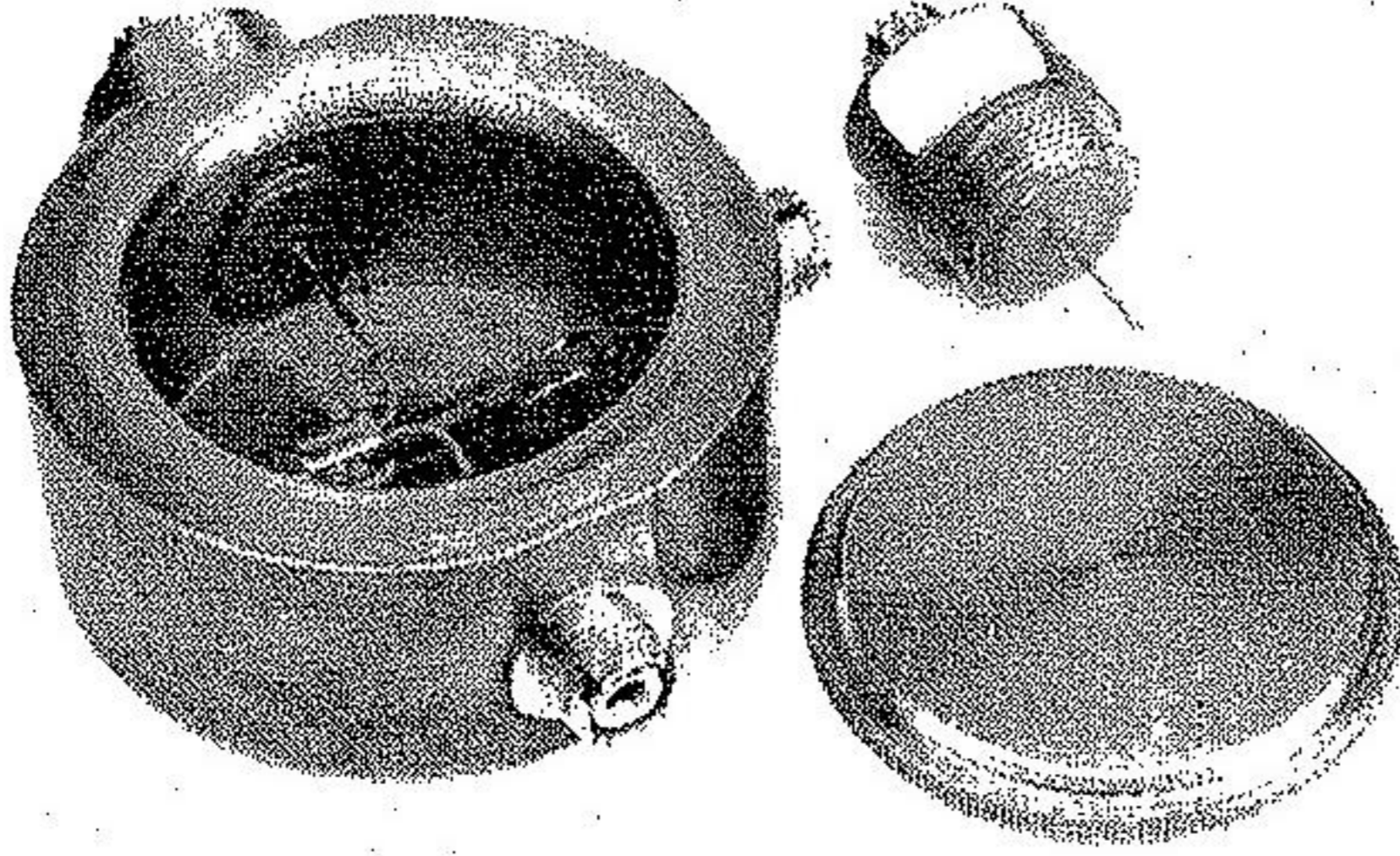
$$U_a (DC) = I_a (DC) * R_a \quad (6)$$

ilişkisi elde edilmiş olur.

Bu ölçme sisteminde R_a çıkış direnci, frekans ilişkisi dikkate alınarak yassı ve yüzeysel şekilde imal edilmiş olup (Teltow- Germany), bir yüzeyi Nikel kaplanmış çok küçük sıcaklık katsayısına sahiptir. R_a direnci ile TC aynı metal bir muhafaza içerisine yerleştirilerek, ölçme işlemindeki iletim ve bağlantıdan oluşan etkiler minimize edilmeye çalışılmıştır.

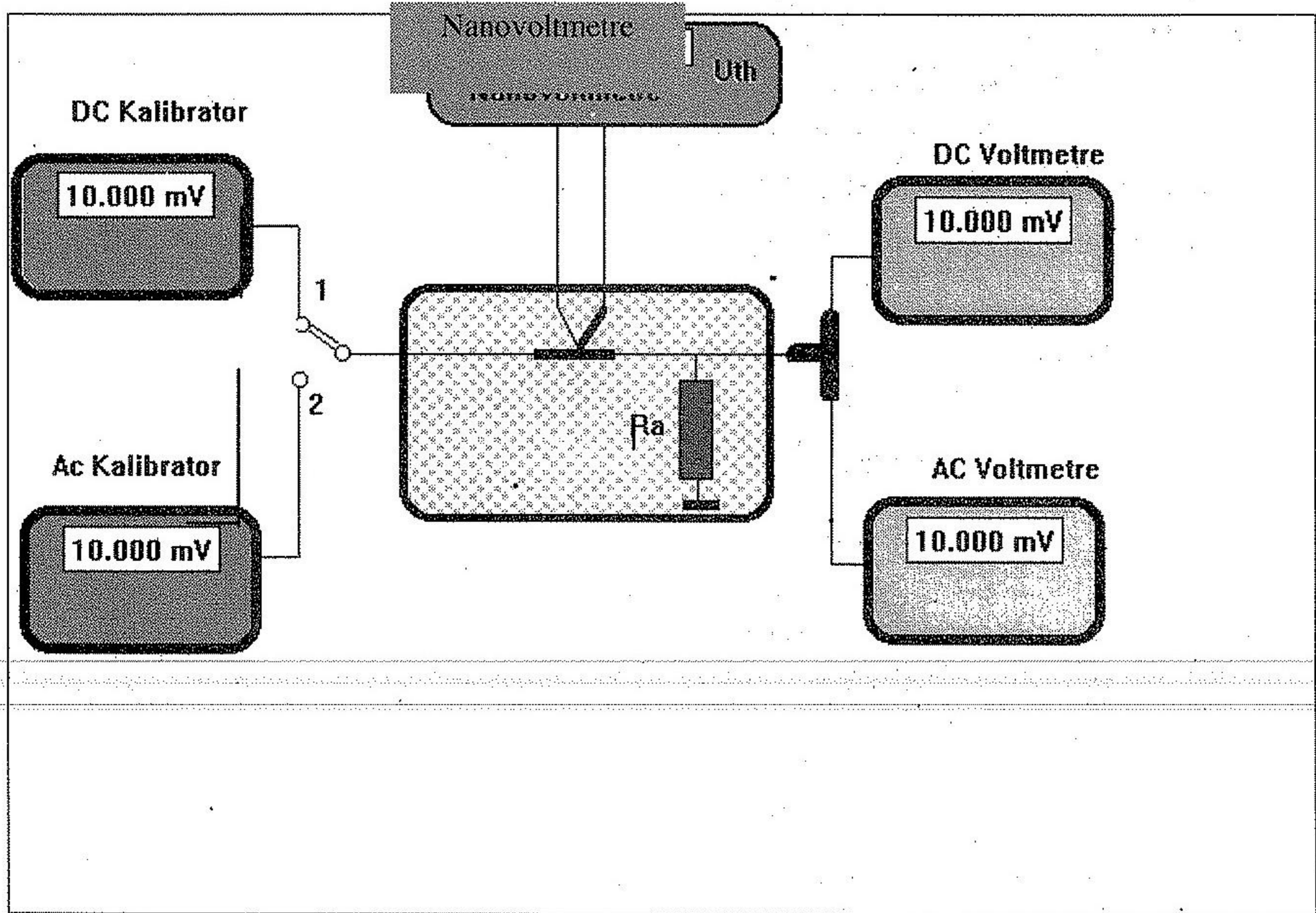
Çıkış direnci ile TC 'in çok yakın olması, elbetteki TC'den elde edilecek U_{th} gerilimini etkilemesi mümkündür ve bu mahsurun giderilmesi amacıyla R_a direnci seramik bir yuva içerisine yerleştirilmiştir.

