

Hesaplanabilir AC Direnç Standardının 5 MHz'e Kadar Modellenmesi ve Üretilmesi

Modelling and Development of Calculable AC Resistor Standard Up To 5 MHz

Mehmet ÇINAR¹, Arif DOLMA², Yakup GÜLMEZ¹, Handan SAKARYA¹, Ömer ERKAN¹,
Murat CELEP¹

¹ TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)

mehmetci@ume.tubitak.gov.tr, yakupg@ume.tubitak.gov.tr, handans@ume.tubitak.gov.tr, omer.erkan@ume.tubitak.gov.tr,
murat.celep@ume.tubitak.gov.tr

² Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Kocaeli Üniversitesi (KOÜ)

adolma@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, AC direnç kalibrasyonları için uluslararası alanda birincil seviye standart olarak kullanılan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının üretilmesi amaçlanmıştır. 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının matematiksel modellenmesi Matlab® programı kullanılarak 5 MHz'e kadar yapılmıştır. Matematiksel modelleme kullanılarak 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin geometrik boyutları belirlenmiş ve hesaplanabilir AC direncin üretimi gerçekleştirilmiştir. Hesaplanabilir AC dirence DC akım uygulanarak direncin kararlılığına etki eden hataların belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının DC akım uygulanarak yapılan ölçümleri, TÜBİTAK UME'de kurulu Quantum-Hall sistemine izlenebilir olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen hesaplanabilir AC dirence, DC akım uygulanarak yapılan ölçümler sonucunda 1 ppm/gün kararlılık değeri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hesaplanabilir AC direnç, İzlenebilirlik, Kararlılık, Metroloji

Abstract

In this study, it is aimed to fabricate 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard used as primary level reference AC resistance standard internationally. Mathematical modeling of 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard is performed in Matlab® program up to 5 MHz. Geometrical dimensions of 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard is determined using the mathematical modeling and fabricated according to the geometrical dimensions defined in the mathematical modelling. Experimental studies are performed to define the parameters affecting the stability of the resistance standard by applying a DC current onto the

resistance standard. DC resistance measurements of 1000 Ω bifilar type AC calculable resistance standard are traceable to the Quantum-Hall resistance installed in TÜBİTAK UME (National Metrology Institute of Turkey). It is found that the stability of 1000 Ω bifilar type AC resistance standard is 1 ppm/day as a result of DC measurements.

Keywords: Calculable AC Resistance, Traceability, Stability, Metrology

1. Giriş

Değeri geometrik boyutları kullanılarak hesaplanabilen dirence hesaplanabilir AC direnç denir ve en basit şekilde eşitlik (1)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [1, 2].

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} \quad (1)$$

Burada, R direnç (Ω), L indüktans (H), C kapasitans (F) ve ω açıl frekans (rad/s)'tır.

R, L ve C parametreleri frekansa bağlı parametreler olduğundan frekans yükseldikçe direncin hesaplanması zorlaşır [1, 3].

Bu çalışmada, matematiksel modelleme kullanılarak 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin 5 MHz'e kadar DC-AC farkının en az olacak şekilde tasarlanması ve üretilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilecek hesaplanabilir direncin metrolojik seviyede standart olarak kullanılması hedeflenmiştir. Bu sebeple matematiksel modelde 5 kHz'de DC-AC frekans bağımlılığı bağıl olarak 10⁻⁸ ve DC akım uygulanarak yapılan ölçümleri sonucunda ppm seviyesinde kararlılıkta bir direnç tasarlamak istenmektedir. Empedans ölçüm cihazlarının daha yüksek frekanslarda ölçüm alma kabiliyetlerinin artması nedeniyle AC direnç kalibrasyonlarında yüksek frekanslarda

ölçümlere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Bu sebeple bu çalışma kapsamında 5 MHz'de hesaplanabilir AC direncin DC-AC frekans bağımlılığının seviyesinin belirlenmesi beklenmektedir.

1000 Ω Bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standartlarının geliştirilmesi için matematiksel modellemeden yararlanarak tasarımdan kaynaklı hatalar en az seviyede tutulur [1, 4]. Matematiksel modellemede, Maxwell denklemlerinden elde edilen eşitliklerin, Matlab® kullanılarak hesaplanması ile direncin geometrik boyutları belirlenmiştir [3, 4]. 1000 Ω Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin geometrik boyutları belirlenirken teller arası kapasitans, manyetik-elektrik ekran ile tel arasındaki kapasitans, telin kendi indüktansı, teller arasında oluşan indüktans, toprağa kaçak iletkenlik ve kapasitans, teller arasındaki kaçak iletkenlik ve kapasitans, deri etkisi, girdap akımlarından gelen olumsuz etkilerin değerleri en az olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Direnç telinin çapı, direnç telleri arasındaki mesafe, direnç telinin boyu, manyetik-elektrik ekranın çapı, manyetik-elektrik ekranın kalınlığı, manyetik-elektrik ekran malzemesinin özgül direnci ve direnç telinin özgül direnci tasarım parametreleri olarak alınmış ve bu değerler değiştirilerek tasarım gerçekleştirilmiştir.

Hesaplanan geometrik boyutlara göre bifilar tip hesaplanabilir AC direncin üretimi gerçekleştirilmiştir. Direnç teli olarak isaohm kullanılmıştır [6]. İsaohm direnç telinin uçları manganin direnç telinin uçları ile birleştirilmesinde kontak problemleri oluşur [7, 8]. Bu çalışmada kontak problemlerine çözüm üretmek amacıyla metanol kaynağı, nokta kaynağı, direnç telinin kaplanması ve geleneksel lehimleme yöntemleri denenmiştir [7, 8]. Bu yöntemler kullanılarak direnç telleri birleştirilmiş ve numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin kontak dirençleri, ppm (milyonda bir) seviyesinde hassasiyete sahip HP3458A model bir multimetre kullanılarak ölçüldü ve kararlılıkları izlenmiştir. Bu çalışmalar sonrası nokta kaynağı sistemi kullanılarak yapılan kontaklarda en küçük kontak direnci ve yüksek kararlılık değerleri elde edilmiştir. Bu nedenle direnç tellerinin birleştirilmesinde nokta kaynağı sisteminin kullanılarak kontakların birleştirilmesi yöntemi tercih edilmiştir. 4-terminal ölçüm noktasının tanımlandığı kontak noktalarında ise manganin ve bakır telleri kalay-gümüş-bakır alaşımli lehim kullanılarak birleştirilmiştir.

