

DÜŞÜK GERİLİM DEĞERLERİNDE DC GERİLİM ÖLÇER KALİBRASYONU

Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK*
Saliha TURHAN**

* coskun.ozturk@tubitak.gov.tr

** saliha.turhan@tubitak.gov.tr

TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı, Gebze/KOCAELİ
Tel: 262-679 50 00

ÖZET

Nanovoltmetreler 1 mV'dan başlayan ölçüm bölgeleri ile düşük gerilim ölçümleri için tasarlanmış DC gerilim ölçerlerdir. DC gerilim ölçerlerin kalibrasyonu için genelde kalibratör doğruluğu yeterli iken, nanovoltmetrelerin 1 mV - 10 mV ölçüm bölgeleri için kalibratörlerin doğrulukları yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple Nanovoltmetrelerin düşük gerilimlerdeki kalibrasyonu için, Josephson Gerilim Standardının veya Gerilim Bölücülerin referans standart olarak kullanılması gerekmektedir.

Ancak çalıştırma maliyetlerinin yanı sıra kullanım zorlukları sebebiyle de bu standartlar ikinci seviye laboratuvarlar için uygun değildir. Nanovoltmetrelerin düşük DC gerilim izlenebilirliğini sağlamak amacıyla nanovoltmetre üreticileri tarafından üretilmiş veya Laboratuvar tarafından da üretilebilen düşük ısı gerimli bölücü kullanılması daha uygundur. Bu bölücüler kullanım öncesinde, ilave bir standart gerektirmeden, kalibratör ve kalibre edilen nanovoltmetre kullanılarak, kalibre edilebilirler.

Bildiride nanovoltmetre kalibrasyonuna uygun düşük ısı gerimli bölücünün özellikleri, bölücünün kullanım öncesi karakterizasyonu (kalibrasyonu), bölücü ile nanovoltmetre kalibrasyonunun aşamaları ve belirsizlik bütçesi sunulacaktır. Ayrıca bir gerilim ölçerin, düşük ısı gerimli bölücü ve Josephson Gerilim Standardı ile yapılan kalibrasyon sonuçları karşılaştırılacaktır.

Anahtar kelimeler: Nanovoltmetre, DC gerilim ölçer, gerilim bölücü, kalibrasyon

ABSTRACT

Nanovoltmeter is a DC voltage meter, which is designed for the low-voltage measurements with a measurement range of 1 mV or higher. Although the accuracy of calibrators are usually sufficient for the calibration of DC voltage meters, for the calibration of 1 mV - 10 mV ranges of nanovoltmeters calibrators accuracy are insufficient. For this reason, for the low voltage calibration of nanovoltmeters, the voltage dividers or Josephson DC Voltage Standard are used as a reference standard.

But these reference standards are not appropriate for the second-level laboratories, due to difficulties in operation and their costs. Low thermal voltage dividers, produced by manufacturers of the nanovoltmeters in order to ensure the traceability of Nanovoltmeters for low DC voltages, can be used. These dividers can be calibrated prior to use by using a calibrator and the nanovoltmeter to be calibrated, without any extra reference standard.

This paper describes the features of the voltage divider suitable to use in nanovoltmeter calibrations, a simple method for calibration of the divider before the usage, calibration procedures of nanovoltmeter using a divider, model functions for these calibration and its uncertainty budgets. Also measurement results of a DC voltage meter, calibrated by Josephson Voltage standard and by a divider are compared.

Key words: Nanovoltmeter, DC voltage meter, voltmeter, voltage divider, calibration

1. GİRİŞ

Nanovoltmetreler 1 mV'dan değerinden başlayan ölçüm bölgeleri ile düşük gerilim ölçümleri için tasarlanmış DC gerilim ölçerlerdir. Çoğunlukla, ısı-çift kalibrasyonlarında, ısı gerilim çevirimi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen AC gerilim kalibrasyonlarında ve RF güç ölçümlerinde kullanılmaktadırlar. Nanovoltmetrelerin Volt seviyesindeki ölçüm bölgelerinin kalibrasyonu için kalibratör doğruluğu yeterli olurken, özellikle 1 mV - 10 mV ölçüm bölgelerinin kalibrasyonu için kalibratörlerin doğrulukları yetersiz kalmaktadır.

Nanovolt seviyesinde belirsizlik gerektiren mV gerilim değerlerinin kalibrasyonu doğrudan Josephson Gerilim Standardı (JGS) kullanılarak sağlanabilir. JGS'na sahip olmayan veya JGS çalıştırma maliyetini nanovoltmetre kalibrasyonuna yansıtmak istemeyen laboratuvarların nanovoltmetre kalibrasyonunu düşük ısı gerilimli bölücü ile nanovolt seviyesinde belirsizlikle gerçekleştirebilmeleri mümkündür.

