

# PROGRAMLANABİLİR JOSEPHSON GERİLİM STANDARDI KULLANILARAK GERİLİM ÖLÇER VE YARI-İLETKEN GERİLİM STANDARDI KALİBRASYONU

Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK  
Sarp ERTÜRK  
Ali TANGEL  
Mehedin ARİFOVİÇ

## Özet

Bu çalışmada UME'de kurulan Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı gerilim ölçer ve yarı-iletken gerilim standardı kalibrasyonunda kullanılmıştır. Ölçümlerin kuantum durumunu araştırmak için kullanılan matematik ve geliştirilen yazılım araçları sunulmuştur. Ölçümlerin model fonksiyonları ölçüm devresindeki artık devre elemanlarını ve gürültüleri de kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Ölçümlerin belirsizliği model fonksiyonlar kullanılarak değerlendirilmiş ve belirsizlik bütçeleri ayrıntılarıyla verilmiştir. Bu çalışmalardan yararlanarak Programlanabilir Josephson ile yapılan kalibrasyonlar ile Geleneksel Josephson Standardıyla yapılan kalibrasyonlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilim, Josephson Gerilim Standartları, Statik Kazanç, Yarı-iletken Gerilim Standardı, Gerilim ölçer

## ABSTRACT

In this study, the Programmable Josephson Voltage Standard established in UME is used for calibration of voltmeter and semiconductor voltage standard. Mathematical and developed software tools used to investigate the quantum state of the measurements are presented. The model functions of the measurements are created by covering stray circuit elements and noise in the measuring circuit. The uncertainty of the measurements is evaluated using model functions and detailed uncertainty budgets are given. Benefitting from the presented study Calibrations made by Programmable Josephson standards are compared with those made by Conventional Josephson Standards.

## 1. GİRİŞ

1962'de, Brian Josephson, cooper çiftlerinin iki süper iletken arasına yerleştirilmiş ince bir yalıtkan engelin içinden tünellendiğinde, kendine özgü davranışlarını eşitlik (1)'deki gibi öngörmüş [1] ve 1963'te Josephson'un teorisi kanıtlanmıştır [2], [3]. İlerleyen yıllarda gerilimin, frekansın ve fiziksel sabitlerin bir tamsayı çarpımı ile orantılı olduğu gerilim-frekans ilişkisini kanıtlayan birçok deney [4] yapılmıştır. Deneyler, denklemin birleşme yerinin geometrisinden ve malzemesinden, mikrodalga ve manyetik alanın gücünden bağımsız olduğunu göstermiştir [4]. Bu denklemde  $V_J$ , Şekil 1'de gösterilen Josephson Eklemleri (JE) uygun dc ve ac akımlar ile sürüldüğünde (öngerilimlendiğinde) eklem üzerindeki gerilim düşümdür.  $f$ ,  $h$  ve  $e$  sırasıyla ; AC akımın frekansı, Plank ve elektron yükü sabitleridir ve  $n$  bir tam sayıdır. Böyle bir denklemin varlığı, frekans büyüklüğünün doğruluğu ve kararlılığında gerilim birliği vaat etmekteydi.

$$V_J = n \cdot f \cdot h / 2e$$

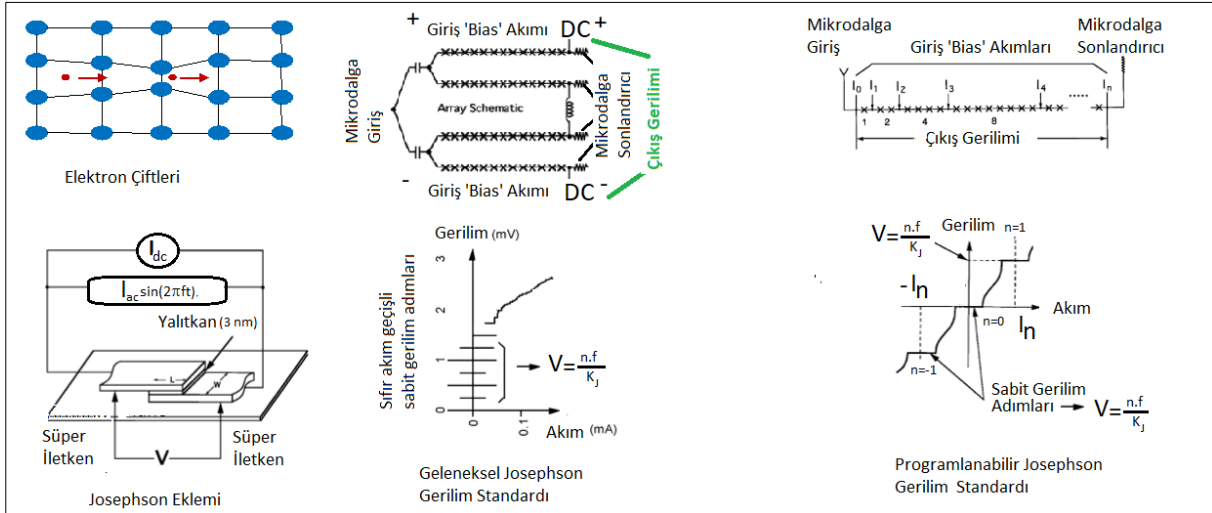
$$(V) \quad (1)$$

Bu denklemin kanıtı metrologları, Josephson sabiti ( $K_J$ ) olarak bilinen  $2e/h$  sabitini ölçmeye teşvik etmiştir.  $K_J$ 'nin 20 Mayıs 2019 tarihine kadar kullanılan değeri, 1990'da 0,4 ppm belirsizliği olan bir karşılaştırmanın ardından kabul edilmiştir ve  $K_{J-90}$  ile belirtilmiştir [5], [6]. Bu mutlak belirsizliğine rağmen,  $K_{J-90}$  için sabit bir değer kabul edilmesi, dünyadaki gerilim birliğini ilk önce tek Josephson Eklemleri (JE) ile 0,01 ppm seviyesine, seri bağlı JE dizileri ile 0,001 ppm seviyesine çıkarmıştır [7].

JE'lerini seri bağlamak, osilasyonları sönmülmemiş/zayıfça-sönmülmüş kapasitif JE'lerinin kullanılmasıyla mümkün olmuştur. Bu tür eklemlerle, Şekil 1'deki dc akım sıfır iken eşitlik (1)'deki  $n$ 'nin tam sayı katlarında ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) gerilim adımlarını gözlemlemek mümkündür [8]. 1981'de, aynı elektriksel özelliklere sahip eklemlerin üretilmemesi nedeniyle, bu sıfır akım geçişli gerilim adımlarına sahip eklemler (Şekil. 1, eklemin akım-gerilim eğrisi) Josephson Gerilim Standartları (JGS) teknolojisine olanak tanımış ve Geleneksel JGS (GJGS) olarak adlandırılmıştır. Dünya genelinde 50'den fazla GJGS kullanılmıştır [9]. Geleneksel JGS'nin doğal ancak istenmeyen iki etkisi vardır. Bunlar: 1) Farklı adımlar arasında hızlı bir şekilde değişiklik yapmak mümkün değildir ve 2) gürültü bazen adımları rastgele değiştirmektedir [7].