Kontakların nokta kaynağı sistemi ile birleştirilmesinden önce, birleştirilecek isaohm ve manganin direnç tellerinin uçları kimyasal malzemeler kullanılarak kirlilikten arındırılmıştır [9]. Böylece, birleştirme sırasında kirliliklerin neden olduğu olumsuz durumlar bertaraf edilerek daha iyi kontak sağlanması ve direncin kararlılığının artırılması hedeflenmiştir.

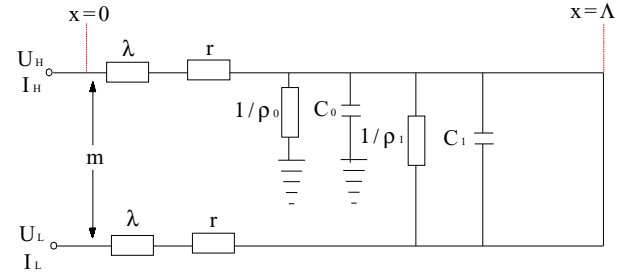
Direncin kararlılığını daha da artırmak için ısıtım işlem uygulanır. [10]. Doğru ısıtım işlem yöntemi deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir.

1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin kararlılığını belirlemek amacıyla DC akım uygulanarak ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde 0,01 ppm seviyesinde kararlılıkla ölçüm yapabilen MI6010B otomatik direnç ölçüm köprüsü ve referans DC direnç standartları kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ölçümler TÜBİTAK UME'de kurulu Quantum-Hall sistemine izlenebilir olarak alınmıştır [11]. Ölçümler sonucunda 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının kararlılığı belirlenmiştir.

2. 1000 Ω Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Matematiksel Modelleme ile Geometrik Boyutlarının Belirlenmesi

Hesaplanabilir AC direncin frekans bağımlılığı en az olacak şekilde matematiksel modellemesi yapılır [1, 13]. Bunun için direnç telinin çapı, direnç telleri arasındaki mesafe, direnç telinin boyu, manyetik-elektrik ekranın çapı, manyetik-elektrik ekranın kalınlığı, manyetik-elektrik ekran malzemesinin özgül direnci ve direnç telinin özgül direnci parametrelerinin değerleri değiştirilerek, hesaplanabilir AC direncin frekans bağımlılığı mümkün olan en düşük değerde olması hedeflenmiştir. Böylece teller arası kapasitans, manyetik-elektrik ekran ile tel arasındaki kapasitans, telin kendi indüktansı, teller arasında oluşan indüktans, toprağa kaçak iletkenlik ve kapasitans, teller arasındaki kaçak iletkenlik ve kapasitans, deri etkisi ve girdap akımlarından gelen etkilerin değerleri en az olması sağlanmıştır.

Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin iletim hattı Şekil 1'de gösterilmiştir [1, 4]. İletim hattında omik direnç değerine ek olarak kapasitans, indüktans ve kayıp iletkenlik etkileri oluşmaktadır [1, 4].

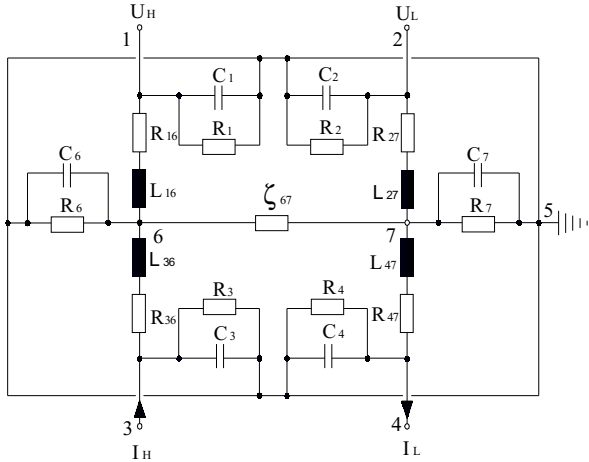


Şekil 1 : Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin iletim hattı modeli

Şekil 1'de,

- Λ : Çift iletkenin uzunluğu
- r : DC akım direnç değeri
- λ : Direnç telinin indüktansı
- m : Tellerin arasındaki karşılıklı indüktansın değeri
- C₀ : Toprakla teller arasındaki kapasitans değeri
- C₁ : Tellerin arasındaki kapasitans değeri
- ρ₀ : Tellerin toprakla arasındaki kayıp iletkenlik değeri
- ρ₁ : Tellerin arasındaki kayıp iletkenlik değeridir.

Şekil 1'deki iletim hattı (ζ₀₇) metal bir kutu içerisine konularak manyetik-elektrik olarak ekranlanmış ve eşdeğer devresi Şekil 2'de gösterilmiştir [1, 4]. Ekranlama sonucunda Şekil 2'de gösterilen kapasitans, indüktans ve dirençler oluşmaktadır.



Şekil 2 : 4-terminal hesaplanabilir AC direncin eşdeğer devresi

Şekil 2'de gösterilen hesaplanabilir AC direncin matematiksel modellemesi Maxwell denklemlerinden elde edilen eşitliklerin kullanılması ile yapılmıştır [1, 2, 3].

Eşitlikler ile direncin gerçel ve sanal kısımlarının empedans değerleri belirlenerek aşağıda verilen etkilerin en az olacağı modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu etkiler, direnç telleri arasındaki kapasitans, direnç telleri ile ekran arasındaki kapasitans, direnç telinin özindüktansı, direnç telleri arasındaki karşılıklı indüktans etkisi, teller arasında ve tellerin ekranla arasında oluşan kayıp iletkenlik etkileridir. Bu etkilerin değerlerini belirlemek için tablo 1'de verilen parametrelerin değerleri, fiziksel ve manyetik-elektrik durumlar gözönüne alınarak optimum seviyede belirlenmiştir.