Düşük gerilim bölücülerin kalibrasyonları, bağlantı ucu denkleştirici aracılığıyla (Lead Compensator) Kelvin Varley gerilim bölücüsü ile karşılaştırılmak suretiyle gerçekleştirilmektedir [1]. Ancak Kelvin Varley gerilim bölücü ve bağlantı ucu denkleştirici ülkemizdeki çoğu akredite laboratuvarların envanterinde mevcut olmadığı gibi, bu metot ile kalibrasyon dikkat ve tecrübe gerektirmesinin yanı sıra oldukça da zahmetlidir.

Düşük gerilim bölücüler, bir kalibratör ve kalibrasyonunda kullanılacak nanovoltmetre ile, ilave bir ölçüm standardı gerektirmeden kalibre edilebilirler. Bu kalibrasyon kaymaları belirlenmiş bir kalibratör ile gerçekleştirildiğinde, kalibrasyon belirsizliği Kelvin Varley bölücü ile kalibrasyon sonucunda elde edilen belirsizlik seviyesinde olmaktadır.

Bildiride nanovoltmetre kalibrasyonuna uygun düşük ısı gerilimli bölücünün özellikleri, bölücünün kullanım öncesi karakterizasyonu (kalibrasyonu), bölücü ile nanovoltmetre kalibrasyonunun aşamaları ve belirsizlik bütçesi sunulmaktadır. Ayrıca bir nanovoltmetrenin, düşük ısı gerilimli bölücü ve Josephson Gerilim Standardı ile yapılan kalibrasyon sonuçları karşılaştırılmaktadır.

2. DÜŞÜK ISIL GERİLİMLİ BÖLÜCÜ ÖZELLİKLERİ

Yüksek gerilimleri bölmek üzere tasarlanmış olan bölücü, düşük gerilimlerde kullanılmaya uygun değildir. Çünkü, yüksek gerilim bölücülerinin kısa dönem kararlılıkları ve ısı gerilimleri birçok nanovoltmetrenin gürültüsünden ve toleransından fazladır.

Yüksek dirençli olan bu bölücülerin dirençlerinin ısı gürültüsü de yüksek olmaktadır. Dirençlerin ısı gürültüsü Formül (1) ile verilmektedir.

$$V_{rms} = \sqrt{4kTRB} \quad (1)$$

Burada k Boltzman sabiti, T sıcaklık, R direnç ve B ise bant genişliğidir. R, bölücünün çıkışında görülen eş-değer direnç olup yaklaşık olarak bölücünün çıkış direncine eşittir [1, 2, 3, 4]. Laboratuvarlarda kullanılan çeşitli bölücülerin tahmini ısı gürültüsü T = 296 K, B = 10 Hz ve k = 1,38·10⁻²³ J·K⁻¹ alınarak hesaplanmıştır. Tablo 1'de çeşitli bölücüler için hesaplanan gürültü seviyeleri verilmektedir.

Tablo 1. Laboratuvarlarda kullanılan bazı bölücülerin tahmini direnç gürültüleri

| Bölücü | | Bölücü Gürültüsü |
|--------------|---|-------------------|
| Keithley 262 | 10 ⁴ :1 ve 10 ⁵ :1 bölüm oranları | 0,6 nV |
| Keithley 262 | 10 ² :1 ve 10 ³ :1 bölüm oranları | 5,7 nV |
| Datron 4902S | | 40,4 nV |
| Fluke 720A | | (25,6 - 103,8) nV |

| | |
|------------|---------|
| Fluke 752A | 80,8 nV |
|------------|---------|

Tablo 1’de görüldüğü gibi, yüksek gerilimleri bölmek üzere tasarlanmış olan Datron 4902S, Fluke 720A ve Fluke 752A bölücülerinin gürültüleri, nanovoltmetrelerin mV ölçüm bölgelerindeki gürültülerinden (< 20 nV) daha fazladır.

Ayrıca, bölücülerin kısa dönem kararlılıkları, girişleri kısa devre edilerek çıkışlarının Keithley 2182A nanovoltmetre ile ölçülmesi suretiyle ölçülmüş ve Tablo 2’de verilen kısa dönem kararlılıklarının Tablo 1’de verilen tahmini gürültü seviyeleri ile uyduğu görülmüştür.

Tablo 2. Laboratuvarlarda kullanılan bazı bölücülerin kısa dönem kararlılığı

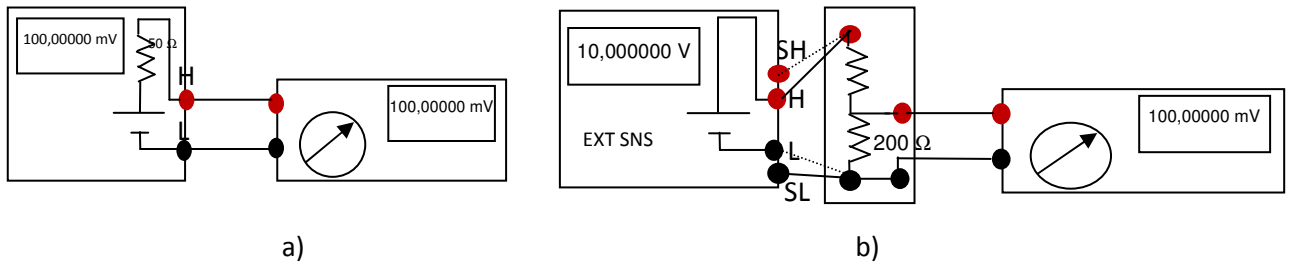
| Bölücü | Kısa Dönem Kararlılık |
|---------------------------|-----------------------|
| Keithley 262 ($10^2:1$) | 5 nV |
| Datron 4902S | 92 nV |
| Fluke 752A | 132 nV |