1995 yılında, Programlanabilir JGS (PJGS) olarak adlandırılan Şekil 1'deki eklemin dc akımı değiştirilerek farklı gerilim adımları elde edilen kararlı başka bir JGS türü önerilmiştir [7]. Bu standartta, JE'lerinin osilasyonları sönmülmüştür ve eşitlik (1)'deki  $n$ , 0 ya da  $\pm 1$  olabilmektedir. JE dizilerinin gruplanmasıyla ve DC akımının gruplanan bölümlerde bağımsız olarak kontrol edilebilmesiyle farklı kuantum gerilimleri üretilmiştir. 1995'te eklem üretiminde ve mikrodalga güç dağıtım teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle PJGS teknolojisi mümkün olmuştur [7].

Bu yeni standart, GJGS'nin istenmeyen ancak bu standardın doğal özelliği olan iki problemini çözmektedir. PJGS'nin bir kuantum adımından diğerine hızlı geçme yeteneği nedeniyle adım basamak yaklaşımıyla kuantum dalgalar da sentezlenebilmektedir.



**Şekil 1.** Cooper Çiftleri, Josephson Eklemi, Eklemin Önegrilimlenmesi, ve Akım-Gerilim Eğrileri [5][11]

20 Mayıs 2019 tarihi itibarıyla  $K_J$  sabitinin daha düşük belirsizlikle belirlenmiş yeni değeri kullanıma alınmıştır [10]. Bu değer bir dizi ölçüm sonucunda büyüklüğü belirlenen plank sabiti ve elektron yükünün değerleri kullanılarak elde edilmiştir [11]. Her enstitünün ölçebilme yeteneklerini gösteren CMC'lerdeki (Capability of Measurement Capacity) gerilim büyüklükleri bu değişimden etkilenmeyecektir çünkü, CMC'lerde nadiren  $K_J$ 'nin mutlak değerinin kullanıldığı elektriksel ölçümler vardır [11].

## 2. SİSTEM BİLEŞENLERİ

PJGS'nin kalbi, aşırı sönmülmüş JE'leri, çip üstü kapasiteler ve mikrodalga dağıtım mimarisinden oluşan Süper-iletken Tüm-Devredir (STD) [12]. Entegre devre Q-Wave ve QuADC [20] projelerindeki iş-birliği içinde PTB'den (Almanya Metroloji Enstitüsü) ödünç alınmıştır. Tümdevrede, süper iletken olarak Neobyum (Nb) kullanılmıştır. Nb'nin süper iletkenlik sıcaklığı 9.2 K'dır. 9.2 K'ın altındaki sıcaklık ortamı, bir Dewar'daki sıvı helyum tarafından sağlanmıştır. Dewar, bir dış vakum katman ve içi sıvı helyum olan bir diğer katman olmak üzere iç içe kaplardan oluşan sıcaklık yalıtımlı bir kaptır. Helyum gazının sıvılaştığı sıcaklık 4.2 K'dır.

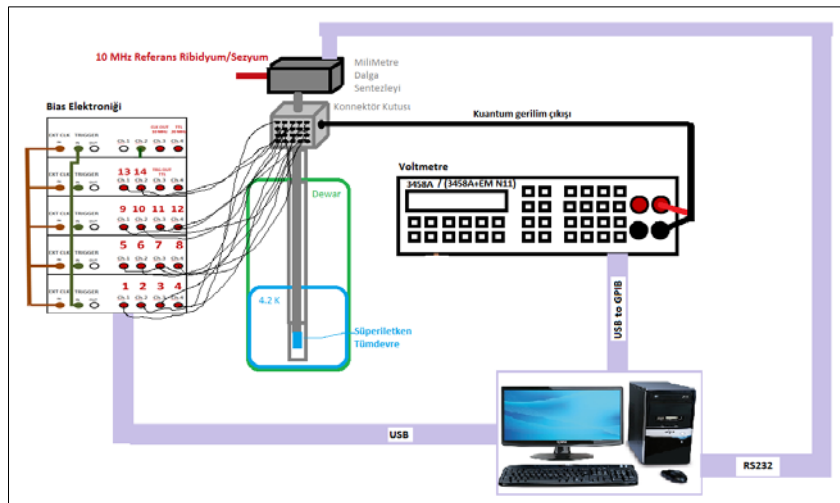
Şekil 2'de gösterilen bir taşıyıcı üzerindeki entegre devre, prop adı verilen bir aygıt ile sıvı helyum içine daldırılır. Bu prop [14]'de anlatıldığı gibi UME'de üretilmiştir. Proben görevi, STD'yi sıvı helyum içine batırmanın yanı sıra, Şekil 1'de gösterilen ac ve dc akımları STD'ye iletmektir. Süperiletkenliğin dış manyetik alanlardan etkilenmesini önlemek için, STD manyetik bir kalkan ile çevrelenmiştir.

Mikrodalga kaynak, Şekil 1'de gösterilen yüksek frekanslı ac işaretleri uygular. Adımların kararlı çalışması için STD antenine ulaşması gereken mikrodalga güç, yaklaşık 50 mW civarındadır. Mikrodalga kaynağının fazını kitlemek ve böylece frekans doğruluğunu arttırmak için kararlılığı yüksek olan bir rubidyum veya sezyum osilatör kullanılır. Şekil 3'deki resimde görülen mikrodalga kaynak [14]'de anlatıldığı gibi TÜBİTAK bünyesinde üretilmiştir.

Şekil 1'de gösterilen dc akım, her bir JE dizisi için ön-gerilimleme ('bias') elektroniği tarafından sağlanır.

Kullanılan STD'de 14 bağımsız JE dizisi vardır. Akım-elektroniği de 14 adet farklı kanala sahiptir. Her bir kanal, kısa dönem kararlılığı 30  $\mu\text{V/V}$  olan gerilim üreteçleri ve her bir gerilim üretecine seri bağlı 50  $\Omega$  değerindeki dahili dirençlerden oluşur ve [14]'de ayrıntılarıyla anlatıldığı gibi kalibre edilir. Bu akım elektroniği içinde yer alan her bir kanala ayrılmış özel hafızalar kullanılarak, aynı anda herhangi bir şekilde sahip olan işaretler üretilebilir. Her kanal 50  $\Omega$  yükte 12 V tepe tepe gerilimi sağlayabilmektedir. Elektroniğin yazılım aracılığıyla kontrolü, Şekil 2'de gösterildiği gibi optik olarak izole edilmiş bilgisayar bağlantısı üzerinden sağlanmaktadır. PJGS kontrol yazılımı, LabView uygulama geliştirme programı kullanılarak UME'de yazılmıştır. [14]'de yazılımın kullandığı formüller verilmiştir ve aynı zamanda STD ve akım-elektroniğinden oluşan devre üzerinden bu formüllerin nasıl elde edildiği anlatılmıştır.