Etkilerden gelen değerlerin hesaplanmasından sonra 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısmın empedans değeri eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır [3, 4].

$$Re \cong \frac{R}{1 - \frac{1}{6}R(G_0 - 2G_1) - \frac{\omega^2(L - 2M)^2}{R^2} - \frac{1}{720}R^2\omega^2(15C_0^2 - (C_0 - 4C_1)^2)} \quad (2)$$

Burada,

- R : Nominal direnç değeri (Ω)
- C₀ : Ekran ile direnç teli arasında oluşan kapasitans etkisi (pF)
- C₁ : Direnç telleri arasında oluşan kapasitans etkisi (pF)
- L : Özindüktans etkisi (nH)
- M : Karşılıklı indüktans etkisi (nH)
- G₀ : Ekranla tel arasında oluşan iletkenlik (S)
- G₁ : Teller arasında oluşan iletkenlik (S)
- ω : Açısal frekanstır (rad/sn).

Eşitlik (2)'nin paydasında bulunan ve direncin değerini değiştiren kısım ΔG olarak adlandırıldı ve eşitlik (3)'de verilen ΔG'nin değeri Matlab® kullanılarak hesaplanarak, frekansa bağlı olarak grafiği oluşturulmuştur (Şekil 3 ve 4).

$$\Delta G = \frac{1}{6}R(G_0 - 2G_1) + \frac{\omega^2(L - 2M)^2}{R^2} + \frac{1}{720}R^2\omega^2(15C_0^2 - (C_0 - 4C_1)^2) \quad (3)$$

Elde edilen eğriler yardımıyla ΔG değeri en küçük olacak şekilde belirlendi ve empedansın gerçel kısmına etkisi azaltılmıştır.

Direncin değerinin değişmesine sebep olan diğer iki faktör ise deri etkisi ve girdap akımları etkisidir [4]. Yüksek frekanslarda deri etkisinden dolayı dirençten geçen akım direnç telinin yüzeyinden akmak ister. Bu durumda direnç telinin kesitide frekansa bağlı olarak değişmekte ve direncin değeri değiştirmektedir. Girdap akımlarında deri etkisine benzer olarak direncin değerinde değişime sebep olmaktadır.

Eşitlik (4) ve Eşitlik (5) kullanılarak deri etkisi ve girdap akımlarından kaynaklanan etkilerin değerleri Matlab®, de hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler frekansa bağlı eğriler şeklinde elde edildi ve bu eğriler ile deri ve girdap akımlarından gelen etkiler en az olacak şekilde direncin geometrik boyutları tekrar belirlenmiştir.

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{1}{12} \left(\frac{r_w}{4} \sqrt{\omega \mu \kappa} \right)^4 \quad (4)$$

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1 + \frac{8 \left(\frac{\pi D \omega d}{\rho} \right) \omega \Lambda}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi D \omega d}{\rho} \right)^2} \cdot \frac{a^2}{D^2} \quad (5)$$

Burada,

- R_{AC} : Direncin AC değeri (Ω)
- R_{DC} : Direncin DC değeri (Ω)
- r_w : Direnç telinin yarıçapı (cm)
- ω : Açısal frekans (rad/sn)
- κ : Manyetik-elektrik öz direnç (Ω⁻¹.cm⁻¹)
- μ : Boşluğun manyetik geçirgenliği (VsA⁻¹.cm⁻¹)
- R : Nominal direnç değeri (Ω)
- D : Ekranın iç çapı (cm)
- ρ : Ekran malzemesinin özgül direnci (Ω.cm)
- d : Ekran kalınlığı (cm)
- Λ : Çift hattın uzunluğudur (cm).

ΔG, deri etkisi ve girdap akımları etkilerinin toplamı direncin AC değerinin DC değerinden ne kadar farklı olduğunu, yani "toplam direnç değişimi" değerini vermektedir [4, 5]. Buna göre toplam direnç değişimi Eşitlik (6) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\frac{\Delta R}{R} \text{ Toplam} = \frac{\Delta R}{R} \Delta G + \frac{\Delta R}{R} \text{ Deri Etkisi} + \frac{\Delta R}{R} \text{ Girdap Akımlar} \quad (6)$$

Tasarlanan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının geometrik boyutları ve manyetik-elektrik parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 : 1000 Ω Bifilar tip AC direncin geometrik boyutları ve manyetik-elektrik parametreleri

Parametreler	Sembolu	Değeri
Direnç telinin boyu (cm)	Λ	11,2
Nominal direnç değeri (Ω)	R	1000
Direnç telleri arasındaki mesafe (cm)	a	0,2
Direnç telinin yarıçapı (cm)	r_w	0,0011
Ekranın iç çapı (cm)	D	8
Ekran kalınlığı (cm)	d	0,2
Ekran malzemesinin özgül direnci ($\Omega\cdot\text{cm}$)	ρ_0	$2,82\cdot 10^{-6}$
Dielektrik katsayısı (F/cm)	ϵ_0	$8,854\cdot 10^{-10}$
Boşluğun manyetik geçirgenliği ($\text{VsA}^{-1}\text{cm}^{-1}$)	μ	$4\pi\cdot 10^{-9}$
Direnç malzemesinin özgül iletkenliği ($\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)	κ	$(1/132)\cdot 10^6$

Tablo 2’de geometrik boyutlara uygun olarak hesaplanan kapasitans ve indüktans değerleri, tablo 3’de ise 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gerçel kısmının empedansı, sanal kısmının empedansı ve zaman sabitinin frekansa bağlı olarak hesaplanmış değerleri verilmiştir.