Düşük gerilim bölücüsünün taşıması gereken bir diğer özellik ise düşük ısıl gerilime sahip olmasıdır. Sadece bölücünün kendisinin değil, aynı zamanda bölücü ile birlikte kullanılan kablo ve bağlantıların da düşük ısıl gerilimli olması gereklidir. Aksi takdirde bölücünün ısıl gürültüsünden daha büyük ısıl gerilimler hatalı ölçümlere sebep olacaktır.

TÜBİTAK UME’de nanovoltmetre kalibrasyonunda Keithley 262 “Low Thermal Voltage Divider” bölücüsü kullanılmaktadır. Nanovoltmetre kalibrasyonları, izotermal bir blok üzerine yerleştirilen dirençler kullanılarak yapılan bir düşük gerilim bölücüsü ile de gerçekleştirilebilir [5].

3. DÜŞÜK ISIL GERİLİMLİ BÖLÜCÜ KALİBRASYONU

Keithley 262 bölücünün kullanım kitabında kalibrasyonu, Fluke 720A gerilim bölücüsü ile, Fluke 721 bağlantı ucu denkleştirici (Lead Compensator) aracılığıyla karşılaştırılması suretiyle tanımlanmıştır [1]. Ancak bağlantı ucu denkleştirici ve Kelvin Varley gerilim bölücü çoğu akredite laboratuvarın envanterinde mevcut değildir. Ayrıca bu kalibrasyon dikkat ve tecrübe gerektiren zahmetli bir kalibrasyondur. Bunun yanı sıra, nanovoltmetre kalibrasyonu belirsizlik bütçesine, bu yöntemle yılda bir kalibre edilen bölücünün üretici firma tarafından beyan edilen yıllık kayma değeri ($35 \cdot 10^{-6}$ ppm) ilave edildiğinde, belirsizlik kalibre edilen nanovoltmetrenin toleranslarına yaklaşmaktadır. Bu sebeple bu bölücülerin kalibrasyonunun her kullanımı öncesinde, Şekil 1’de verilen ölçüm düzenekleri ile gerçekleştirilmesi oldukça kullanışlıdır.



Şekil 1. Bölücü kalibrasyonu için ölçüm düzenekleri

Bir düşük gerilim bölücünün, nanovoltmetre kalibrasyonu için kullanımı öncesinde kalibrasyon aşamaları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. düşük gerilim bölücünün kullanımı öncesi kalibrasyon aşamaları

| No | İşlem | Elde Edilen Veri |
|----|--|------------------|
| 1 | Şekil 1a'da gösterilen kalibrasyon düzeneğini kurunuz. Kalibre edilen nanovoltmetreye kalibratörden 0 mV uygulayınız. Isıl denge için yeterli süre (en az 5 dakika) bekleyiniz, sonra nanovoltmetre ofset düzeltmesini uygun şekilde yapınız | - |
| 2 | Nanovoltmetreye kalibratörden 100 mV - 190 mV aralığında bir gerilim uygulayınız. Kalibratörden uyguladığınız değeri kaydediniz. | V_{100mV} |
| 3 | Nanovoltmetre okumasını kaydediniz. | $V_{transfer}$ |
| 4 | Bölücüyü $10^2:1$ bölüm oranını sağlayacak şekilde ayarlayınız ve Şekil 1b'de gösterilen ölçüm düzeneğini kurunuz. | - |
| 5 | Bölücüye 10 V - 19 V aralığında bir değer uygulayınız. Bu değer 2. adımda uygulanan değer 10^2 katı olmalıdır. Kalibratörün ölçüm bölgesini kilitleyiniz. | - |
| 6 | Isıl denge için yeterli süre (en az 5 dakika) bekleyiniz, sonra kalibratörden 0 V uygulayınız ve nanovoltmetre ofset düzeltmesini uygun şekilde yapınız. | - |
| 7 | Tekrar 6. adımda ayarlanan değeri uygulayınız ve kalibratörün değerini, nanovoltmetre göstergesinde $V_{transfer}$ değerini görünceye kadar ayarlayınız. | $V_{transfer}$ |
| 8 | Kalibratörün 7. adımda ayarlanan değerini kaydediniz. | V_{set} |