Üretilen Josephson geriliminin kuantum adımı olup olmadığını kontrol eden 28 bitlik bir multimetre (gerilim ölçer) de sistemin bir parçası olarak kullanılır. Bilgisayardaki yazılım her bir kanalın gerilimini hesaplar ve hesaplanan gerilim bilgilerini DAC'lardan oluşan ön-gerilimleme (akım) elektroniğine yükler, multimetre ise ölçüm verilerini alır. Bilgisayar, akım-elektroniği ve multimetre arasındaki iletişim, uzun mesafeli bilgisayar iletişimi için üretilmiş olan optik 'hub'lar kullanılarak gerçekleştirilir. Sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kurulan Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı Sistemi

### 3. GERİLİM ÖLÇER KARAKTERİZASYONU

Ölçümlerin alınmasının ilk adımı PJGS sistemini hazırlamaktır. Hazırlık işlemleri ayrıntılarıyla [14]'de verilmiştir ve 'bias' elektroninin kalibrasyonu, çipin soğutulması, her soğutmaya özgü olabilen uygun mikrodalga frekans ve gücün bulunması, bulunan optimum mikrodalga frekansına ve gücüne bağlı olarak değişen her bir eklem grubunun (segmentin) ön-gerilileme ('bias') akımlarının bulunması ve bu akımların yazılıma girilmesinden oluşmaktadır. Bu akımlar, her bir eklem dizisi için, Şekil 1'de gösterilen I-V eğrilerindeki gerilim adımlarının akım eksenindeki orta noktalarıdır ve ' $I_{n\_ideal}$ ' sembolü ile bu bildiride gösterilmiştir. Bu işlemlerden sonra sistem, kullanıma hazırdır.

#### 3.1. Kuantum Gerilim Adımlarının Kontrolü

PJGS sistemi bazen, STD üzerindeki manyetik akı tuzaklanmaları nedeniyle, kuantum gerilim adımlarını üretememektedir. PJGS ile üretilen tüm gerilim adımlarının kuantum doğrulukta olup olmadığı, sistemdeki gerilim ölçer kullanılarak kontrol edilebilir. Bu kontrol esnasında, gerilim ölçer de ayrıca kalibre edilmiş olur. Bu kontrol yazılım tarafından otomatik olarak aşağıdaki şekilde yapılır:

Gerilim ölçerin entegrasyon süresi 20 NPLC (Number of Power Line Cycles, Güç Hattının Periyot Sayısı) olarak seçilmiştir. Başka bir deyişle entegrasyon süresi 400 ms'dir. Şekil 3-a'da soldaki grafik, PJGS tarafından uygulanan ve gerilim ölçer tarafından ölçülen 64 adımlı üçgen bir dalgayı örnek sayısına bağlı olarak göstermektedir. Şekil 3 a)'da sağdaki grafik ise gerilim ölçerin ölçümlerine karşı ' $I_{segtrim}$ ' akımlarını göstermektedir. Bir segmente uygulanan bias akımının,  $I_{n\_ideal}$  akımlarından farkı  $I_{segtrim}$  olarak belirtilmiştir. Birçok makalede [15], bu fark akımı "trimcurrent", bazı makalelerde 'dithering' akımı olarak adlandırılmaktadır.  $I_{segtrim}$  akımlarındaki değişime karşı gerilim ölçerin değeri değişmiyorsa PJGS istendiği gibi kuantum durumunda çalışıyor demektir.

Hazırlanan yazılım ( $I_{segtrim}$ ) akımlarını değiştirmek için iki ek parametreye sahiptir. Bu parametreler akımların yinelenme sayısı (*yineleme sayısı*) ve akım adımdır ( $I_{yineleme\_adımı}$ ).  $V_n$  gerilimleri, her bir JE'leri dizisine, bağlı olduğu her bir gerilim üretici tarafından uygulanan gerilimdir. Yeni  $I_{n\_ideal}$  akımları Denklem 2 kullanılarak yeniden hesaplanır:

$$I_{n\_ideal_{yeni}} = I_{n\_ideal} - \left( \frac{yineleme\ sayisi}{2} \cdot I_{yineleme\_adımı} \right) \quad (2)$$

Gerilim ölçerin ölçümleri ( $V_{gerilim\ ölçer}$ ) kullanılarak o anlık  $I_{segtrim}$  akımları Denklem 3 ile hesaplanır.  $R_n$ , [14]'de anlatıldığı gibi ölçülen, n. gerilim üreticinin iç direncidir. Burada n en yüksek potansiyelli kanalın numarasıdır ve bu çalışmadaki değeri, [14]'de verilen STD ve bias elektroniji bağlantısı için 14'tür.

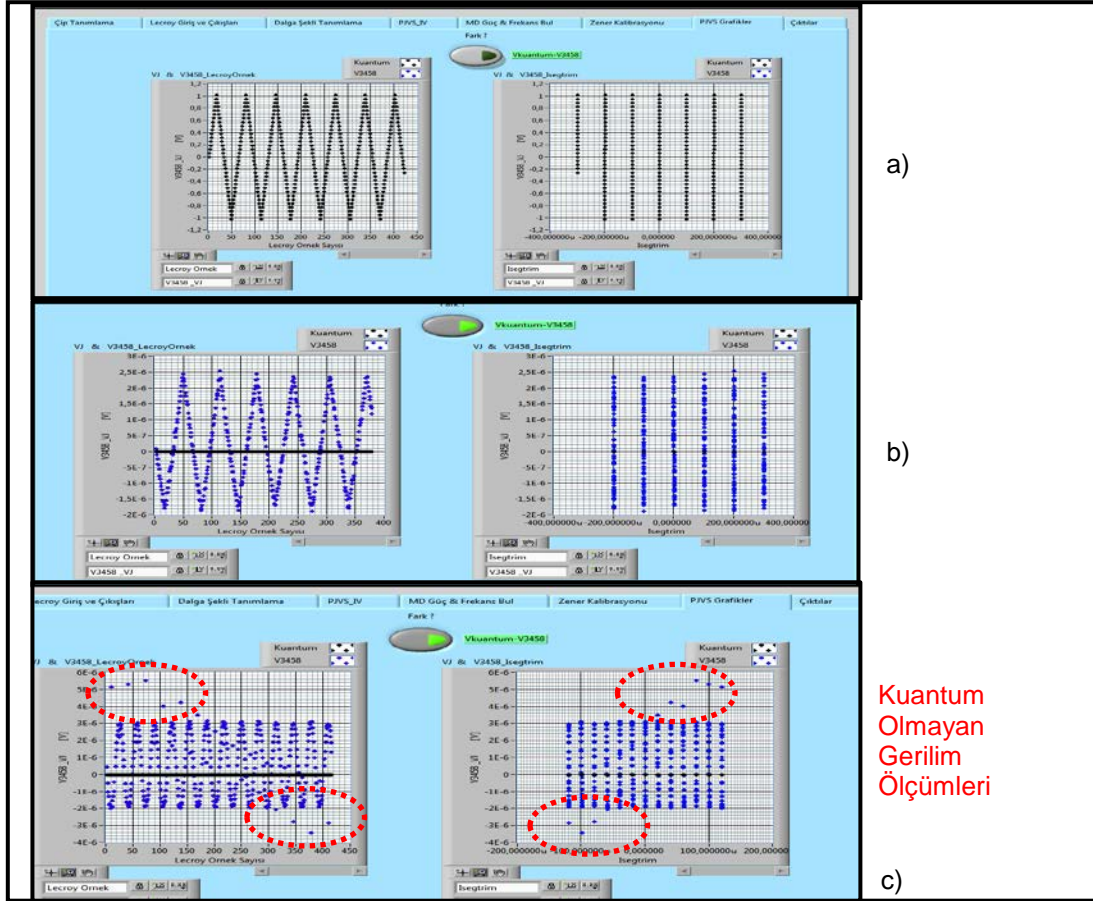
$$I_{segtrim} = \frac{V_n - V_{gerilim\ ölçer}}{R_n} - I_{n\_ideal} \quad (3)$$

Gerilim ölçer lineer davranıyorsa ve PJGS kuantum gerilimi uyguluyorsa, gerilim ölçer ile üretilen kuantum adımlar arasındaki fark işareti ( $V_{kuantum} - V_{3458}$ ), Şekil 3 b)'deki gibi uygulanan işaretin zarfını izlemelidir. Ek olarak,  $I_{segtrim}$  diyagramında ölçülen bir periyoda ait  $I_{segtrim}$  akımları arasındaki fark,  $\mu A$ 'dan küçük olmalıdır. Başka bir deyişle, tüm ölçüm sonuçları önceden belirlenmiş eğilimler içinde olmalıdır.