Bu amaçla oluşturulmuş bir TC Şekil-2.2 de görülmektedir.



Şekil-2.2 μ Potansiyometre

2.2 Ölçme Devresi Blok Şeması



Şekil 2.3 Ölçme devresi blok şeması

2.2.2 Ölçme Basamakları

a) Stabil DC Gerilim kaynağı (+) ve (-) yönlü mikropotansiyometreye uygulanarak DC gerilimin (akımın) oluşturduğu termo gerilim u_{TH} tespit edilir.

$$u_{TH} = (u_{TH}^+ + u_{TH}^-) / 2 \quad (7)$$

Bu formülde u_{TH}^+ : (+) yönlü DC gerilimin oluşturduğu termogerilimdir.

u_{TH}^- : (-) yönlü DC gerilimin oluşturduğu termogerilimdir.

Böylelikle DC gerilim (akım) etkisiyle oluşan termogerilim ölçülmüş olur.

b) Mikropotansiyometreye bu kez DC gerilimde elde edilen U_{TH} elde edecek şekilde AC gerilim uygulanır. Burada elde edilen AC gerilim;

$$U_{AC} = U_{DC} (1 + \delta_{f\mu P} + \delta_{fze}) \quad (8)$$

şeklinde tanımlanır.

Burada ;

$\delta_{f\mu P}$: Çalışılan frekansdaki AC-DC transfer farkıdır.

δ_{fze} : AC gerilimi ölçen ölçme devresindeki voltmetre, iletkenler ve terminalin oluşturduğu empedans farkıdır.

2.4. AC-DC Transfer Farkının Tespiti

Bir TC için (AC-DC) transfer farkı

$$\delta_f = (U_{AC} - U_{DC}) / U_{DC} \quad (9)$$

olarak tanımlanır.

Bu farkın sebebi; kullanılan TC yapısından ve ve kullanım şeklinden kaynaklanır. Bir termokonverterden elde edilecek termogerilim (U_{TH}), AC gerilim uygulamasında, DC uygulamadan daha büyük olacaktır.

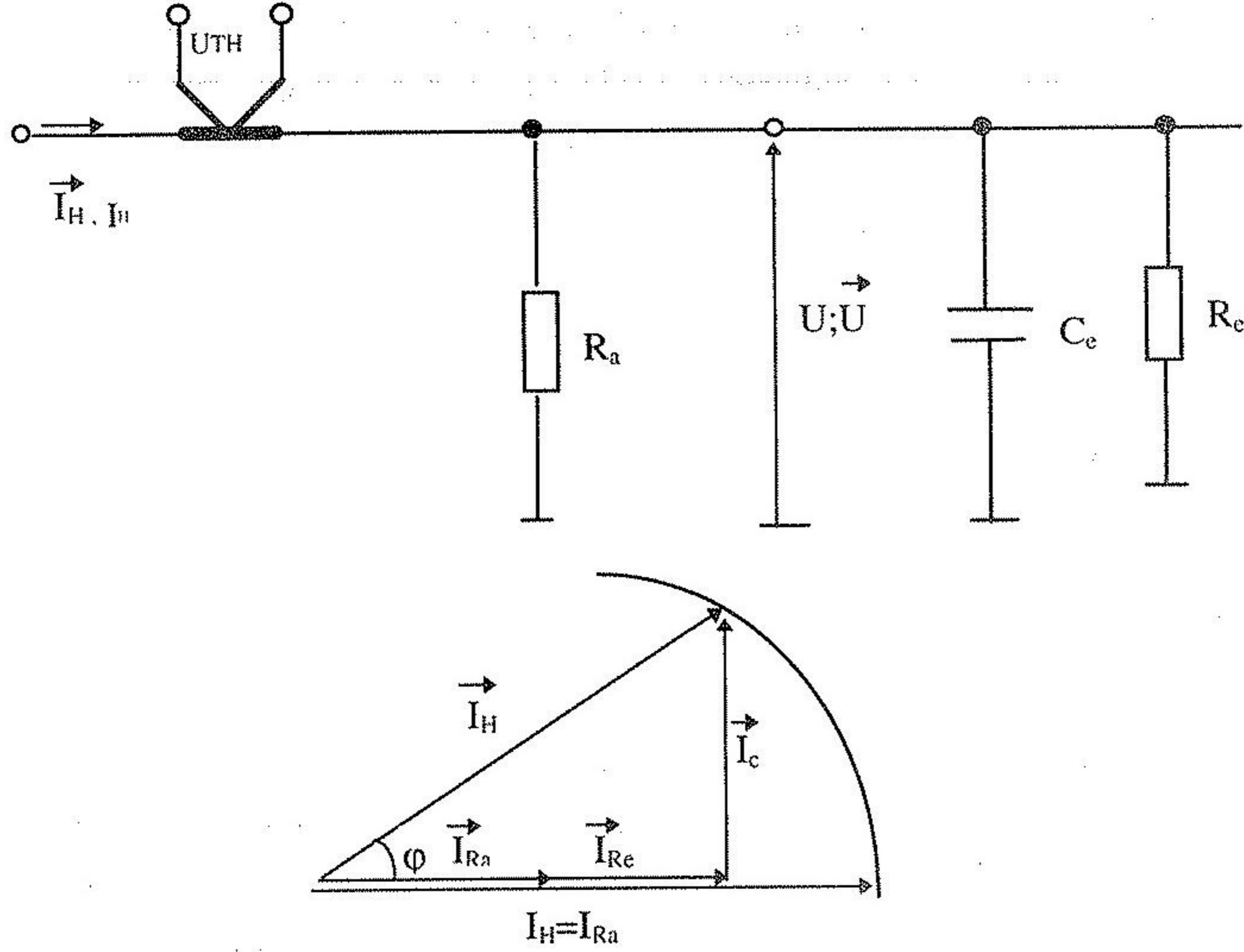
μ Potansiyometrenin transfer farkının ölçülmesi çok katlı Termokonverter yardımıyla kademeli olarak ve her frekans ve gerilim kademeli olarak azaltılarak yapılır. Birinci aşamada 100mV'luk çok katlı termokonverter (MJTC), μ Potansiyometre ile direkt karşılaştırılır.