Bölücünün bölüm oranını kalibre etmek üzere yapılan yukarıdaki işlemlerde nanovoltmetre transfer standart olarak kullanılmıştır. Nanovoltmetre ile ölçülen değerler, kalibratörün 100 mV-190 mV aralığındaki değerini temsil etmiştir. Yukarıdaki kalibrasyona ait model fonksiyon Formül (2) ile tanımlanabilir:

$$V_{transfer} = V_{100mV} = \frac{V_{set}}{R} \quad (2)$$

Formül (2)'den aradığımız bölüm oranını çeker ve kalibratörün düzeltmelerini uygularsak, bölüm oranı için model fonksiyonumuz Formül (3) olarak belirlenir:

$$R = \frac{V_{set} + \delta V_{set_kal} + \delta V_{set_ayarma} + \delta V_{P1}}{V_{100mV} + \delta V_{100mV_kal} + \delta V_{100mV_ayarma} + \delta V_{P2} + \delta V_{transfer}} \quad (3)$$

| Sembol | Açıklama |
|-------------|---|
| V_{100mV} | Kalibratörün ayarlandığı ve 100 mV-190 mV arasında değişen gerilim değeridir. |
| V_{set} | Kalibratörün ayarlandığı ve 8. adımda kaydedilen gerilim değeridir. Kalibratör göstergesinde ayarlanan V_{set} değeri, genelde kalibratörün kalibre edildiği değerlerden farklı bir değerdir. Bu değer kalibratörün lineer olması durumunda zaten δV_{set_kal} ile düzeltilmektedir. V_{set} değerinin belirsizliği kalibratörün doğrusal davranış göstermesi ile ilgilidir. Kalibratörün doğrusallığı hakkında bilgi, o ölçüm bölgesinde alınan birden fazla noktada alınan ölçüm sonuçlarından elde edilebileceği gibi cihazın kullanım kitabından da elde edilebilir. |

| Sembol | Açıklama |
|---------------------------|---|
| δV_{set_kal} | 7. adımda kalibratörde ayarlanan değer kalibrasyonunda belirlenen düzeltmesidir. Kalibratörün sertifikasından elde edilir. Toleranslarının içinde olduğunu bilinen kalibratörün düzeltilmesi, düzeltme belirsizliği olarak üretici toleranslarının alınması şartıyla sıfır olarak kabul edilebilir. Kalibratörün üreticisi tarafından beyan edilen toleransları kalibratörün doğrusallık belirsizliğini de içerdiğinden, bu durumda doğrusallık belirsizliğini ayrıca değerlendirmeye gerek yoktur. |
| δV_{set_kayma} | 7. adımda kalibratörde ayarlanan değer zamanla kaymasından kaynaklanan düzeltmedir. Bu değer kalibratörün çeşitli zamanlarda gerçekleştirilmiş kalibrasyon sonuçlarından regresyon yöntemi ile elde edilebilir. Kayma düzeltilmesi, belirsizliğinin üretici firma toleransları alınmak şartıyla, daha ileri bir analiz yapmadan sıfır olarak kabul edilebilir. |
| δV_{P1} | 7. adımda kalibratörde ayarlanan gerilimin gürültüsüdür. Bu düzeltme değeri, belirsizliğe etkisini model fonksiyonda belirtilmek suretiyle, sıfır olarak kabul edilebilir. Kalibratör üreticisinin toleranslarının belirsizlik bileşeni olarak kullanıldığı durumlarda, kalibratör gürültüsünü ayrıca değerlendirmeye gerek yoktur. Ancak ölçüm süresinin yeterince uzun olmadığı ve üretici firma toleranslarının belirsizlik bileşeni olarak kullanılmadığı durumlarda, mV seviyesindeki gerilimler için kalibratör gürültüsünü ayrıca değerlendirmek uygun olacaktır. |
| δV_{100mV_kal} | 2. adımda kalibratörde ayarlanan değer kalibrasyonunda belirlenen düzeltmesidir. Kalibratörün sertifikasından elde edilir. Toleranslarının içinde olduğunu bilinen kalibratörün düzeltilmesi, belirsizliğin üretici toleranslarının alınması şartıyla sıfır olarak kabul edilebilir. |
| δV_{100mV_kayma} | 2. adımda kalibratörde ayarlanan değer zamanla kaymasından kaynaklanan düzeltmedir. Bu değer kalibratörün çeşitli zamanlarda gerçekleştirilmiş kalibrasyon sonuçlarından regresyon yöntemi ile elde edilebilir. Kayma düzeltilmesi, belirsizliğinin üretici firma toleransları alınmak şartıyla, daha ileri bir analiz yapmadan sıfır olarak kabul edilebilir. |
| δV_{P2} | 2. adımda kalibratörde ayarlanan gerilimin gürültüsüdür. Bu düzeltme değeri, belirsizliğe etkisini model fonksiyonda belirtilmek suretiyle, sıfır olarak kabul edilebilir. Kalibratör üreticisinin toleranslarının belirsizlik bileşeni olarak kullanıldığı durumlarda, kalibratör gürültüsünü ayrıca değerlendirmeye gerek yoktur. Ancak ölçüm süresinin yeterince uzun olmadığı ve üretici firma toleranslarının belirsizlik bileşeni olarak kullanılmadığı durumlarda, mV seviyesindeki gerilimler için kalibratör gürültüsünü ayrıca değerlendirmek uygun olacaktır. |
| $\delta V_{transfer}$ | Nanovoltmetrenin, iki farklı ölçüm düzeneği ile kalibratörün değerini aktarması esnasında oluşan hata düzeltmesidir. Hata, gösterge ve kalibratörün sonlu çözünürlüğü nedeniyle tam ayarlanamayan değerler, yükleme etkileri ve nanovoltmetrenin kısa dönem kararsızlığından kaynaklanmaktadır. Çoğu nanovoltmetrenin giriş direnci bu ölçüm bölgesi için 10 G Ω 'un üzerindedir. Nanovoltmetre, Şekil 1a'daki düzenekte 50 Ω ile yüklenirken, Şekil 1b'deki düzenekte ise 200 Ω ile yüklenmektedir. Bu durumda yükleme hatasından gelen belirsizlik yaklaşık olarak 0,015 ppm (çıkış gerilimine göre bağlı) olmaktadır. |