Bu fark işaretini incelemek için, yazılımda fark düğmesine basıldığında Şekil 3-b) ve c) ile gösterilen ölçüm desenleri gözlenir. Şekil 3. b)'deki desen PJGS'nin beklediği gibi kuantum gerilimlerini ürettiğini gösterir. Bununla birlikte, Şekil 3 c) 'deki bazı adımların kuantum olmadığı görülmektedir. Yazılımın bu arayüzü ile, daha ölçüm esnasında STD üzerinde, hatalı ölçümlerin alınmasına sebep olacak herhangi bir manyetik akının takılıp takılmadığını gözlemek mümkündür.

Şekil 4 'te, her periyod için, kuantum gerilim adımlarına karşılık gerilim ölçer ölçümleri arasında uydurulan doğrusal eğrilerin eğimleri (başka bir deyişle voltmetre kazancı), değişken  $I_{segtrim}$  akımları ve dalga formları için verilmiştir. Değişken  $I_{segtrim}$  ve kazanç arasında korelasyonun olmaması, PJGS sisteminin beklediği gibi kuantum seviyede çalıştığını gösterir. Her periyot için farklı  $I_{segtrim}$ 'e bağlı olarak elde edilen kazanç ölçümü, Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4'te gösterilen  $R^2$  parametresi

korelasyon ölçümüdür. Eğer korelasyon güçlü ise,  $R^2$ , 1'e eşittir.  $I_{\text{segtrim}}$  akımları ve kazanç arasındaki korelasyonun varlığı, Denklem 4 kullanılarak hipotez testi ile test edilebilir. Bu denklemde  $t_{\text{meas}}$  ölçülen t dağılımı ve  $t_{12;0,05}$ ; t dağılım tablosundan 0.05 katsayısı, yani % 95 olasılıklı 12 ölçüm sayısı (N) içindir.



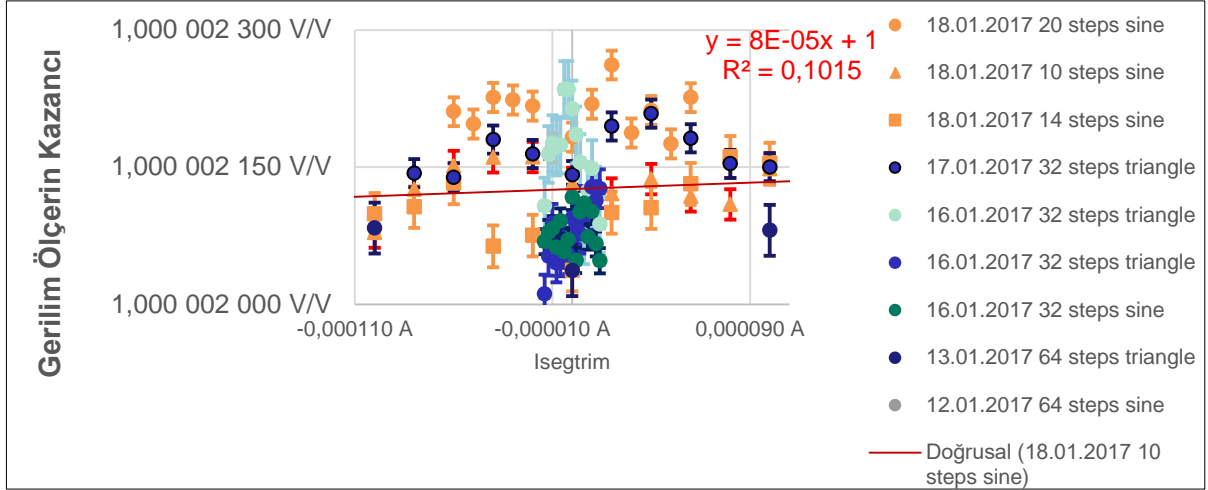
**Şekil 3.** Gerilim Adımlarının Kuantum Durumunu Ölçüm Esnasında Değerlendirmek İçin Hazırlanan Yazılımın Ara-yüzü

$$t_{\text{meas}} = \frac{R}{\sqrt{\frac{1-R^2}{N-2}}} = \frac{\sqrt{0,1015}}{\sqrt{\frac{1-0,1015}{12-2}}} \cong 1 < t_{12;0,05} = 1.771 \quad (4)$$

Sonuç olarak, Şekil 4'te ölçülen eğimin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir ve ölçülen kazanç kararsızlığı, gerilim ölçerden kaynaklanmaktadır. Gerilim ölçer kazancının Şekil 4'te verilen ölçümlerdeki A tipi belirsizliği en çok  $35 \text{ (nV / V) / (V / V)}$  (% 95'in kapsama faktörü) belirlenmiştir.

### 3.2. Ölçüm Prosedürüne Bağlı Ölçümün Model Fonksiyonunun Elde Edilmesi ve Ölçüm Belirsizliğinin Değerlendirilmesi

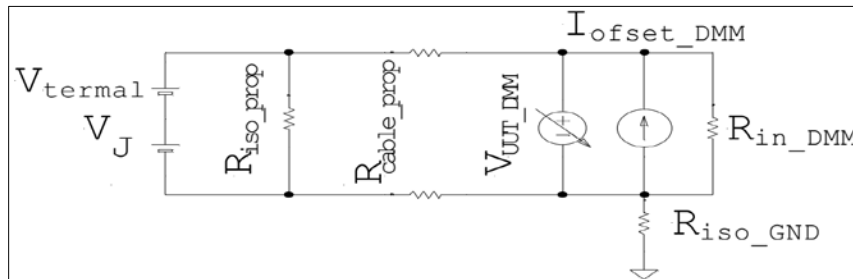
Ölçüm düzeneğinden kaynaklanan belirsizlikleri daha iyi tahmin edebilmek için, ölçüm devresindeki bütün artık devre elemanlarını içeren ölçümün elektrik devresi Şekil 5'da ve [16]'da verilmiştir. Şekil 5'deki devre elemanları için kullanılan semboller Tablo 1'de özetlenmiştir. Devre analizi teoremlerini kullanarak gerilim ölçerin terminallerine uygulanan gerilimin, Denklem 5'teki gibi devre elemanlarına bağlı olduğu bulunmuştur. Denklem 5'te  $\varepsilon_{\text{DMM}}$  voltmetrenin gürültüsüdür.