Örnek :

μ Pot	U ölçülen değer değer	$\delta_{f\mu Pot}$	$\delta_{ftransfercihazı}$ (referans)
100 mV	100 mV	$\delta_{f100\mu Pot}$	δ_{100mV} (MJTC)
100 mV	50 mV	$\delta_{f100\mu Pot}$	δ_{50mV}
50 mV	50 mV	$\delta_{f50\mu Pot}$	
50 mV	20 mV	$\delta_{f50\mu Pot}$	δ_{20mV}
20 mV	20 mV	$\delta_{f20\mu Pot}$	

2.5 Ölçmeye Etki Eden Faktörler

2.5.1 Yük Etkisi



Şekil 2.4 Mikropotansiyometrede yük etkisi ve eşdeğer devresi

$$R_e \gg R_a$$

u_{TH} : I_H tarafından oluşturulur.

$$\delta_{I_{Zc}} = \frac{U_{Ra} - U_{Ra}}{U_{Ra}} = \frac{I_{Ra} - I_H}{I_H}$$

$$I_{Ra} = I_H \cos \varphi \frac{1}{1 + \frac{R_a}{R_e}}$$

φ = Faz açısı

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{I_c}{I_{Ra} + I_{Re}} = \text{tg}^{-1} \frac{\omega C_e R_e R_a}{R_e + R_a} \quad \text{olacaktır.}$$

Böylece çıkış eşitliğinden hareketle AC-çıkış geriliminde DC-çıkış gerilimine göre relatif bir kayma olacaktır. Bu kaymayı, δ_{rZe} ile gösterirsek;

$$\delta_{rZe} = \cos\phi \left(1 - \frac{R_a}{R_e}\right) - 1 \quad \phi \text{'nin değerini yerine koyarsak,}$$

$$\delta_{rZe} = \frac{\cos(\tan^{-1} \frac{\omega C_e R_e R_a}{R_e + R_a})}{R_e + R_a}$$

şeklinde ifade edebileceğiz demektir. Trigonometrik fonksiyonların özelliklerini kullanarak bu ifadeyi biraz modifiye edebiliriz.

$$\delta_{rZe} = 1 - \sqrt{1 - (R_a / R_e)^2 + 2(R_a / R_e) + \omega^2 C_e^2 R_a^2}$$

Bu iki eşitlik de yük etkisinin oluşturduğu δ_{rZe} 'nin çok küçük kaldığını göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli konu, tabii ki, R_a 'yı mümkün olduğunca küçük seçebilmektir ki AC-DC konverterdeki akım etkisi maksimum olabilsin.

Tablo -1'de Yük etkisinin (C_e / R_e) oluşturduğu fark görülmektedir.

Frekans f (kHz)	Um=100 ve 50 mV μPot-Ra			Um= 20 mV μPot-Ra				Um= 10 mV μPot-Ra		
	10.7Ω	6.8 Ω	3.4 Ω	6.8 Ω	3.4 Ω	2Ω	1 Ω	2Ω	1Ω	0.5 Ω
200	27	17	8	-	-	-	-	-	-	-
500	55	34	17	10	5	-	-	-	-	-
700	143	91	46	34	17	11	5	11	5	3
1000	249	158	78	107	54	33	16	26	13	7

Tablo -2.1 Yük etkisinden (C_e/R_e) oluşan doğrultma faktörleri ($*10^{-6}$)

2.5.2 Etkileyici Diğer Faktörler (belirsizlik yönünden)

1. Bağlantı elemanlarının mümkün olduğunca kısa tutulması
(≤ 10 cm; 1 Mhz'e kadar frekans etkisi ihmal edilebilir.)

2. μPot ile AC Voltmetre arasındaki mesafe
(skineffect etkisi)

3. DC Voltmetrenin hassasiyeti

4. AC ve DC kalibratorün kararsızlığı

5. Termal kararlılık.

2.6 Belirsizlik

Küçük genlikli AC gerilim kalibrasyonunda μ potansiyometre metodu kullanılması durumunda ; belirsizlik kaynaklarını şöyle sıralayabiliriz.

1. μ Potansiyometrenin DC giriş gerilimi uygulanması ve AC-DC transferi sırasındaki termogerilimin belirlenmesinde oluşan belirsizlik (Korelasyon belirsizliği)
2. Ra sonlandırma direncinin AC ve DC değerinin belirlenmesi sırasında oluşan belirsizlik.
3. AC voltmetrenin giriş empedansının tesbitinde oluşan belirsizlik.
4. μ Potansiyometrenin AC-DC transfer farkının belirlenmesindeki belirsizlik
5. μ Potansiyometrenin direkt karşılaştırılmasından sonra, kademeli olarak daha küçük gerilimler için yapılan μ Potansiyometrenin AC-DC transfer farkının tesbitinde oluşan belirsizlikler.

Tablo-2.2 'de farklı genlikler ve farklı frekanslar için μ Potansiyometre için belirsizlikler özetlenmiştir.