Tablo 2 : UME 1000 Ω bifilar tip AC direncin hesaplanan kapasitans ve indüktans değerleri

C_0 (pF)	C_1 (pF)	L (nH)	M (nH)
1,4	0,2	281	46

Tablo 3 : UME 1000 Ω bifilar tip AC direncin gerçel, sanal kısmın frekansa bağlı empedans ve zaman sabiti değerleri

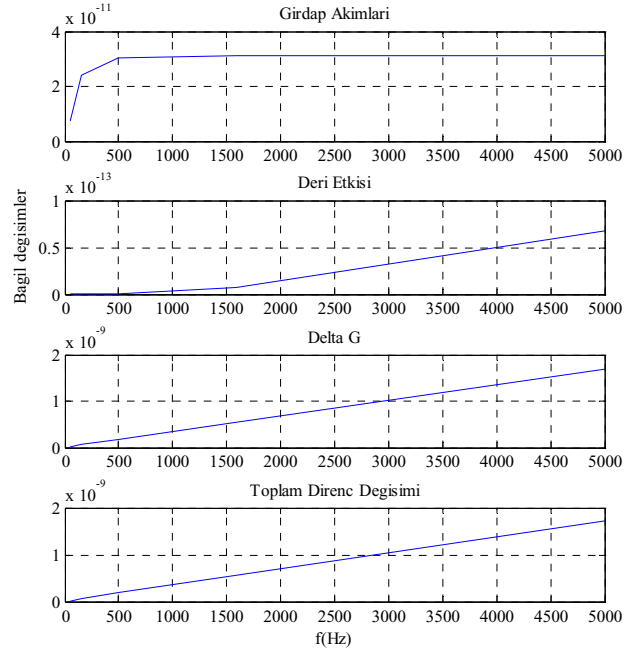
Frekans	Empedansın Gerçel kısmın değeri (Ω)	Empedansın Sanal kısmın değeri (Ω)	Zaman sabiti (s)
50 Hz	1000,00	$0,1\cdot 10^{-3}$	$0,37\cdot 10^{-9}$
159 Hz		$0,3\cdot 10^{-3}$	
500 Hz		$1,1\cdot 10^{-3}$	
1592 Hz		$3,7\cdot 10^{-3}$	
5 kHz		$11,7\cdot 10^{-3}$	
15,9 kHz		$37,2\cdot 10^{-3}$	
50 kHz		$117\cdot 10^{-3}$	
159 kHz		$234\cdot 10^{-3}$	
500 kHz		1,2	
1592 kHz		3,7	
5 MHz	1000,04	11,7	

Zaman sabiti değeri, indüktif, kapasitif etkilerden gelen hataların bir göstergesidir [8, 13, 14]. Bu etkilerden gelen hataların azaltılması tasarlanan direncin frekans bağımlılığının azaltıldığı anlamına gelir. Bu sebeple hesaplanabilir AC direnç tasarlanırken zaman sabiti değerinin en az seviyede olması istenir. Tablo 4’de UME 1000 Ω hesaplanabilir AC direnç standardının zaman sabiti değerinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması verilmiştir. Zaman sabiti değerleri değerlendirildiğinde UME 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin DC-AC direnç değerleri arasındaki farkın azatıldığı anlaşılmıştır.

Tablo 4 : Zaman sabiti değerlerinin karşılaştırılması

	UME 1000 Ω	[8] nolu kaynak	[13] nolu kaynak
Zaman sabiti (ns)	0,37	0,9	1

Tablo 1’de verilen geometrik boyutlar ve parametrelere göre Matlab®’de hesaplanan girdap akımları etkisi, deri etkisi, ΔG ve toplam bağlı direnç değişimi değerleri 5 kHz’e kadar Şekil 3’de eğrisel olarak gösterilmiştir. Şekil 3’deki eğriler incelendiğinde ΔG ’ den gelen etkinin girdap akımları ve deri etkisine göre üst frekans değerinde 100 kat yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda “toplam direnç değişimine” en büyük etkinin ΔG ifadesinden geldiği anlaşılmıştır.



Şekil 3 : Girdap akımları, deri etkisi, ΔG ve toplam direnç değişiminin frekansa bağlı eğrileri (5 kHz’e kadar)

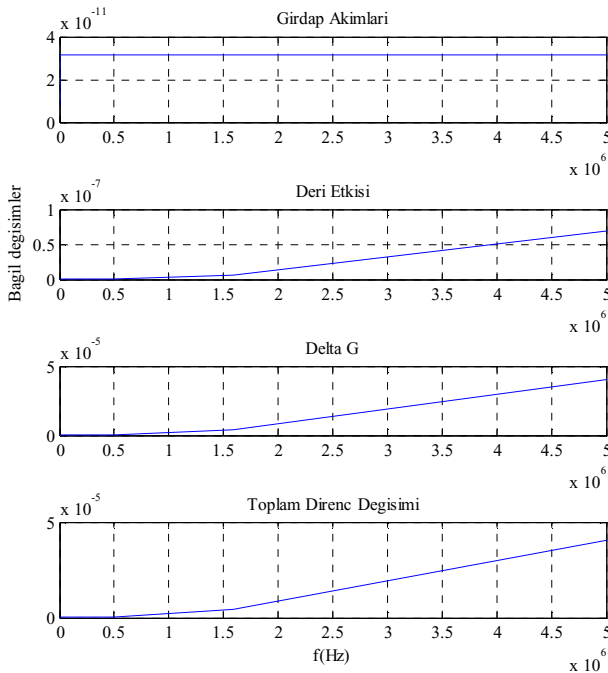
Şekil 3’deki “toplam direnç değişimi incelendiğinde 5 kHz frekans değerinde 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin değerinin DC-AC farkının bağlı olarak yaklaşık $2\cdot 10^{-9}$ olduğu yani 1000 Ω nominal değerindeki dirençte $2\cdot 10^{-6}\Omega$ ’ luk DC-AC farkının oluştuğu anlaşılmıştır.