**Şekil 4.** Farklı  $I_{segrım}$  Ayarlarına ve Gerilim Dalgalarına Bağlı Ölçülen Kazanç

Şekil 5'de gösterilen  $V_{termal}$  gerilimi en çok 300 nV büyüklüğündedir ve 4.2 K sıcaklığındaki sıvı helyum ile 300 K sıcaklığındaki oda ortamı arasındaki büyük sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Farklı metaller bağlandığında meydana gelen See-back etkisi, bu kadar büyük bir gerilim farkının sebebidir. Bu etki, bütün JE eklemleri, Eşitlik (1)'deki  $n=0$  adımına ön-gerilimlendiği durumda ölçüm devresinin ofsetini ölçerek ortadan kaldırılır. Gerçek sonuç, her zaman biri ofset ölçümü olan iki ölçüm arasındaki farktır. Ardışık iki ölçümün arasındaki zaman ne kadar kısa olursa  $V_{termal}$  ve  $I_{ofset\_DMM}$  hata kaynakları o kadar başarılı bir şekilde ölçüm sonucundan bertaraf edilir.

Denklem 6, ölçülen  $V_{UUT\_i}$  değeri ve  $V_{UUT\_DMM}$  uygulanan değeri arasındaki fark olan gerilim ölçer hatasını temel alan ölçümün model fonksiyonudur. Burada  $V_{UUT\_i,0}$ ,  $V_J$  0 V iken, gerilim ölçer ile alınan ofset ölçümdür. Denklem 6'da verilen  $m_{I_{segrım}}$ ,  $I_{segrım}$  bağımlılığının varlığını tanımlayan eğimdir. Eğer korelasyon Denklem 4'teki gibi test edilirse ve test yanlıysa,  $m_{I_{segrım}}$  '0'a eşittir. Denklem 6'da verilen  $\delta V_{thermal}$  ve  $\delta I_{offset}$ , termal gerilimlerin ve multimetrenin ofset akımlarının  $V_J = 0$  ayarlı durumdayken alınan ofset ölçümü ile ölçümün yapıldığı kuantum gerilimi arasındaki değişimlerini temsil etmektedir. Ardışık iki ölçüm arasındaki sürenin kısa olması, ölçüm belirsizliğini düşürmektedir. Denklem 6'da görüldüğü gibi, gerilim ölçerin hatası, gerilim ölçerin ve termal gerilimlerin kısa süreli kararlılığından ve prop'in seri  $R_{cable\_prop}$  direncine bağlı olarak gerilim ölçerin giriş direncinden etkilenmektedir. Denklem 6, gerilim ölçerin herhangi bir ölçüm noktasında JGS ile kalibrasyonunun model fonksiyonudur. Bu model fonksiyon kullanılarak 1.018 V anma değerinde gerçekleştirilen kalibrasyona ait belirsizlik bütçesi Tablo 2'de verilmiştir. Bu model fonksiyondan da görüleceği gibi [16]'deki  $K_{J-90}$  sembolü yerine, sadece  $K_J$  sembolü 20 Mayıs 2019 tarihi itibarıyla kullanılmaya başlanmıştır.



**Şekil.5** Josephson Gerilim Standartlarıyla Gerilim Ölçer (DMM) Kalibrasyonunun Elektrik Devre Şeması

**Tablo.1** Bu Bildirideki Model Fonksiyonlarda ve Devre Şemalarında Kullanılan Semboller ve Açıklamaları

Josephson Sabiti	$K_J$
$n \pm 1$ durumundaki eklem sayısı	$N$
Shapiro adımı: 0, 1, -1	$n$
Josephson Gerilimi	
Mikrodalga Frekansı	$f$
Gerilim ölçer ile ölçülen fark	$V_{diff}$
30 s süresince ısı gerilim değişimi/farkı	$\delta V_{thermal}$
30 s süresince gerilim ölçerin ofset akımları değişimi/farkı	$\delta I_{offset}$
Voltmetrenin Giriş Direnci	$R_{in\_DMM}$
Voltmetreyi bağlamak için kullanılan kablunun izolasyon direnci	$R_{iso\_DMM\_cable}$
Prop boyunca kablo direnci	$R_{cable\_prop}$
Gerilim ölçer (DMM) girişlerine uygulanan gerilim	$V_{UUT\_DMM}$
Gerilim ölçer (DMM) ile ölçülen gerilim	$V_{UUT\_i}$
Gerilim ölçer (DMM) ile $V_J=0$ (başka bir deyişle $n=0$ ) iken ölçülen gerilim	$V_{UUT\_0}$
Gerilim ölçerin hatası	$\Delta E$
Yarı-iletken gerilim standardının giriş direnci	$R_{in\_UUT}$
Yarıiletken gerilim standardının gürültüsü	$\epsilon_{zener}$
Sayısal voltmetrenin gürültüsü (0.25 Hz'lik bant genişliğinde)	$\epsilon_{DVM}$
Her bir Josephson eklemeleri gurubu akımının $I_{n\_ideal}$ akımlarından farkı	$I_{segtrim}$
Ölçüm sonuçlarının $I_{segtrim}$ bağımlılığı	$m_{Isegtrim}$
Yarı iletken gerilim standardının, ölçüm sonucu/ gerçek değeri	$V_{UUT}$

$$V_{UUT_{DMM}} = V_J \frac{R_{in_{DMM}}}{R_{cable_{prop}} + R_{in_{DMM}}} + V_{thermal} \frac{R_{in_{DMM}}}{R_{cable_{prop}} + R_{in_{DMM}}} + I_{offset} \frac{R_{in_{DMM}} R_{cable_{prop}}}{R_{cable_{prop}} + R_{in_{DMM}}} + \epsilon_{DMM} \quad (5)$$

$$\Delta E = V_{UUT_i} - V_{UUT_{i_0}} - \left\{ V_J \frac{R_{in_{DMM}}}{R_{cable_{prop}} + R_{in_{DMM}}} + \delta V_{thermal} \frac{R_{in_{DMM}}}{R_{cable_{prop}} + R_{in_{DMM}}} + \delta I_{offset} \frac{R_{in_{DMM}} R_{cable_{prop}}}{R_{cable_{prop}} + R_{in_{DMM}}} + m_{Isegtrim} \cdot I_{segtrim} \right\}$$

$$; V_J = \frac{f \times N \times n}{K_J} \quad (6)$$

### 3.3 Yazılım Kontrolünde Gerilim Ölçerin Kazancı ve Toplam Doğrusalsızlık Hatasının Belirlenmesi

Gerilim ölçerin girişine uygulanan  $V_{UUT_{DMM}}[k]$  gerilimlerine karşı gösterdiği  $V_{UUT_i}[k]$  gerilimleri arasında Denklem 7 deki gibi doğrusal bir ilişkinin olması beklenir. ADC/Gerilim ölçerin karakterizasyonu, doğrusal ilişkinin eğimini başka bir deyiş ile gerilim ölçerin kazancının ( $m$ 'in) bulunmasıdır. Gerilim ölçerin kazancını bulmak için PJGS sistemi farklı şekillere sahip adım-basamak yaklaşımlı gerilim dalgaları üretecek şekilde programlanmıştır. Ardışık olarak bu gerilim adımları PJGS sisteminden uygulanmış ve gerilim ölçer ile bir ölçüm alınmıştır.