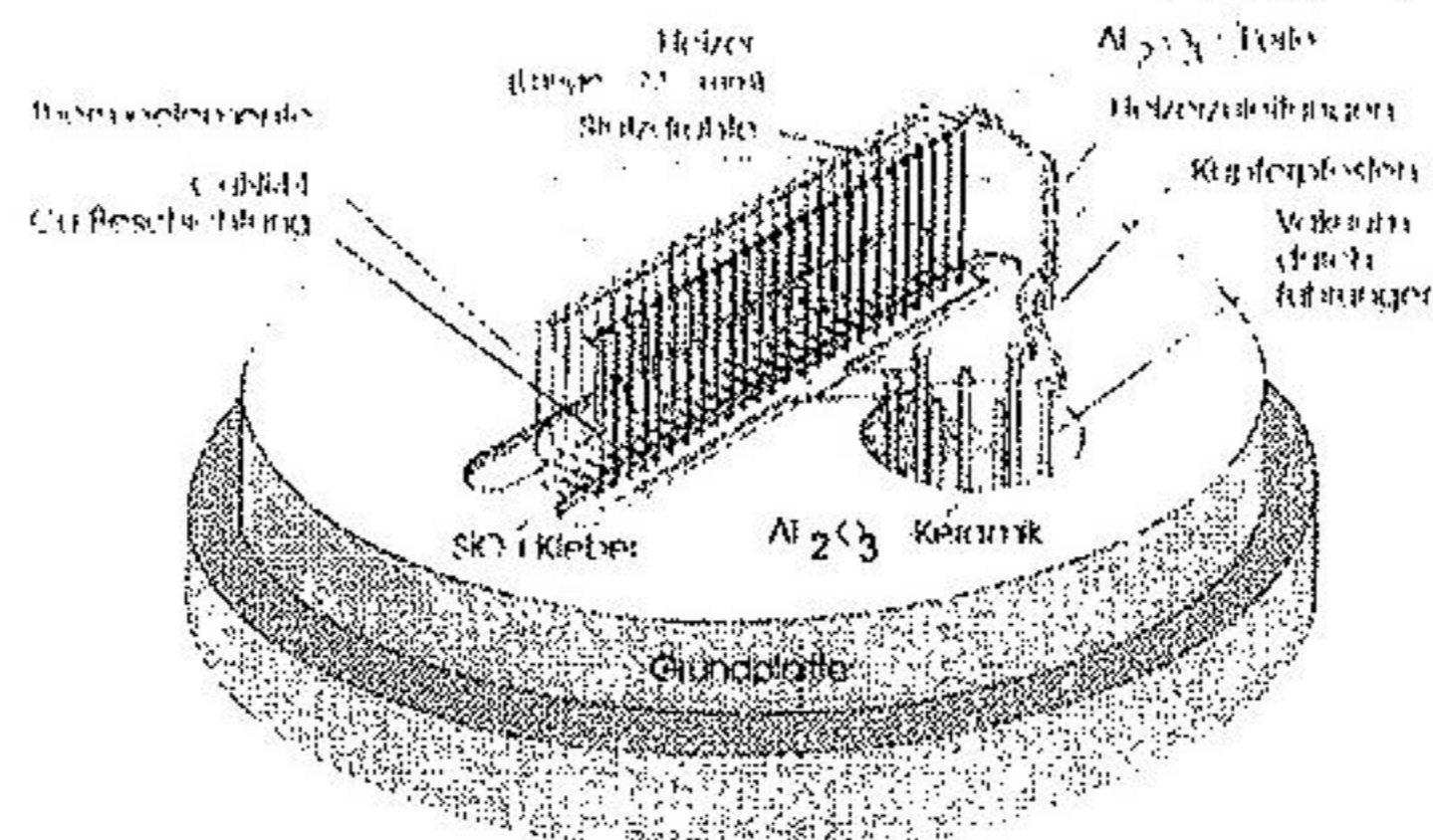
Genlik (mV)	10 Hz	20 Hz-100 kHz	200 kHz	500 kHz	700 kHz	1 MHz
10	100	80	100	150	200	250
20	100	70	80	90	100	150
50	100	50	60	70	80	130
100	100	25	30	50	70	120
200	100	25	30	50	70	120

Tablo-2.2 : μ Potansiyometrenin AC-DC transfer farkının belirlenmesindeki belirsizlik değerleri (* 10^{-6}) (k=2)

3. ÇOK KATLI TERMOKONVERTER METODU

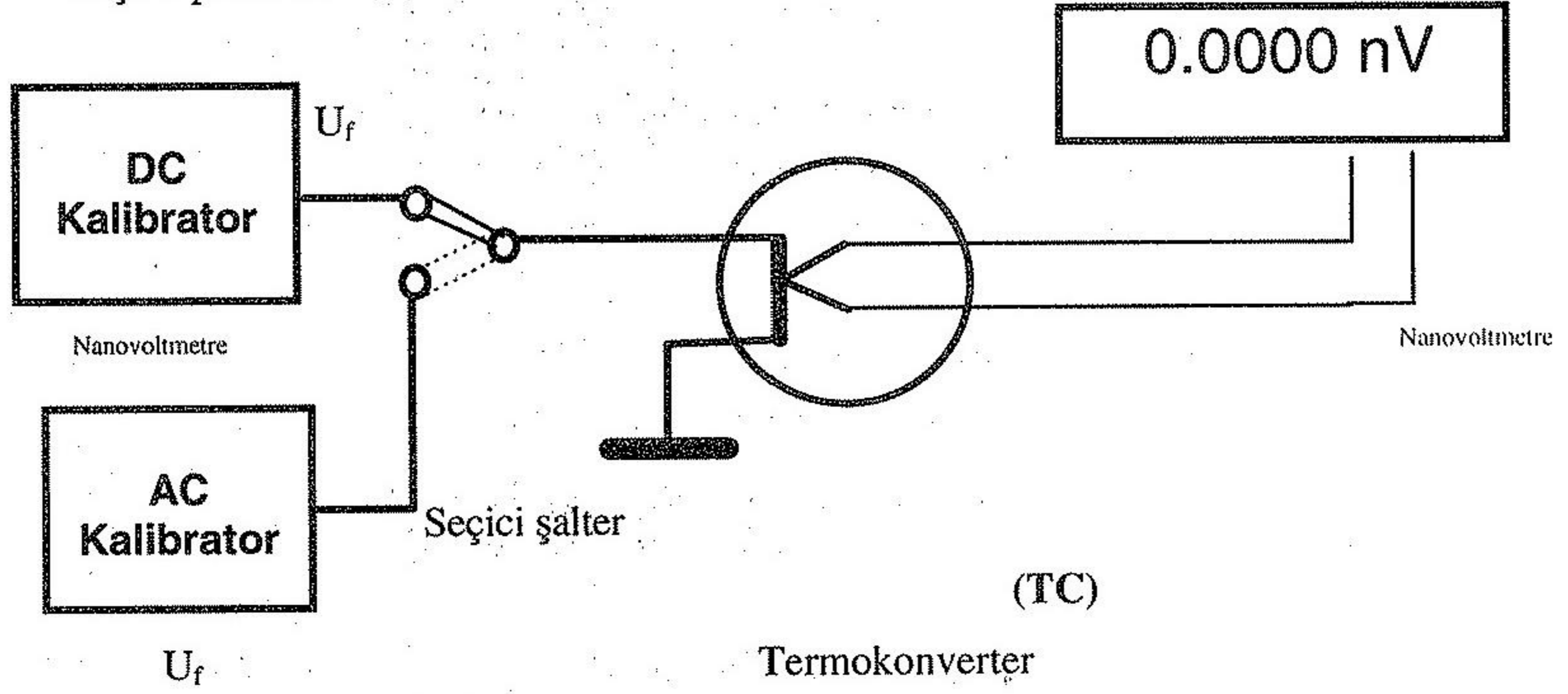
Diğer metodlardaki elde edilebilen ölçme belirsizliğini dahada küçültebilmek ve ölçmesistemini biraz daha basitleştirmek maksadı ile çok katlı termokonverter metodugünümüzde ulaşılabilmiş en iyi metodlar arasında zikredilmektedir.