Tablo 5’deki veriler incelendiğinde literatürde yapılan çalışmalarla, elde edilen verilerin uyumlu olduğu görüldü, ayrıca hassas LCR metrelerin AC direnç kısımlarının kalibrasyonlarını yapmak [15] için performans testlerini içeren bilgiler incelendi ve (örneğin Agilent 4284A) 1 kHz frekans değerinde ppm seviyesinde AC direnç standardının kullanılması yeterli olduğu görülmüştür. Bu nedenlerle tasarlanan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir direnç standardının metrolojik seviyede bir standart olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5 : ΔG ve girdap akımlarından gelen etkilerin karşılaştırılması

	Frekans	UME 1000 Ω	[4] nolu kaynak
ΔG değeri	5 kHz	$2 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$
Girdap akımları etkisinin değeri		$3 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$

Tablo 1'de verilen geometrik boyutlar ve parametrelere göre Matlab®'de hesaplanan "girdap akımları" etkisi, "deri etkisi", " ΔG " ve "toplam bağıl direnç değişimi" değerleri 5 MHz'e kadar şekil 4'de eğrisel olarak gösterilmiştir. Şekil 4'deki eğriler incelendiğinde üst frekans değerlerinde ΔG ' den gelen etkinin girdap akımları ve deri etkisine göre 100 kat yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda "toplam direnç değişimine" en büyük etkinin yine ΔG ifadesinden geldiği ve 5 MHz'de ΔG ifadesinin 5 kHz sonuçlarına göre yaklaşık 10000 kat arttığı anlaşılmıştır.



Şekil 4 : Girdap akımları, deri etkisi, ΔG ve toplam direnç değişiminin frekansa bağlı eğrileri (5 MHz'e kadar)

Şekil 4'deki "toplam direnç değişimi incelendiğinde 5 MHz frekans değerinde 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin değerinin DC-AC farkının bağıl olarak yaklaşık $5 \cdot 10^{-5}$ olduğu yani 1000 Ω nominal değerindeki dirençte 0,05 Ω 'luk DC-AC farkının oluştuğu anlaşılmaktadır. Tablo 6'da direncin 1 MHz'de DC-AC direnç değeri farkının literatür çalışmaları ile karşılaştırılması verilmiştir.. Frekans bağımlılığının logaritmik artması sebebiyle 1 MHz frekans değerinin üstündeki değerlerde en az 5 kat daha iyi sonuçların elde edildiği değerlendirilmiştir.

Tablo 6 : DC-AC direnç değeri farkının karşılaştırılması

	Frekans	UME 1000 Ω	[13] nolu kaynak	[15] nolu kaynak
Bağıl DC-AC direnç değeri farkı	1 MHz	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Elde edilen veriler değerlendirildiğinde tasarlanan hesaplanabilir AC direncin metrolojik ölçümler için yeterli olduğu görülmektedir.

3. 1000 Ω Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Üretilmesi

Tasarımı tamamlanan hesaplanabilir AC direncin üretim aşamasında en önemli problem kontak noktalarının doğru bir şekilde birleştirilmesidir [7, 8]. Bu çalışmada iletim hattı olarak Isabellenhutte firmasının ürettiği yüksek özgül dirence sahip 20 μ m çaplı isaohm teli kullanılmıştır. İsaohm direnç telinin nikel alaşımı olması nedeniyle kontak problemleri oluşmuştur [7, 8]. İsaohm direnç telinin direkt olarak 4 terminal bağlantı noktasında 2,5 mm çaplı bakır ile birleştirilmesinin zor olması nedeniyle isaohm direnç teli önce 0,5 mm çaplı manganin direnç teli ile birleştirilmiştir.. Bu iki direnç telinin birleştirilmesi için farklı yöntemler kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar metanol kaynağı, nokta kaynağı ve geleneksel lehimleme yöntemleridir [7, 8]. Bu yöntemler dışında isaohm direnç telinin bakır ile kaplanması konusunda çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda nokta kaynağı ile birleştirme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Direnç tellerini nokta kaynağı yöntemi ile birleştirmeden önce kirliliklerden temizlemek için kimyasal bir prosedür uygulanmıştır [9]. Bunun için 20 μ m çaplı isaohm direnç teli yaklaşık 1000 Ω olacak şekilde kesildi. Kesilen isaohm direnç teli öncelikle izopropil alkol banyosunda kaba temizlik için 20 dakika bekletildi. Alkol banyosundan çıkartılan isaohm direnç teli yağ temizleyici sprey ile temizlendi. Daha sonra isaohm direnç telinin yüzeyi, daha iyi kontak için aşındırıldı. Aşındırma için isaohm direnç teli çinko klorür (agresive flux) banyosunda 10 dakika bekletildi. İsaohm direnç teli çinko klorür banyosundan çıkartıldıktan sonra krom-nikel alaşımlarda oksit tabakalarının temizlenmesi işlemi (pickling yöntemi) için kromik asit içerisinde 10 dakika bekletildi. İsaohm direnç teli kromik asit içerisinde çıkartıldıktan sonra tekrar izopropil alkol banyosuna bırakıldı. Bu şekilde isaohm direnç teli birleştirme işlemine hazır duruma getirildi. İsaohm direnç telinin birleştirileceği 0,5 mm çaplı manganin direnç telinin boyu yaklaşık 0,5 cm olacak şekilde kesildi. Manganin direnç teline de isaohm direnç teli ile aynı kimyasal prosedür uygulandı. Ancak isaohm direnç teli için kullanılan kromik asit yerine manganin direnç teli için sülfirik asit kullanıldı.

Nokta kaynağı sistemi kontak temizleyici ile temizlenerek, uygulanacak kaynak süresinin zamanı belirlenerek, kimyasal prosedür ile temizlenmiş isaohm ve manganin direnç tellerinin birleştirilmesi işlemine geçildi. Birleştirme işlemine başlanmadan önce nokta kaynağı sistemi yine kontak temizleyici ile temizlendi. 20 μ m çaplı isaohm direnç teli alta,

0,5 mm çaplı manganin direnç teli üstte olacak şekilde nokta kaynağı sistemine yerleştirildi. Daha sonra teller üstten sıkıştırılarak kaynak işlemi için kaynak makinasından 3 saniyeyi aşmayacak şekilde manyetik-elektrik darbe uygulandı.