Denklem 7'deki 'k', bir periyotluk dalgadaki k. adımdır.  $m$ , gerilim ölçerin kazancı ve  $n$  uydurulan eğrinin ofsetidir. Yazım kolaylığı için  $V_{UUT_{DMM}} = V_R$  ve  $V_{UUT_i} = V_J$  gösterelim. Denklem 8, en küçük karesel hata yönetimi kullanılarak bulunan kazancın tanımıdır. Denklem 10'da ölçülen kazanç devre parametrelerine bağımlılığı verilmiştir. Eşitlik 10'daki  $\delta V_{thermal}$ , Eşitlik 6'dakinden farklı olarak ortalama  $V_{thermal}$  geriliminden farkı temsil etmektedir.

$$V_{UUT_i}[k] = m \cdot V_{UUT_{DMM}}[k] + n \quad (7)$$

$$m = \frac{\sum_{n=1}^N (V_R[k] - \bar{V}_R)^2 \cdot (V_J[k] - \bar{V}_J)^2}{\sum_{n=1}^N (V_R[k] - \bar{V}_R)^2} \quad (8)$$

$$V_R[k] - \bar{V}_R = K \cdot V_J[k] + K \cdot \bar{V}_J + K \cdot \delta V_{thermal} + K \cdot \delta I_{offset} \cdot R_{cable\_prop} \quad ; \quad K = \frac{R_{in\_DMM}}{R_{in\_DMM} + R_{cable\_prop}} \cong 1 \quad (9)$$

$$m = \frac{K \cdot \sum_{n=1}^N (V_J[k] - \bar{V}_J + \delta V_{thermal} + \delta I_{offset} \cdot R_{cable\_prop})^2 \cdot (V_J[k] - \bar{V}_J)^2}{K^2 \cdot \sum_{n=1}^N (V_J[k] - \bar{V}_J + \delta V_{thermal} + \delta I_{offset} \cdot R_{cable\_prop})^2} \quad (10)$$



**Tablo 2.** Gerilim ölçer kalibrasyonu için belirsizlik bütçesi

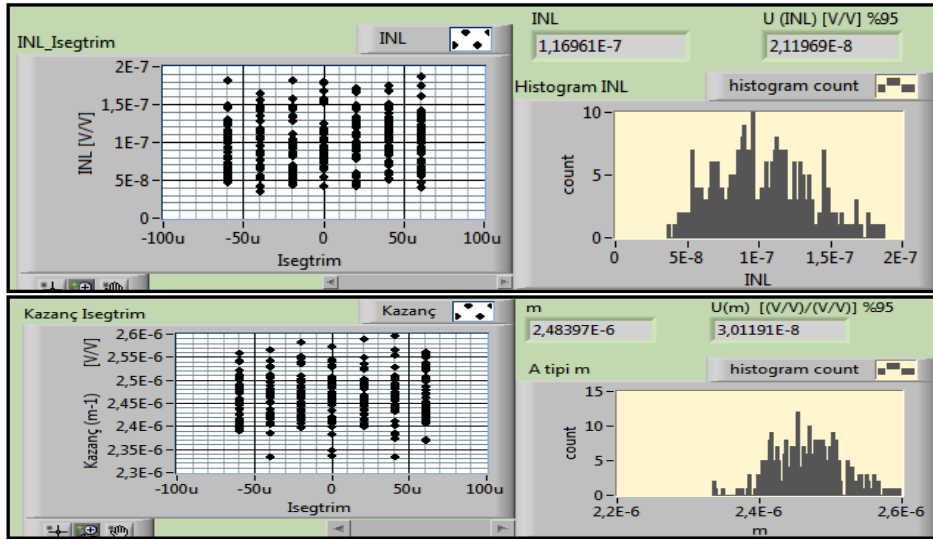
Model Fonksiyonu ndaki Sembölü	Tahmini Değeri (Xi)	Standart Belirsizlik u(Xi)	Olasılık Dağılım Fonksiyonu	Duyarlılık Katsayısı	Belirsizlik Katkısı u(yi)
$K_J$	483597,848417 GHz/V				
N	7034				
n	1				
f	70,00000000 GHz	< 0,000000010 GHz	Normal	0,014545143 V/GHz	< 0,1 nV
$V_J$	1,01816003 V	< 0,1 nV	Normal	-1,00 $\Omega/\Omega$	< 0,1 nV
$\frac{V_{UUT\_i}-V_{UUT\_0}}{V_{UUT\_0}}$	1,01815992 V	< 10,0 nV	Normal	1	< 10,0 nV
$\delta V_{\text{termal}}$	0,00000000 V	< 0,6 nV	Dikdörtgen	-1,00 $\Omega/\Omega$	< 0,6 nV
$\delta I_{\text{ofset}}$	0,00000 A	< 0,03000 nA	Dikdörtgen	$\sim 4 \Omega$	< 0,1 nV
$R_{\text{in\_DMM}}$	$\sim \infty \Omega$	> 10 G $\Omega$	Dikdörtgen	0,00 V/V	< 0,0 nV
$\epsilon_{\text{DMM}}$	0 nV	< 2,0 nV	Dikdörtgen		< 2,0 nV
$R_{\text{cable\_prop}}$	0 W	< 4 $\Omega$	Dikdörtgen	0,02 nV/ $\Omega$	< 0,1 nV
$I_{\text{segtrim}}$	0,00000 nA	< 120,0 $\mu\text{A}$	Dikdörtgen	0,000007 V/A	< 0,0 nV
$m_{\text{segtrim}}$	0,00000 (V/V)/A	0,00001 (V/V)/A	Dikdörtgen	0,00012 A	< 0,0 nV
$\Delta E$	<b>-0,000000110 V</b>	Birleşik standart belirsizlik ( $1 \sigma$ )			< 10,2 nV
		Genişletilmiş Belirsizlik			< 20 nV
		Genişletilmiş Bağlı Belirsizlik			< 20 nV/V

Gerilim ölçerin kazancı, bir periyot için alınan ölçümlerle kuantum ölçümler arasında uydu edilen eğrinin eğiminden elde edilir. Bir periyoddaki kuantum adımlarının sayısı daha az olursa, örnekler arasındaki kısa süre nedeniyle  $\delta V_{\text{thermal}}$  ve  $\delta I_{\text{offset}}$ , büyüklükleri sıfıra yaklaşır. Bir periyottaki adım sayısı değiştirilmiş ve kazanç tahmini için 4, 8, 10, 20, 32, 64 ve 100 örneklili kuantum dalgalar kullanılmıştır. A tipi belirsizlik, 4-20 örneklili dalgalar için, 100 örnekliliye göre daha küçüktür.

İntegral alma prensibi ile çalışan bir ADC'ye sahip olan gerilim ölçerin kazancı; 64 adım, 32 adım, 20 adım, 10 adım ve 8 adım sinüs ve üçgen dalga formlarıyla karakterize edilmiştir. Gerilim ölçerin kazancı, kuantum dalgaların adım sayısından ve dalga şekline göre, Şekil 4'de görüldüğü gibi bağımsızdır.