Bu amaçla klasik AC-DC transfer standardında bazı geliştirmeler yapılmış olup, 3 Boyutlu çok katlı TC geliştirilmiştir.



3.1 AC-DC Kalibrasyonda Termokonverter (TC) Teorisi

Ölçme prensibi.



Şekil-3.1 AC-DC Transfer Farkı Ölçme Prensibi

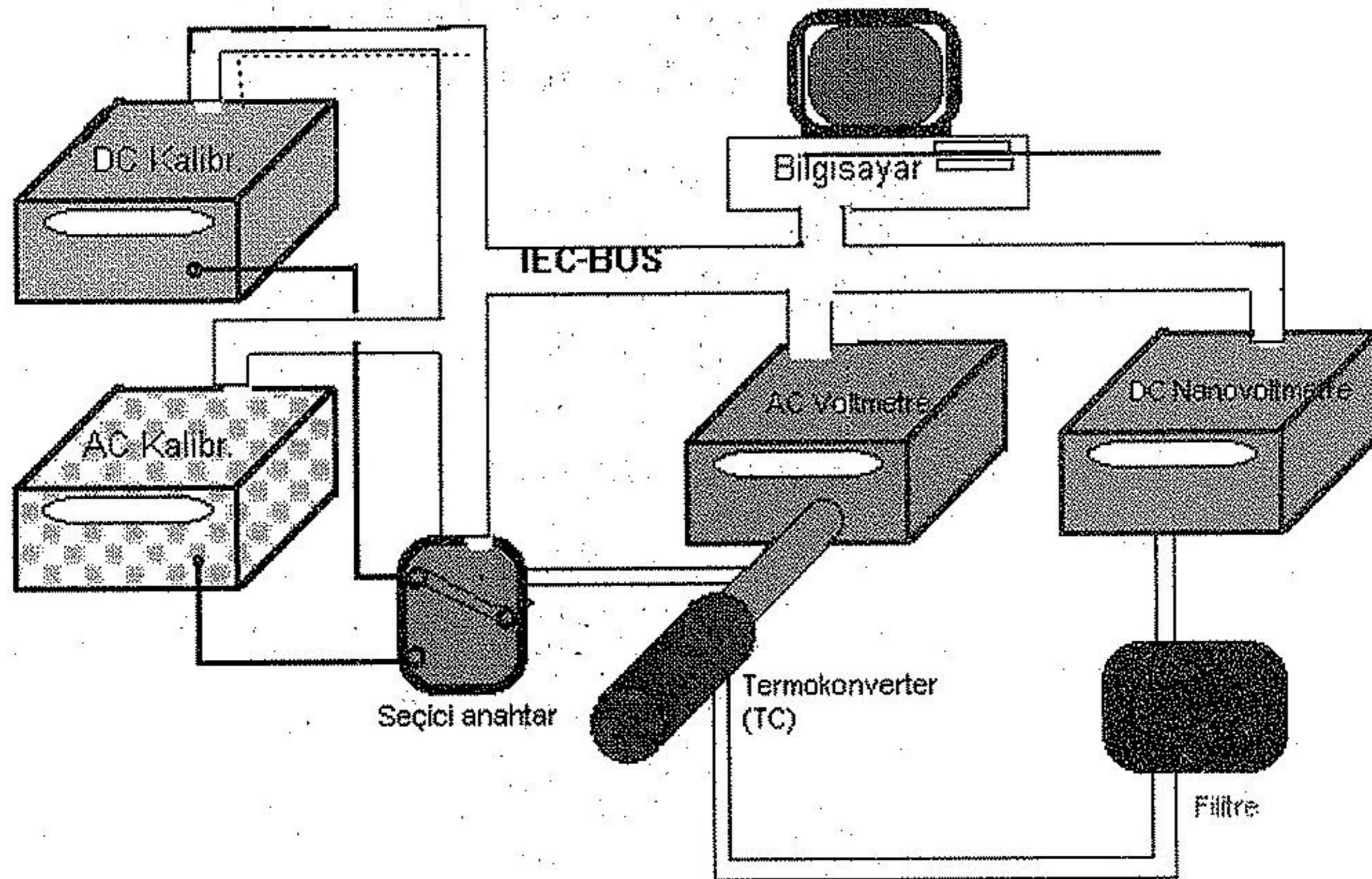
$$U_f = U_o(1 + \delta) \Big|_{U_{af}=U_{ao}}$$

3.2. TC yardımıyla otomatik kalibrasyonu

Otomatik bir ölçme standında AC-Gerilimölçer cihazın relativ sapması o cihazın gösterge değeri U_A ile termokonverterle ölçülen değer (U_f) arasındaki farkının oranı olarak tarif edilir.

$$\Delta = \frac{U_A - U_f}{U_f}$$

Burada bahse konu otomatize ölçme devresini aşağıdaki gibi şematize edebiliriz.