Bu yöntemle nominal değeri yaklaşık 1000 Ω olan 3 adet direnç teli hazırlanmıştır. Hazırlanan direnç tellerine Tablo 7'de belirtildiği şekilde farklı ısıl işlem prosedürleri uygulanmıştır.. Böylece, direnç tellerinde yüksek kararlılığın elde edilmesi için gereken ısıl işlem yöntemi belirlenmiştir.

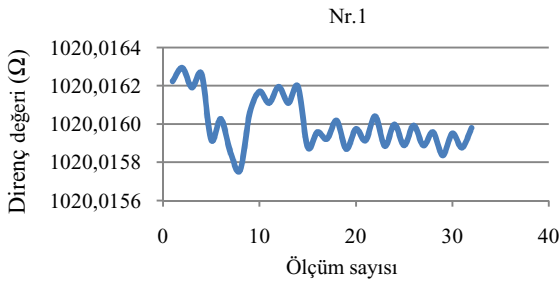
Tablo 7 : Isıl işlem yöntemleri

Tel numarası (Nr)	Uygulanan işlem
1	Hiçbir işlem yapılmamıştır.
2	175 °C sıcaklıkta fırın içerisinde 2 saat ısıtılıp 1 saat soğuk suda şoklanmıştır. Bu işlem 10 kez tekrarlanmıştır.
3	175 °C sıcaklıkta fırın içerisinde 72 saat süreyle tutulmuştur.

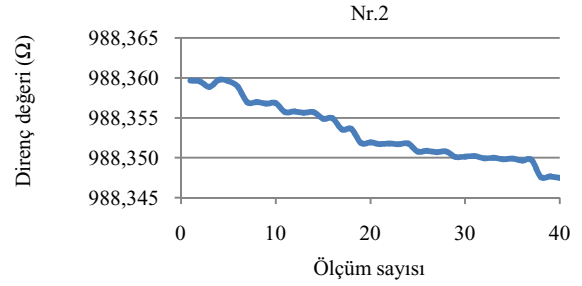
Not: 250 °C üzerinde bir sıcaklıkta isaohm direnç telinin manyetik-elektrik özelliğinin bozulması nedeniyle ısıl işlem çalışmaları 175°C'de gerçekleştirilmiştir [9].

3.1. Direnç Telinin Kararlılığı İle İlgili Deneysel Çalışmalar

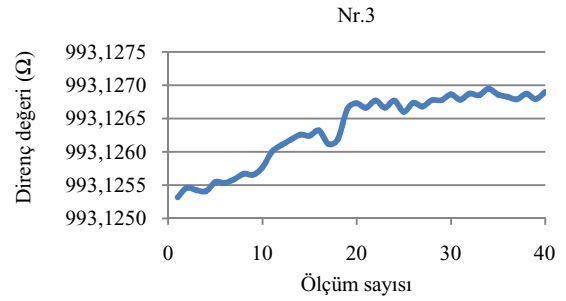
Hazırlanan 3 adet direnç tellerinin iki ucunda banana tip konektör olan bir düzenek hazırlanmıştır.. Karşılıklı iki banana konektör arasına yerleştirilen direnç telleri ısıl izolasyonlu bir dolap içerisine yerleştirilerek MI6010B model otomatik DC akım karşılaştırılmalı direnç ölçüm köprüsüne 4-terminal olarak bağlandı. MI 6010B otomatik direnç ölçüm köprüsünde yaklaşık 15 gün boyunca gerçekleştirilen ölçümler sonucunda Şekil 5'te verilen sonuçlar elde edilmiştir. Eğrilerde verilen standart sapma hesaplamalarında ilk 3 günlük veriler dikkate alınmamıştır.



Şekil 5a : Nr.1 direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,1 ppm)



Şekil 5b : Nr.2 direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 3 ppm)



Şekil 5c : Nr.3 direnç telinin 15 günlük kararlılığı (standart sapma 0,3 ppm)

Eğriler incelendiğinde 1 numaralı direnç telinin ilk 7 günlük değerlerinde kararlılığın daha düşük olduğu ancak 7.günden sonra alınan ölçümlerde kararlılığın arttığı, direnç değerinde herhangi bir kayma olmadığı (Şekil 5a), 2 numaralı direnç telinde ise kararlılığın kısa dönemde sağlandığı ancak direncin uzun dönemde kaydığı gözlemlendi (Şekil 5b). Son olarak 3 numaralı telinde ise ilk 5-6 günlük ölçümlerde direnç değerinin sürekli kaydığı ancak sonraki ölçümlerde ise kaymanın azaldığı ve kararlılığın arttığı görüldü (Şekil 5c).

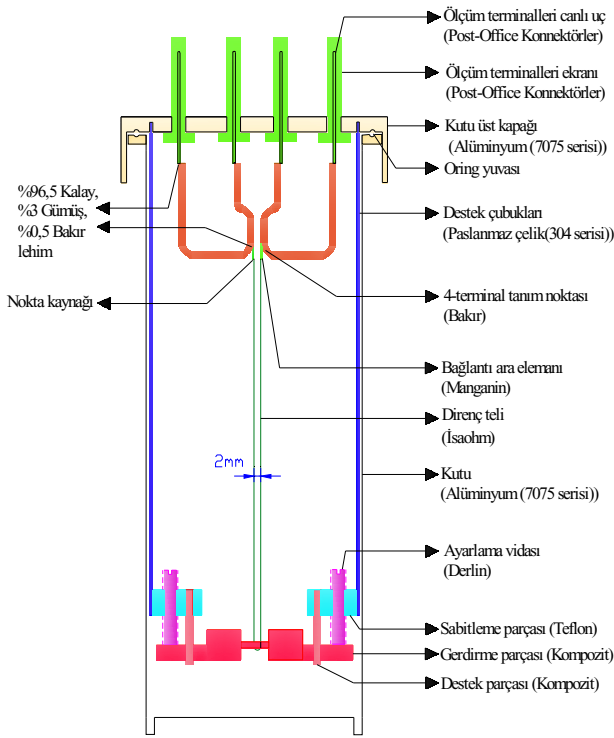
Deneysel çalışmalar sonucunda 1 numaralı direnç telinde 0,1 ppm kararlılık ve tekrarlanabilirliğin elde edilebileceği, 2 numaralı direnç telinde sürekli bir kaymanın gözlemlendiği bu sebeple ısıl işlem periyodunun ve şeklinin uygun olmadığı, 3 numaralı direnç telinde ise kararlılığın arttığı (0,3 ppm seviyesinde) ve kayma eğiminin azaldığı bu nedenle sıcaklık katsayısının daha iyi olacağı öngörülerek kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerin beklenen seviyelerde olduğu görülmüştür.