Tablo 4'de Keithley 262 bölücünün üç farklı kalibratör ile kalibrasyonu için hesaplanan belirsizlikleri verilmiştir.

Tablo 4. Üç farklı kalibratör ile Keithley 262 kalibrasyonu için hesaplanan belirsizlikler

| Kullanılan Kalibratör | Bölüm Oranı R_{nom} | Bağıl Belirsizlik $U(R)/R$ |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Fluke 5700A Düzeltilmeleri bilinen | 10 ² :1 V/V | 16 ppm |

| | | |
|---|------------------------|---------|
| FLUKE 5720A Düzeltilmeleri bilinen | 10 ² :1 V/V | 13 ppm |
| FLUKE 5720A Düzeltilmeleri ve yıllık kayması bilinen | 10 ² :1 V/V | 4,2 ppm |

4. BÖLÜCÜ İLE NANOVOLTMETRE KALİBRASYONU

Şekil 1'b'de verilen ölçüm sistemi nanovoltmetrelerin kalibrasyonunda kullanılan sistemdir. Buradaki önemli nokta bağlantı kablolarının etkilerinin dikkate alınmasıdır. Bölücünün çıkışıyla nanovoltmetre girişleri arasındaki kablonun etkisi, nanovoltmetre iç direncinin büyük olması (10 GΩ) nedeniyle ihmal edilebilir. Ancak kalibratör çıkışıyla bölücü girişi arasındaki kabloların etkisi dikkate alınmalıdır. Gerekli dikkat gösterilmez ise, bağlantı kablolarının iç direncinin yaklaşık 60 mΩ, bölücü giriş direncinin ise 20 kΩ olduğu dikkate alındığında, bağlantı kablolarının neden olduğu hata yaklaşık olarak 3 ppm olacaktır.

Bağlantı kablolarının etkisinden tamamen kurtulmak için, kalibratörün geri besleme döngüsüne referans işaret bölücü giriş terminaleri verilebilir. Bunun için, Şekil 1b'de kesikli çizgilerle gösterildiği gibi, kalibratör EXT SNS konumunda iken SENSE terminallerine bölücü girişleri bağlanabilir. Bölücünün bölüm oranının bu bağlantı ile belirlenmiş olması durumunda, nanovoltmetre kalibrasyonunda da bu bağlantı kullanılmalıdır. Bölücünün kalibratörün EXT SNS konumuna alınmadan kalibre edilmesi durumunda, bölüm oranı bağlantı kablolarıyla birlikte belirlenmiş olacağından, nanovoltmetre kalibrasyonunda da kalibratör EXT SNS konumuna alınmadan kullanılmalıdır.

Şekil 1b'deki ölçüm sisteminde bölücünün girişine uygulanan gerilimi V_g ile, bölücü çıkışında elde edilen gerilim $V_ç$ arasındaki ilişkiyi Formül (4) ile gösterebiliriz.

$$V_ç = \frac{V_g}{R} \quad (4)$$

Burada R "3. Düşük Isıl Gerilimli Bölücü Kalibrasyonu" başlığı altında verilen yöntem ile belirlenen bölüm oranıdır. Görüldüğü gibi $V_ç$, R 'ye bağlı olarak değişir. Bu sebeple, Nanovoltmetrenin toleranslarının içinde olup olmadığı kontrol edilirken, bölücünün değerine göre nanovoltmetreye uygulanan referans değer ve nanovoltmetre toleransının alt ve üst limitlerinin her seferinde belirlenmesi gereklidir. Örneğin nanovoltmetrenin 10 mV değerinde kalibrasyonu için bölücü girişine tam 1 V uygulanması durumunda bile, elde edilen çıkış gerilimi tam 10 mV olmayabilir. Ancak bölücü girişine kalibratörden uygulanan 1 V değeri bölücünün nominalden farkı kadar düzeltildiğinde, bölücü çıkışında tam 10 mV değeri elde edilebilir.

Nominal çıkış gerilimleri, V_g giriş gerilimini bölücünün nominalden farkı kadar düzeltilerek Formül (5)'de gösterildiği şekilde elde edilebilir.

$$\frac{V_g}{R_{nom}} = V_ç = \frac{V_g + V_g \frac{\Delta R}{R_{nom}}}{R}, \quad R = R_{nom} + \Delta R \quad (5)$$

R_{nom} nominal bölüm oranıdır (örneğin, 10^2 V/V). Ayrıca Formül (5) kullanılarak düzeltme yapılması, kalibratörün doğrusallığının nanovoltmetre doğrusallığından daha iyi olması nedeniyle daha uygundur.