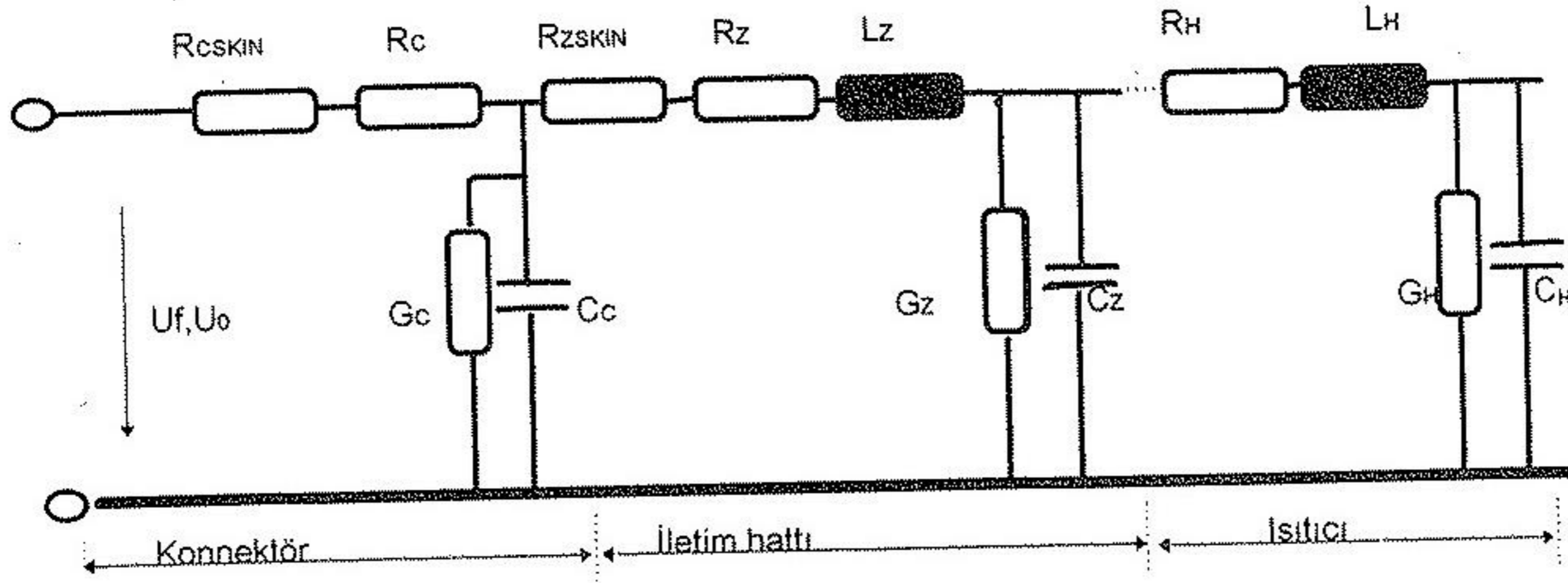
Şekil -3.2 Otomatize edilmiş AC-DC Transfer / Kalibrasyonu blok şeması

Bu ölçme sisteminin üstünlükleri:

- Basit ve kolay gerçekleştirilen ölçme devresi,
- Daha yüksek standard gerilimleri üzerinden termokonverter yardımıyla transfer farkının ölçülmesi,
- Çok düşük elektromagnetik bozulma,
- Ölçülen cihazın, iletim sistemi empedansından bağımsızlığı.

3.3. 3-Boyutlu Çok Katlı Termokonverter

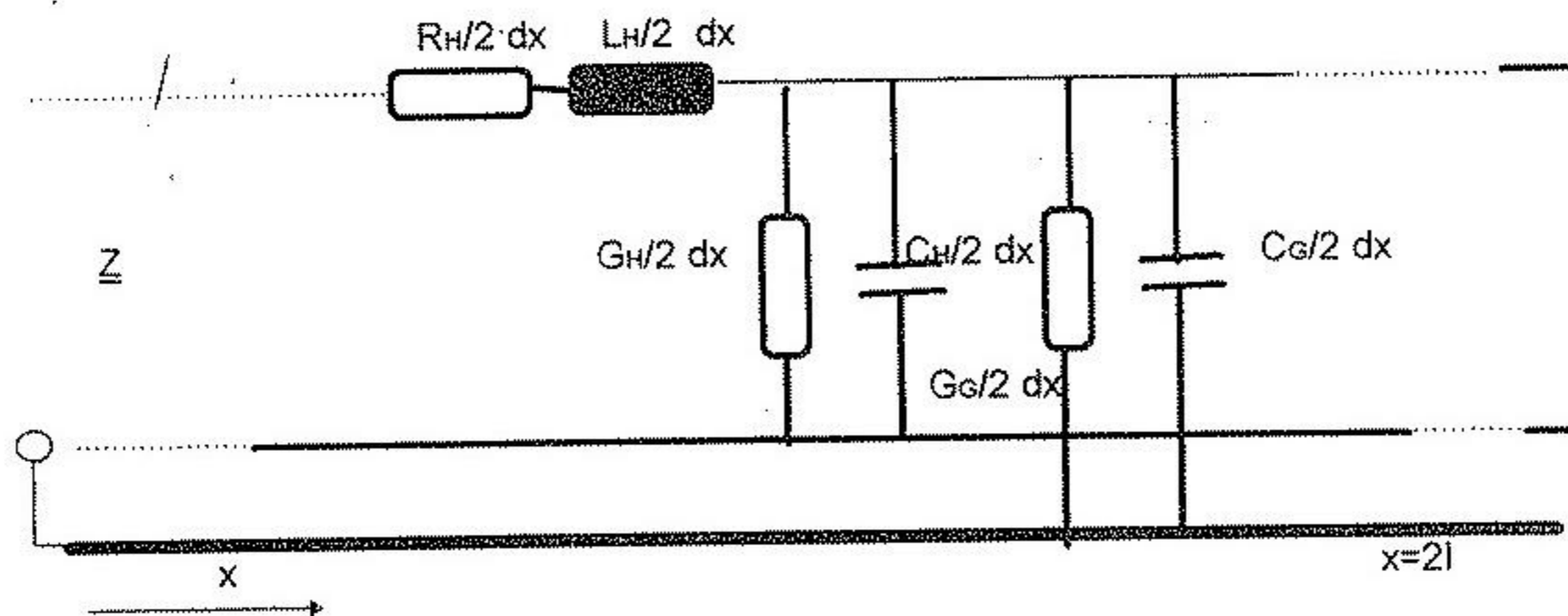
Üç boyutlu çok katlı TC'nin genel transfer farkı, 1 kHz civarında esas olarak ısıtııcıdan kaynaklanır. Bu fark çok katlı üç boyutlu termokonverter konstruksiyonunda 0.1×10^{-6} oranına kadar indirgenmiştir. Çok katlı üç boyutlu TC'deki transfer farkının 10 kHz-1MHz arasındaki farklı ısıtıcı dirençlerle elde edilmiş sonuçlarını göstermektedir. Bu frekans aralığındaki transfer standardının induktif ve kapasitif etkisi, kayıp faktörü dikkate alınarak teorik olarak frekans davranışı hesaplanmış 700Ω çok katlı Tkonverter olup ölçme devresindeki kullanılan iletim hatlarının, bağlantı elemanlarında gözönüne alınarak oluşturulan teorik eşdeğer şeması şekil 5'te verilmiştir.