3.2. 1000 Ω Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Üretilmesi ve Ölçümleri

Direncin kararlılığının artırılması ile ilgili deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra direnç telinin matematiksel modelde elde edilen geometrik boyutlara uygun olarak hazırlanmış olan mekanik sisteme montajı yapılmıştır. Montaj işlemi yapılırken özellikle direnç telleri arasındaki mesafenin 2 mm. olması ve merkezde olmasına dikkat edilmiştir.

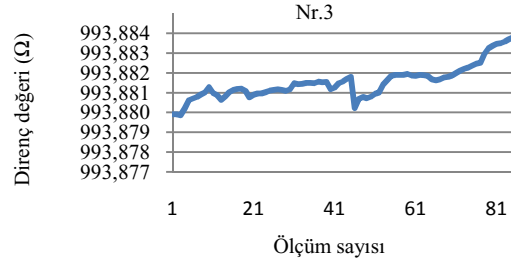
Hesaplanabilir AC direnç standardının Şekil 6'da verildiği gibi 4-terminal + ekran bağlantı tipine göre tasarlanmıştır [8 ,17].

Ölçüm uçları noktasında kontak direncini azaltmak için “post-office” tip konektör tercih edilmiştir. 4-terminal bağlantı noktasında 2,5 mm çaplı bakır tel, manyetik-elektrik direncinin yüksek olması sebebiyle ekran ile direnç teli arasında PTFE malzeme, direnç telinin gerginliğinin ayarlanmasında kompozit malzeme tercih edilmiştir. Kompozit malzemenin tercih edilmesinin iki nedeni vardır. Birincisi manyetik-elektrik direncinin PTFE kadar iyi olması diğer nedeni ise mekanik olarak daha hassas işlenebilir olmasıdır. Bu malzeme ile iki tel arasındaki 2 mm'lik mesafe sağlanabilmiştir. Standardın kutusu ise 7075 serisi alüminyum malzemeden yapılmıştır. 7075 serisi alüminyum malzeme tercih edilmesinin nedeni ise manyetik-elektrik ekran kalitesinin daha iyi ve ağırlığın düşük olmasıdır.

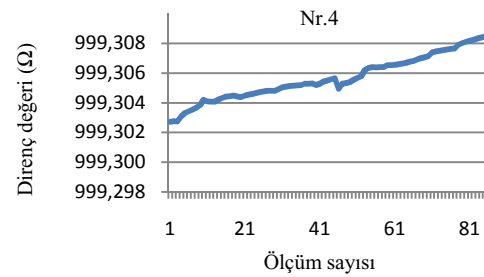


Şekil 6 : Üretimi yapılan 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin gösterimi

3 numaralı direnç teli ile birlikte yine aynı ısıl işlem prosedürüne tabi tutulan ve doğruluğu %0,1'den daha iyi olan ikinci bir direnç teli hazırlanarak (Nr.4) montajlanmıştır. Bu şekilde aynı ısıl işlem prosedürü uygulanmış iki adet 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç hazırlanmıştır. Bu iki 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç ısıl izolasyonlu dolap içerisine yerleştirilmiş ve MI6010B model akım karşılaştırmalı otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile 15 gün boyunca ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçları eğrisel olarak şekil 7 ve şekil 8'de verilmiştir. 3 numaralı direnç teli kutuya montaj edildikten sonra gerdirildiği için değerinin yaklaşık 0,7 Ω arttığı görülmüştür.



Şekil 7 : Nr.3 hesaplanabilir AC direnç standardının 15 günlük kararlılığı



Şekil 8 : Nr.4 hesaplanabilir AC direnç standardının 15 günlük kararlılığı

Ölçümler sonucunda hesaplanabilir AC direnç standardının montajlanmadan önce 0,3 ppm seviyesinde kararlılıkta ve ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliğinin olduğunu gözlemlenmiştir. Montajlama işlemi yapıldıktan sonra direncin değerinde sürekli bir kayma gözlemlendi ve tekrarlanabilir olmayan ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Bu durumda direnç değerindeki kaymanın isaohm veya manganin direnç telinden gelmediği, manganin direnç telinin, 4 terminal ölçüm noktası olan ve lehim yolu ile bakırla birleştirilmiş kontak noktasından veya bakır tellerin post-office tip konektörlere lehimlendikleri noktadan geldiği belirlenmiştir.

1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının DC akım uygulanarak yapılan ölçümlerinde, standardın kısa dönem (1-2 gün) içerisinde izlenebilirlik aktarmak amacıyla kullanılabilceği görülmüştür.