Bir, nanovoltmetrenin düşük gerilim bölücü ile kalibrasyonu aşamaları Tablo 5'de verilmiştir. Bu kalibrasyon için model fonksiyon Formül (6)'da tanımlanmıştır.

Tablo 5. Nanovoltmetrenin bölücü ile kalibrasyon aşamaları

| No | İşlem | Elde Edilen Veri |
|----|---|------------------|
| 1 | Bölüm 3'deki yöntemle bölücünün bölüm oranını hesaplayınız. | R |

| No | İşlem | Elde Edilen Veri |
|----|--|--|
| 2 | Hesaplanan bölüm oranını kullanarak bölücünün düzeltilmesini bağıl olarak hesaplayınız. | $\frac{\Delta R}{R_{nom}} = \frac{R - R_{nom}}{R_{nom}}$ |
| 3 | Şekil 1b'deki ölçüm sistemini kurunuz. Nanovoltmetreye kalibre edileceği 1 mV - 50 mV aralığındaki gerilim değerinin 10^2 katını (V_g) kalibratörden uygulayınız. Kalibratörü bulunduğu ölçüm bölgesinde kilitleyiniz. | - |
| 4 | Isıl denge için yeterli süre (en çok 5 min) bekleyiniz, sonra kalibratörden 0 V uygulayınız ve nanovoltmetre ofset düzeltilmesini uygun şekilde yapınız. | - |
| 5 | Tekrar 3. adımda ayarlanan gerilimi uygulayınız. Bu gerilimi 2. adımda elde edilen değer kadar düzeltiniz. | - |
| 6 | Nanovoltmetre okumasını kaydediniz. | V_{ix} |

$$E = V_{ix} + \delta V_{ix} - \frac{V_g + V_g \frac{\delta R}{R} - \delta V_g + \delta V_{gd} + \delta V_F}{R} - \delta V_R \quad (6a)$$

$$E = V_{ix} + \delta V_{ix} - \frac{V_g + \delta V_g + \delta V_{gd} + \delta V_F}{R_{nom}} - \delta V_R \quad (6b)$$

| Sembol | Açıklama |
|-----------------|--|
| E | Nanovoltmetrenin V_g/R_{nom} değerindeki hatasıdır. Nanovoltmetre hatası, Formül (5) kullanılarak, Formül (6a) veya (6b) ile ifade edilir. Formül (6a) Tablo 5'deki işlemlere tam karşılık gelirken, Formül (6b) belirsizlik hesaplamalarında kolaylık sağlamaktadır. |
| V_{ix} | 6. adımda nanovoltmetre ile alınan en az 10 adet ölçümün ortalamasıdır. Bu değer belirsizliği alınan tekrarlı ölçümlerin standart sapmasından yararlanarak hesaplanır. |
| δV_{ix} | Nanovoltmetrenin sonlu çözünürlüğünden kaynaklanan hatasının düzeltilmesidir. Bu değer belirsizliği nanovoltmetre çözünürlüğünün yarısıdır. |
| V_g | Bölücü girişine uygulanan kalibratör göstergesindeki gerilim değeridir. Bu değer, genelde kalibratörün kalibre edildiği değerlerden farklı bir değerdir. Kalibratörün lineer olması durumunda bu değer sertifikasından elde edilecek düzeltme değeriyle (δV_g) düzeltilcektir. V_g değerinin belirsizliği kalibratörün doğrusal davranış göstermesi ile ilgilidir. |
| δV_g | Kalibratörde ayarlanan V_g gerilimindeki kalibrasyon ile elde edilen düzeltme değeridir. Kalibratörün sertifikasından elde edilebilir. Toleranslarının içinde olduğunu bilinen kalibratörün düzeltilmesi, sıfır olarak kabul edilebilir. Ancak bu durumda δV_g belirsizliği üretici firma toleransları olarak alınmalıdır. Kalibratörün üreticisi tarafından beyan edilen toleransları kalibratörün doğrusallık belirsizliğini de içerdiğinden, bu durumda doğrusallık belirsizliğini ayrıca değerlendirmeye gerek yoktur. |
| δV_{gd} | Kalibratörde ayarlanan değer (V_g) zamanla kaymasından kaynaklanan düzeltmedir. Bu değer cihazın zamana bağlı regresyon sonuçlarından elde edilebilir. Bu değer kalibratörün çeşitli zamanlarda gerçekleştirilmiş kalibrasyon sonuçlarından regresyon yöntemi ile elde edilebilir. Kayma düzeltilmesi, belirsizliği üretici firma toleransları alındığında, daha ileri bir analiz yapmadan sıfır olarak kabul edilebilir. |