Şekil-5 AC-DC Transfer standardının ve iletim hatları ve konnektör eşdeğer şeması

Bu devre modifiye edilirse gerilim transfer farkı δ_u ısıtııcının giriş empedansı Z olarak elde edilebilir. Isıtıcı empedansı ise tahmini olarak verilebilir.

ŞEKİL -6 Isıtıcı ve muhafazasının kapasitesinden oluşan kompleks giriş empedansı eşdeğer devresi



ŞEKİL -6 Isıtıcı ve muhafazasının kapasitesinden oluşan kompleks giriş empedansı eşdeğer devresi

İletim hatlarının ve konnektörlerin empedansı Bild 7’de modifiye edilmiştir.
 AC-DC Konverterin İsticısının Giriş Kompleks Empedansı

$$\delta_u = \frac{U_f - U_o}{U_o}$$

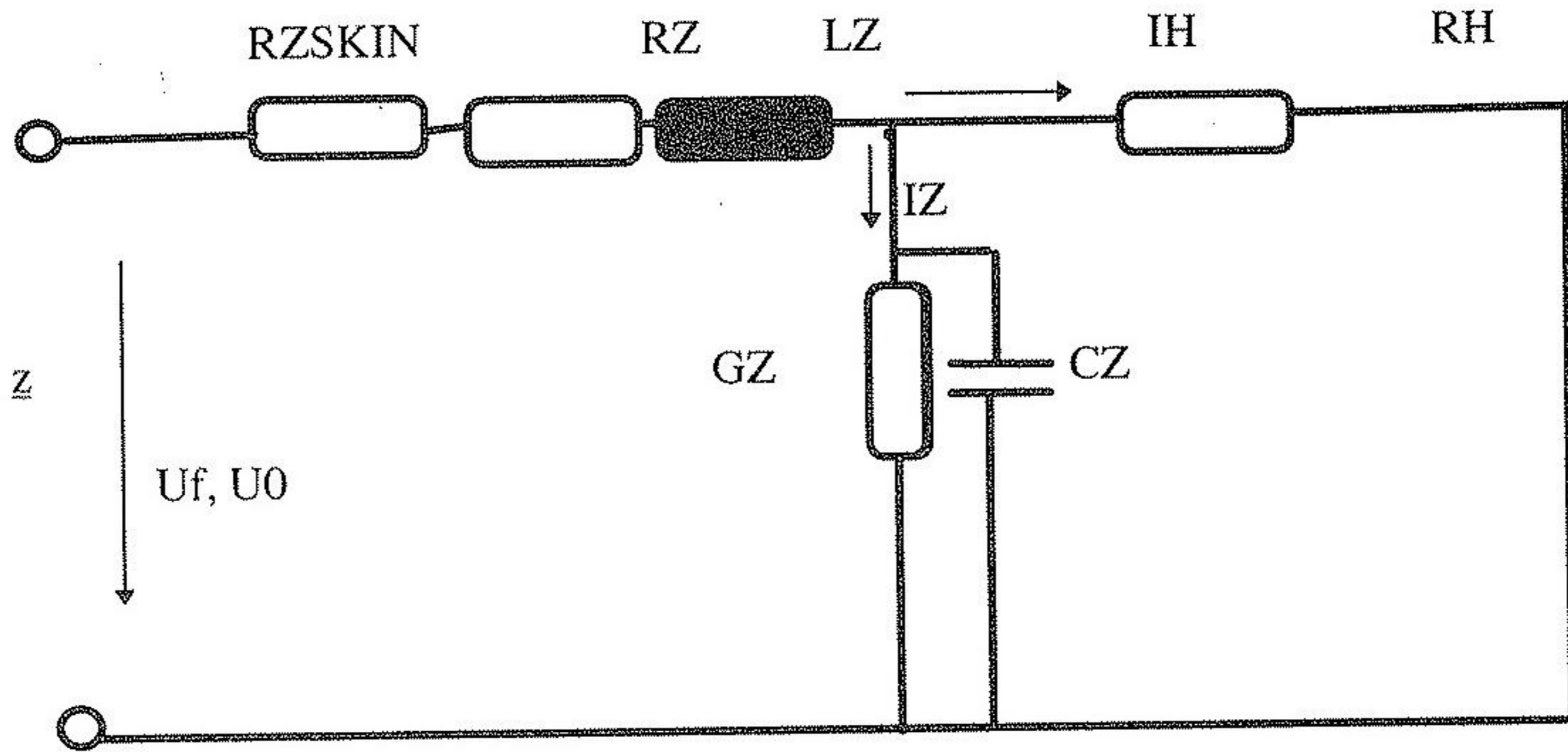
$$\frac{U_f^2}{|Z|^2} \times R_e(Z) = \frac{U_o^2}{R_o}$$

$$\delta_u = \frac{|Z|}{\sqrt{R_o R_e\{Z\}}} - 1$$

Kompleks giriş empedansı \underline{Z}

$$\underline{Z} = R \left[1 - \frac{1}{3} RG + \frac{2}{3} \omega^2 LC - \frac{2}{15} \omega^2 R^2 C^2 + j\omega \left(\frac{L}{R} - \frac{1}{3} CR \right) \right]$$

$$\delta_u = -\frac{1}{6} RG - \frac{1}{90} \omega^2 R^2 C^2 + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 L^2}{R^2}$$



$$\delta_u = \frac{U_f}{U_o} - 1 = \frac{|Z| \times |1 + R_H(G_Z + j\omega C_Z)|}{R_Z + R_H} - 1$$

$$\delta_u \approx 2G_Z R_Z + \omega^2 C_Z^2 R_H R_Z + \frac{1}{2} \left[\frac{\omega L_Z}{R_H + R_Z} \right]^2$$