Bir ADC'nin Toplam Doğrusalsızlık Hatası (INL, Integral NonLinearity), ADC ile ölçülen gerilimler ile uygulanan gerilimler arasında uydu edilen doğrusal eğriden en büyük sapma olarak tanımlanır ve belirlenen en büyük hatanın gerilim ölçerin kullanılan ölçüm bölgesine bölümü olarak beyan edilir. PJGS ve gerilim ölçer bilgisayar kontrolünde çalıştırılmış ve ardışık olarak 100 periyodun üzerindeki kuantum dalgalarla gerilim ölçerin kazancı ve INL hatası belirlenmiştir. Her bir periyot için, kazanç ve INL hataları Şekil 7'de gösterildiği gibi bir istatistik dağılıma sahiptir. Yine yazılım kontrolünde bu dağılımın A tipi belirsizliği ve ölçüm sonucu belirlenmektedir. 1 V ölçüm aralığında gerilim ölçerin INL hatası (<0,12 ppm) olarak belirlenmiştir. Bu ölçüm sonucu aynı model gerilim ölçerin 10 V ölçüm bölgesi için [4]'de GJGS kullanılarak belirlenen (<0,12 ppm) INL hatası dahilindedir. Geliştirilen yazılım kontrolünde PJGS ile hızlı yapılan bu ölçümler  $\delta V_{\text{thermal}}$  ve  $\delta I_{\text{offset}}$ , hata kaynaklarından kaynaklanan belirsizlikleri azaltmıştır.



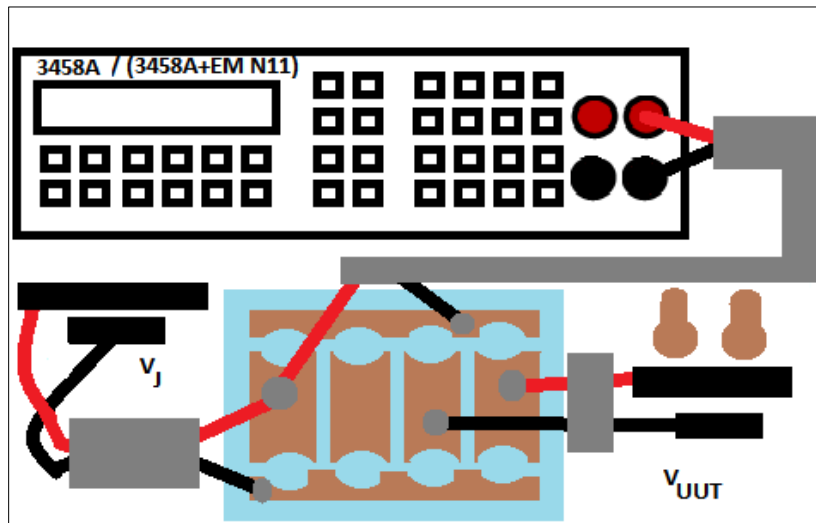


Şekil.7. Gerilim ölçerin statik kazancı ve ölçülen kazancın ve INL'nin ölçüm anındaki histogramları

#### 4. YARI-İLETKEN GERİLİM STANDARDI KALİBRASYONU

TÜBİTAK UME'de Yarı-iletken Gerilim Standartları Geleneksel JGS standartlarına izlenebilir. Kurulan PJGS ile Geleneksel JGS [16]'de yarı-iletken gerilim standartları aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Bu bildiri de bu karşılaştırmaya ait daha ayrıntılı belirsizlik bütçesinin verilmesi hedeflenmiştir. Ölçüm belirsizliğini etkileyen önemli bileşenler ve bu bileşenlerin belirlenmesine değinilmiştir.

İki gerilim kaynağı termal blok aracılığıyla Şekil 8'deki gibi birbirine bağlanmıştır. Termal blok Şekil 8'de kahve renkli olarak gösterilmiştir, bakır külçeden yapılmıştır ve bir anahtar görevini görmektedir. Bakırın tercih edilmesinin sebebi sıcaklık iletkenliğinin yüksek olmasıdır. Kütesinin büyük olmasının nedeni ise ani sıcaklık değişimlerine engel olmaktır. Bakır külçelerden yapılmış silindirler aracılığıyla termal blok üzerinde,  $V_{UUT}$  sembolüyle gösterilen yarı iletken gerilim standardı terslenmektedir.  $V_j$  sembolü ile gösterilen kuantum geriliminin terslenmesi ise  $I_{n\_ideal}$  akımları yazılım kontrolünde değiştirilerek gerçekleştirilmektedir.



### Şekil 8. Ölçümün bağlantı şeması

Bu ölçüm için voltmetrenin entegrasyon süresi 20 NPLC olarak ayarlanmıştır. PJGS ile 20 örnekli simetrik kare dalga üretilmiştir. Kare dalganın, genliği yarı iletken gerilim standardının son kalibrasyon değerine kuantalanmıştır. Bunda amaç, iki gerilim standardı arasındaki fark gerilimini minimuma indirerek, voltmetre kazancını belirleme belirsizliğinin toplam ölçüm belirsizliğine olan etkisini küçültmektir. İki standardın düşük potansiyelleri (siyah kablolar) blok üzerinde silindirlere birleştirecek şekilde kısa devre edilmiştir. Diğer silindir ise  $V_{UUT}$ 'in yüksek potansiyeli ile voltmetrenin düşük potansiyelini kısa devre etmek için kullanılmıştır. 10 ölçümden sonra program, mesajla tersleme uyarısında bulunmaktadır. Bu mesajdan sonra operatör, silindirlerin yerini  $V_{UUT}$ 'i tersleyecek şekilde değiştirerek tersleme işlemini gerçekleştirmelidir. Terslemenin amacı ısı gerilimleri ve fark ölçer olarak kullanılan voltmetrenin ofsetlerini ölçüm sonuçlarından bertaraf etmektir. Bu işlem Eşitlik (11) - Eşitlik (13)'de ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

20 örnekli simetrik kare dalganın ilk 10 örneği için (11) Eşitliği geçerli iken sonraki 10 örnek için ise (12) Eşitliği geçerlidir. Ancak ofsetlerden ve termal gerilimlerden arınmış gerçek sonuç, Eşitlik (13) ile bulunmaktadır. Bu eşitliklerde  $V_{DVM}^+$  ve  $V_{DVM}^-$  fark ölçerin göstergesinde okunan değerlerdir ve bu iki standardın arasındaki gerçek farkın ( $V_{fark}$ ) yanı sıra termal gerilimleri ( $V_{termal}$ ) ve fark ölçerin ofset akımları nedeniyle oluşan  $V_{offset}$  gerilimlerini de içermektedir. İki ölçümdeki  $V_{termal}$  ve  $V_{offset}$  gerilimlerinin birbirine eşit olması beklenir, ancak iki ölçüm arasındaki ısı gerilim ve ofset gerilimi kaymalarını da ölçüm fonksiyonunda değerlendirebilmek için (13) numaralı eşitlikte  $\delta V_{offset}$ ,  $\delta V_{termal}$  büyüklükleri öngörülmüştür. Simetrik kare dalganın pozitif potansiyelden negatif potansiyele hızlıca geçişi ve böylelikle terslemenin hızlı gerçekleştirilmesi ölçümün, ofset ( $\delta V_{offset}$ ) ve termal gerilimlerinin ( $\delta V_{termal}$ ) kaymalarından etkilenmemesi açısından Geleneksel Josephson Sistemine göre daha üstündür.