3.3. Zaman Sabitinin Belirlenmesi

Hesaplanabilir AC dirençlerin kalibrasyonları zaman sabiti değerleri ölçülerek yapılır [8, 14, 18]. Zaman sabiti değerini doğrudan ölçebilen hassas köprülerin UME'de bulunmaması nedeniyle alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alternatif yöntem ikincil seviye ölçümlerde kullanılır. Ancak 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin zaman sabiti değerleri ile ilgili fikir vermesi amacıyla belirtilen yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemde 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir LCR metre kullanılarak AC direncin DC direnç değeri (R) 999,24 Ω ve 1 kHz frekansında reaktans değeri (X) 0,0029 Ω olarak ölçülmüştür. Ölçülen direnç ve reaktans değeri kullanılarak zaman sabiti ($t = X / (R \cdot \omega)$) değeri $4,6 \cdot 10^{-10}$ s olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardı, DC - 5 kHz frekans aralığında literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen verilere uygun olarak metrolojik seviyede yapılan ölçümlerde standart olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir. Tasarımın literatürdeki çalışmalardan farkı ise DC - 5MHz frekans aralığında direnç değeri farkı en az değişecek şekilde tasarlanmış olmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalarla ürettiğimiz standart dirençlerin değerine ait veriler (DC-AC direnç farkı ve zaman sabiti) karşılaştırıldığında 1 MHz frekans değerinde en az 5 kat daha iyi bir tasarımın elde edildiği görülmüştür. Bu durumda 5 MHz'de elde edilen verilerin literatürde yapılan hesaplanabilir AC direnç standartlarından daha düşük DC-AC direnç değeri farkına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Matematiksel modellemede 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standardının 5 MHz frekans değerinde DC-AC direnç değeri farkı 40 ppm olarak elde edilmiştir. Direnç telinin MI6010B model otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile yapılan deneysel ölçümlerinde ise 0,1 ppm kararlılık değeri elde edilmiştir. 1000 Ω Bifilar tip hesaplanabilir AC direncin üretimi yapıldıktan sonra MI6010B model otomatik DC direnç ölçüm köprüsü ile yapılan ölçümlerde ise 1 ppm/gün kararlılık değeri elde edilmiştir. Ancak direncin değerinde kayma gözlemlenmiştir. Bu nedenle tekrarlanabilir ölçümler alınamamıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direncin değerindeki kaymanın isaohm veya manganin direnç telinden gelmediği, manganin direnç telinin, 4 terminal ölçüm noktası olup lehim yolu ile bakırla birleştirilmiş kontak noktasından veya bakır tellerin post-office tip konektörlere lehimlendikleri noktadan geldiği anlaşılmıştır.

Üretilen 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC dirençte tek yüzeyli konektör tasarımı uygulanmıştır. Bu sayede ölçümlerde kullanılacak ekranlı kablolar arasındaki mesafe azaltılmış ve yüksek frekans uygulamalarında düşük belirsizlikte [19] ölçümler alınabilmesi sağlanmıştır. Ölçüm noktalarında post-office tipi konektör kullanılarak, kontak direnci azaltılmıştır. Ayrıca kullanılan yöntemde uygulanan kimyasal prosedür ile kontak noktalarındaki kirlilikler giderilerek direnç tellerinin birleştirilmesi sırasında daha iyi kontak elde edilmiş ve kirliliklerden gelen etkinin direncin kararlılığına etkileri ortadan kaldırılmıştır. İleride yapılacak çalışmada 1000 Ω bifilar tip hesaplanabilir AC direnç standartlarının sıcaklık katsayılarının belirlenmesi planlanmıştır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmanın her aşamasında, desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK UME'nin çok değerli yöneticilerine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1].Gibbins D.L., "A design for resistors of calculable AC/DC resistance ratio", *IEEE Trans. Instrum.Meas.*, Vol.110, No.2, s.335-347, (1963).

[2].Haddad, R.J., "A Resistor Calculable from DC to 10^5 rad/s.", *Msc. Thesis, School of Engineering and Applied Science, George Washington University*, (1969).

[3].Graetsh V., "Prazisionswiderstaende für Gelich und Wechselstrom", *PTB-Mitteilungen*, 90 26-30, (1980).

[4].Koller H., "Prazisionswiderstaende mit berechenbarem Frequenzeinfluss", *Elektrie* 29, s.612-615, (1975).

[5].*PTB-Report*, "Widerstaende mit berechenbarem Frequenzeinfluss", (1974).

[6].Schurr J, Wood B. M., Overney F, "Lineer frequency dependence in AC resistance measurement", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 54 512-5, (2005).

[7].Elmqvist R.E., "Calculable coaxial resistors for precision measurements", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 49 210-5, (2000).

[8].Kucera J, Vollmer E, Schurr J., Bohacek J, "Calculable resistors of coaxial design" *Meas.Sc.Technol.*, 095104, (2009).

[9].Isabellenhütte company, "Isaohm Technical information".

[10].Semyenov Y.P., "Bifilar AC-DC Resistor Using a Microwire", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.46, No.2, (1997).

[11].Ku Y.S., Hsu C.M., Pang H.L., Hsiao J., Nakanishi "DC & AC resistance measurements center for measurements standarts", *XVII. IMEKO World Congress*, Dubrovnik, Croatia, 54 533-7, (2005).

[12].Gülmez Y., Gülmez G., Turhan E., Özkan T., Çınar M., Sözen L., "New Design of Calculable Resistor", *Precision Electromagnetic Measurements. Conference*, Page 348-349, (2002).

[13].Kim H.J., Lee R.D., Semenov Y.P., "Resistor with calculable dependencies up to 1 MHz", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.56, No.2, (2007).

[14].Yasuhiro N., Hiroyuki F., "An analysis on the uncertainty of calculating the time constant of the quadrifilar reversed resistor", *AIST Bulletin of Metrology*, Vol.3, No.3, (2004).

[15].Bohacek J., "References resistors for calibration of wireband LCR meters", *XVIII Imeko Word Congress, Brazil*, (2006).

[16].Arnold A.H.M., Ph.D. D.Eng. Associate Member., "Nickel-Chromium-Aluminium-Copper Resistance Wire" *National Physical Laboratory*, Paper No.2084M, (1956).

[17].Çınar M., Dolma A., Gülmez Y., "Bifilar Tip Hesaplanabilir AC Direncin Modellenmesi ve Geliştirilmesi", *International Union of Radio Science, KKTC*, (2010).

[18].Delahaye F., "DC and AC Techniques for Resistance and Impedance Measurements", *Metrologia*, 29 81, (1992).

[19].Baytaroğlu, Ş., Kesikoğlu, H., Özbay H.Ö., "Metrolojide Kullanılan Temel ve Genel Terimler Sözlüğü", *Ulusal Metroloji Enstitüsü*, (1994).