İletkenlerin skineffektinden kaynaklanan transfer farkı ;

$$\delta_U = \frac{R_o + \Delta R}{R_o} - 1 = \frac{\Delta R_{skin}}{R_o}$$

$$R_0 = R_H + R_Z \quad (f=0 \text{ Hz})$$

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{1}{48} r^4 (\pi f \kappa \mu)^2$$

r: İletken çapı

κ :öz iletkenlik

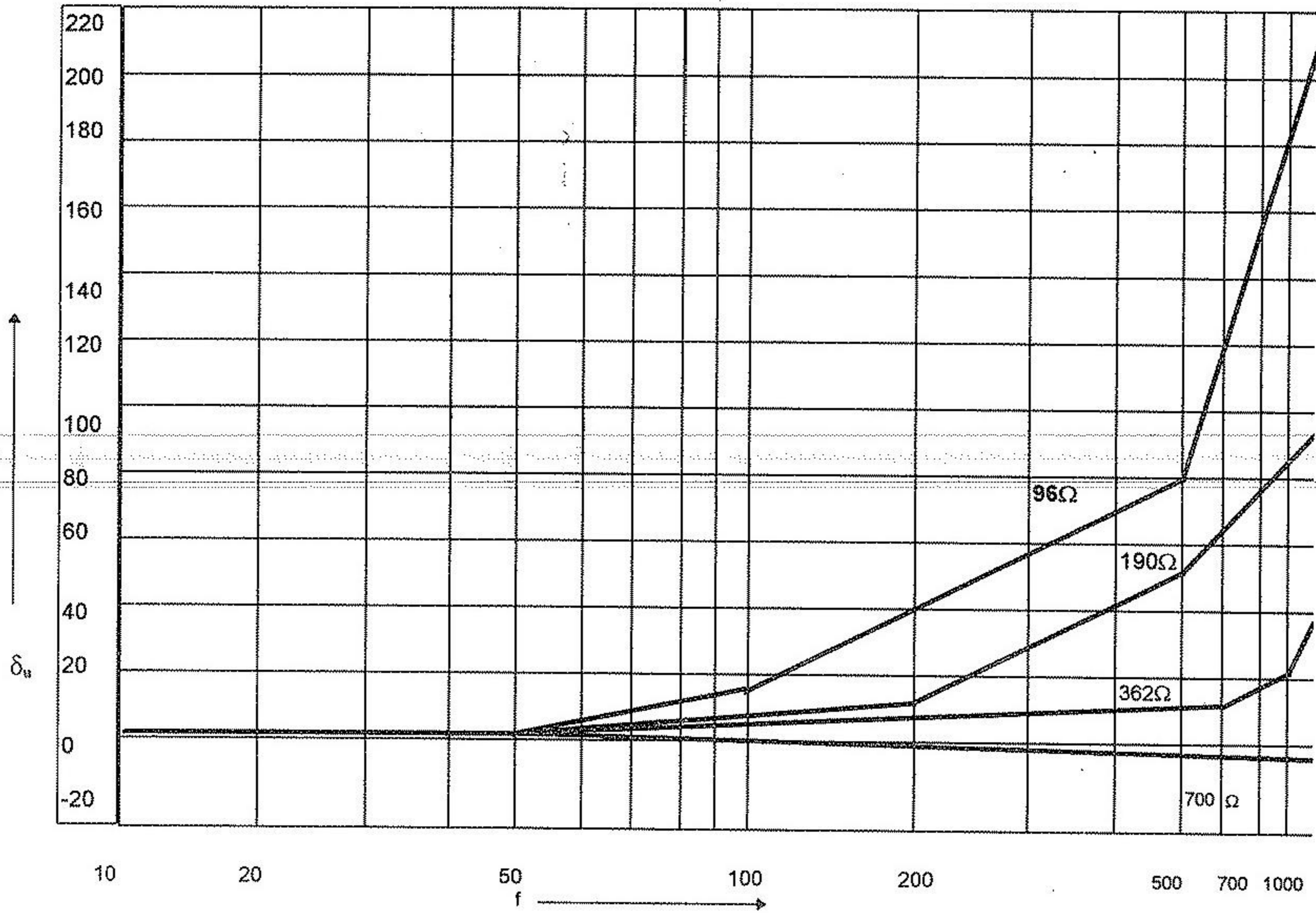
μ :permeablite

f: Ölçme frekansı

Buraya kadar incelenen üç boyutlu çok katlı TC ile AC- DC transfer farkının belirlenmesindeki belirsizlik 100kHz ,190 Ω luk ısıtıcı direnci ile tüm etkiler kapsayacak şekilde

$0,5 \cdot 10^{-6}$, 1MHzde ise 700 Ω ısıtıcı direncinde ise $10 \cdot 10^{-6}$ ya kadar çıkmaktadır.

Şekil -8 farklı ısıtma dirençlerle oluşturulmuş AC-DC transfer standardının frekans davranışlarını göstermektedir.



Şekil- 8 Farklı ısıtma dirençlerine sahip TK'in frekansa bağlı transfer farkı değişimi

Şekilde görüldüğü gibi 1MHz civarında transfer farkının küçültülmesi için ısıtıcı direncinin büyük tutulması gerekmektedir. Bu ise küçük genlikli AC gerilimlerin ölçülmesinde çelişkidir. Zira direnci büyütmek, küçük genlikli gerilimler için daha küçük akım demek olup, elde edilecek termogerilimin ölçülebilirlik niteliğini tehlikeye düşürür ve çok büyük ölçme hataları ortaya çıkar.

Diğer taraftan direncin küçültülmesi ise Skineffekt ve konnektörlerden kaynaklanan bozulmaların etkisi çok büyük sapmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle 100 Ω 'un altındaki dirençlerle çalışmak konstrüksiyon, hem de ölçme belirsizliği açısından güvenilir bulunmamaktadır.

Üç boyutlu çok katlı termo konverterlerle yapılan çalışmalarda 100 Ω 'luk bir ısıtıcı dirence sahip TK ile ulaşılabilen en iyi transfer farkı $200 \cdot 10^{-6}$ olabilmektedir. Bu fark hassasiyeti çok iyi olan yeni genarasyon cihazlar için büyüktür.

Bütün bu nedenlerle küçük genlikli AC-DC transferinde en modern teknolojiler kullanılarak bazı denemeler yapılmakta ve günümüzde ticari olarak kullanıma sunulmaktadır.

Bunlardan en önemlisi "YÜZEYSEL ÇOK KATLI TERMOKONVERTER" olup bugün bir çok milli metroloji enstitüsü tarafından üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Almanya PTB, İngiltere NPL, İsviçre SP 'de yapılan araştırmalarda vakum içerisinde gerçekleştirilen TK'ler de 9 Ω ısıtıcı direnc kullanılmakta ve 100 mV 'da 1Mhz frekansda $100 \cdot 10^{-6}$, 10 mV, 1Mhz'de ise $150 \cdot 10^{-6}$ ya kadar varan transfer farkına ulaşılabilmektedir.

SONUÇ

Başlangıçta belirttiğimiz üzere günümüzde yüksek teknoloji üretimi ve kullanımı gelişmenin ve endüstrileşmenin temel şartlarından birisidir. Yüksek teknoloji kullanımı ise her şeyden önce ülkemizin acil ihtiyacı olarak önümüzde durmaktadır. Bu bildiride sadece bir konuda yapılan ve bize ulaşan bazı bilgilerden çok özet bir bilgi sunulmuş olup, gelecekte millet olarak bu yarışa her sahada iştirak edebilecek kurumlara ve yetişmiş insan gücüne ulaşabilmemiz dileği ile saygılar sunarım.