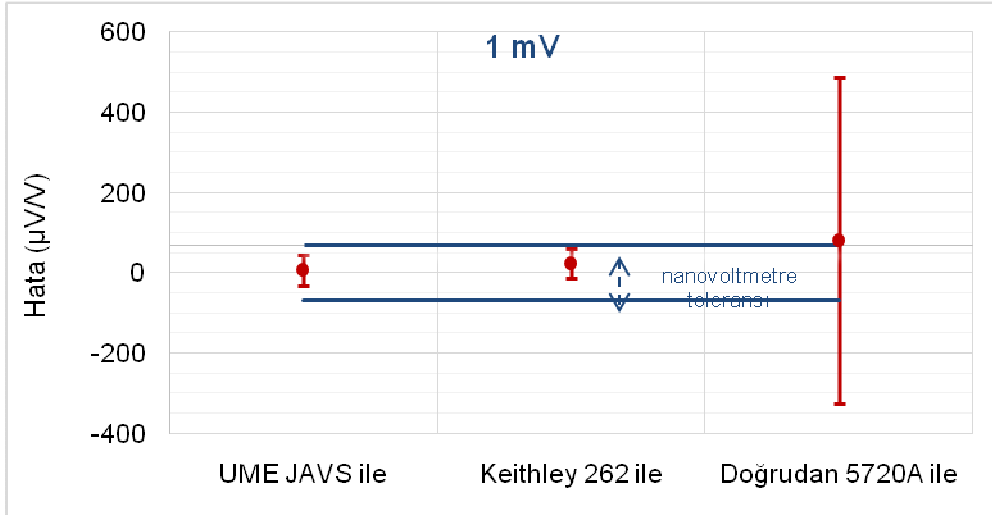
| Sembol | Açıklama |
|--------------|--|
| δV_P | Kalibratörün V_g gerilimindeki gürültüsüdür. Bu düzeltme değeri, belirsizliğe etkisini model fonksiyonda belirtmek suretiyle, sıfır olarak kabul edilebilir. Kalibratör üreticisinin toleranslarının belirsizlik bileşeni olarak kullanıldığı durumlarda, kalibratör gürültüsünü ayrıca değerlendirmeye gerek yoktur. Ancak ölçüm süresinin yeterince uzun olmadığı ve üretici firma toleranslarının belirsizlik bileşeni olarak kullanılmadığı durumlarda, mV seviyesindeki gerilimler için kalibratör gürültüsünü ayrıca değerlendirmek uygun olacaktır. |
| R_{nom} | Bölücünün nominal bölüm oranıdır. Bu bölüm oranının nominalden farkı Bölüm 3'de açıklandığı gibi belirlenir ve Formül (6b) kullanılarak düzeltilir. Bu durumda R_{nom} belirsizliği Bölüm 3'de R bölüm oranı belirsizliği kadardır. |
| δV_R | Bölücü içindeki dirençlerin ısınmaları nedeniyle direnç değerleri ve dolayısıyla da bölücünün bölüm oranı değişir. δV_R bölüm oranında oluşan bu hatalarının çıkış geriliminden düzeltmesidir. Bu düzeltme 0 V kabul edilirken, belirsizliği ise şu şekilde belirlenir: Bölücü girişleri uygun şekilde kısa devre edilerek bölücü çıkışı nanovoltmetre ile ölçülür. Bölücü üzerinde sıcaklık değişimi oluşturulur [1]. 2 °C sıcaklık değişiminin 1 saat sürecek bir ölçüm süresince en çok 10 nV'luk bir belirsizlik getireceği öngörülebilir. |

Tablo 6'da, Formül (6b) kullanılarak, üç farklı referans kalibratör ile kalibre edilen bölücü kullanılarak kalibre edilen nanovoltmetre için kalibrasyon belirsizlikleri verilmiştir.

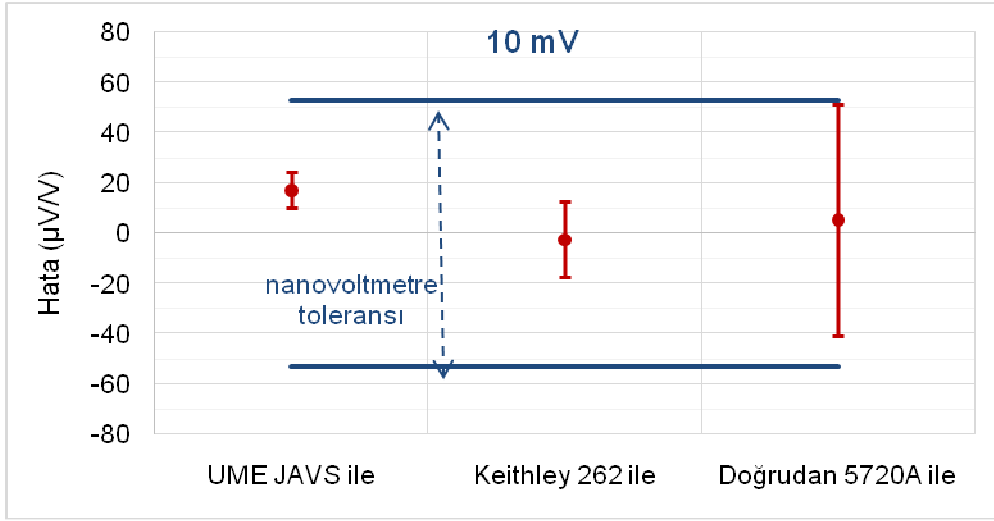
Tablo 6. Kullanım öncesinde kalibre edilen bölücü ile nanovoltmetre kalibrasyon belirsizlikleri

| Kullanılan Kalibratör | Nominal Gerilim | Belirsizlik |
|---|-----------------|-------------|
| FLUKE 5720A Düzeltilmeleri ve yıllık kayması bilinen | 10 mV | 6,6 ppm |
| | 1 mV | 25 ppm |
| FLUKE 5720A Düzeltilmeleri bilinen | 10 mV | 15 ppm |
| | 1 mV | 25 ppm |
| Fluke 5700A Düzeltilmeleri bilinen | 10 mV | 20 ppm |
| | 1 mV | 25 ppm |

Şekil 2 ve Şekil 3'de HP 3458A multimetrenin sırasıyla 1 mV ve 10 mV değerlerindeki, üç farklı yöntem ile alınan kalibrasyon sonuçları verilmektedir. Bu yöntemler, multimetrenin Josephson Gerilim Standardı kullanılarak, doğrudan Fluke 5720A kalibratör kullanılarak ve Keithley 262 bölücü kullanılarak ölçülmesidir.



Şekil 2. 1 mV değerlerinde üç farklı yöntem ile alınan HP 3458A kalibrasyon sonuçları



Şekil 3. 10 mV değerlerinde üç farklı yöntem ile alınan HP 3458A kalibrasyon sonuçları

HP 3458A'nın düşük gerilimlerdeki kısa dönem kararlılığı bir nanovoltmetrenin kararlılığı kadar iyi değildir. Bu nedenle Şekil 3'de verilen ölçümler için Tablo 6'da öngörülen belirsizlikler elde edilememiştir.

5. SONUÇ

DC gerilim ölçer veya nanovoltmetrelerin düşük gerilim ölçümleri için (< 50 mV) kalibratör doğrulukları yeterli olmamaktadır. DC gerilim ölçerlerin düşük gerilim değerlerinde JGS ile kalibre edilmesi oldukça maliyetlidir. Düşük gerilimlerdeki kalibrasyonun bir düşük gerilim bölücü kullanılarak gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu bölücü izlenebilirliğinin, oldukça zahmetli bir kalibrasyon olan referans gerilim bölücü ile yılda bir kalibre edilmesi yerine, her kullanımı öncesinde kalibratör ve nanovoltmetre kullanılarak daha kolay sağlanması mümkündür. Bu yöntem ayrıca, nanovoltmetre kalibrasyonunda, bölüm oranının zamanla kaymasından gelen belirsizlik bileşenini de ortadan kaldırmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] "Keithley 262 Low Thermal Voltage Divider Instruction Manual", Keithley Instruments, 1982
- [2] "Datron 4902/S & 4901 Voltage Divider and Calibration Bridge/Lead Compensator, User's Handbook", Datron Instruments, 1986
- [3] "FLUKE 752A Reference Divider Instruction Manual", FLUKE Corporation 1993
- [4] "FLUKE 720A Kelvin Varley Voltage Divider Instruction Manual", FLUKE Corporation 1981
- [5] "Agilent 34420A Novolt/Micro Ohm Meter, User's Guide", Agilent Technologies, 1994

ÖZGEÇMİŞ

Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK

1978 yılı Kırcaali/Bulgaristan doğumludur. 2001 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2002 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarı'nda araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme ABD'da "Yüksek Doğruluklu Kalibratörlerin AC İşaret Kaynağının Doğrudan Sayısal Sentez Tekniği İle Gerçekleştirilmesi" konulu yüksek lisans çalışmasını tamamlamıştır. Halen UME Gerilim Laboratuvarında birincil seviyede gerilim ve akım standartların oluşturulması, muhafazası ve kalibrasyonu konularında çalışmaktadır. Uzmanlık alanı DC ve düşük frekans gerilim, akım ve direnç ölçüm/kalibrasyonları, belirsizlik hesaplamalarıdır.

Saliha TURHAN

1970 yılı İzmit doğumludur. 1992 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 1993 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde Elektronik-Haberleşme alanında yüksek lisans çalışmasını tamamlamıştır. Halen UME Gerilim Laboratuvarında birincil seviyede gerilim ölçüm standartların oluşturulması, muhafazası ve kalibrasyonu konularında çalışmaktadır. Aynı zamanda UME Kalite Yönetim Temsilcisi Yardımcısı olarak görev yapmakta olup, TÜRKAK Laboratuvar akreditasyonu denetimlerinde baş denetçi ve denetçi olarak görev almaktadır. Uzmanlık alanı DC ve düşük frekans gerilim, akım ve direnç ölçüm sistemleri, ölçüm/kalibrasyonları, belirsizlik hesaplamaları ile TS EN ISO/IEC 17025 standardı uygulamalarıdır.