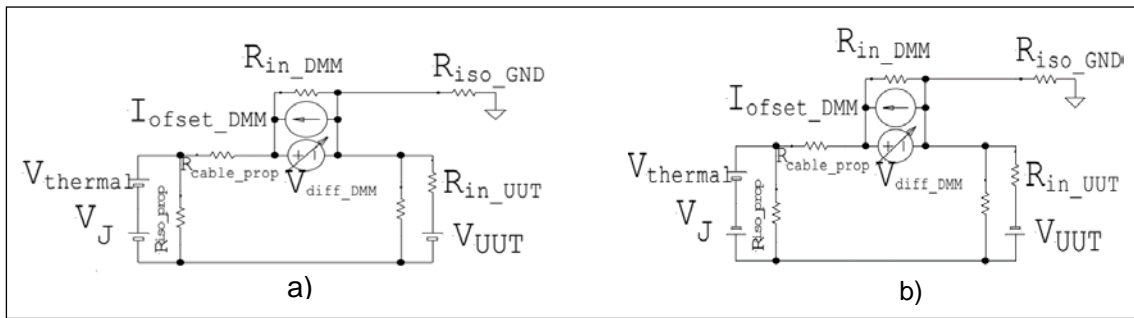
$$V_{UUT}^+ = V_J^+ - V_{DVM}^+ = V_J^+ - V_{fark} - V_{termal} - V_{offset} \quad (11)$$

$$V_{UUT}^- = V_J^- - V_{DVM}^- = V_J^- + V_{fark} - V_{termal} - V_{offset} \quad (12)$$

$$V_{UUT} = \frac{V_{UUT}^+ - V_{UUT}^-}{2} = \frac{V_J^+ - V_J^- - 2 \times V_{fark} + \delta V_{termal} + \delta V_{offset}}{2};$$

$$V_J^+ = -V_J^-; \quad \delta V_{termal}, \quad \delta V_{offset}: \text{ İki ölçüm arasındaki kaymalar} \quad (13)$$

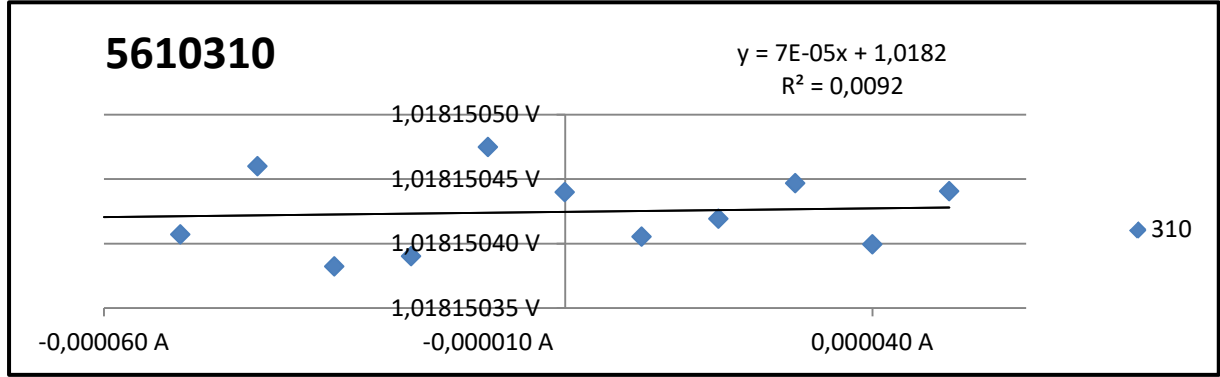
Ölçüm devresindeki diğer artık devre elemanlarının belirsizliğe etkisini daha iyi değerlendirmek için, bu ölçüme ait elektrik devre şeması [16]'daki gibi Şekil 9'da verilmiştir. Bu devrenin analizi [4]'de listelenen belirsizlik bileşenleri ve aralarındaki bağlantıları değerlendirebilmek için gereklidir. (11)-(13) de verilen eşitlikler, Şekil 9'da verilen artık parametrelerin olmadığı durumda geçerlidir. Şekil 9'da verilen iki devredeki devre elemanlarını kullanarak yukarıda verilen 11 ve 12 eşitlikleri yeniden değerlendirildiğinde (13) yerine (14) eşitliği elde edilmektedir.



Şekil 9. Yarı-iletken Gerilim Standardı ile JGS kalibrasyonuna ait elektrik devresi

[4]'de verilen belirsizlikler GJGS'nin kullanıldığı durum için geçerlidir. Ancak PJGS kullanıldığında, bu bileşenlere ilaveten, ölçüm sonucunun  $I_{segtrim}$  bağımlılığı da değerlendirilmelidir. Bu nedenle akım bağımlılığı parametresi  $I_{segtrim}$  değiştirilerek kalibrasyonlar tekrarlanmalı ve Şekil 10'deki gibi ölçümler alınmalıdır. Şekil 10'da özetlenen ölçüm sonuçları Eşitlik (4) 'deki gibi test edilmelidir.  $I_{segtrim}$  bağımlılığının yanı sıra, yarı iletken gerilim standardının ve fark ölçerin gürültülerini de dahil ederek daha kapsamlı bir model fonksiyon (14)'deki gibi oluşturulmuştur. Bu model fonksiyon kullanılarak Belirsizlik bütçesi Tablo 3'deki değerlendirilmiştir. Bu bildiri (14) eşitliği ile verilen model fonksiyonun

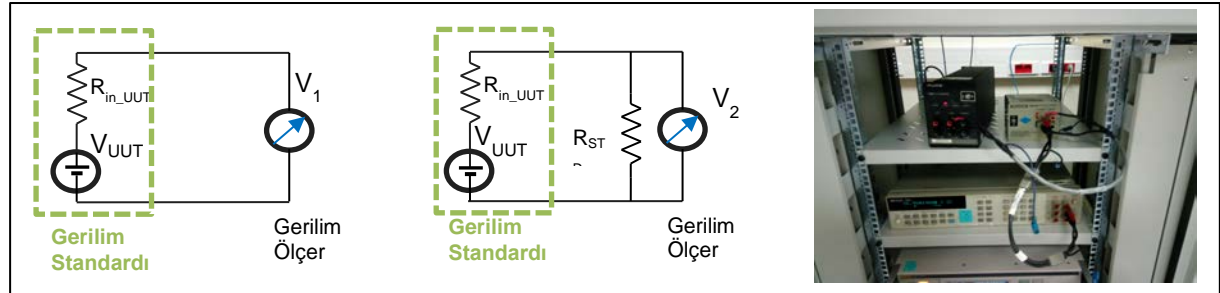
[16]'da verileden farkı Josephson Sabitinin gösterimidir. Tablo 3'de verilen Yarı-iletken Gerilim Standardı Kalibrasyonu için Belirsizlik Bütçesi'nde Josephson sabiti güncellenmiştir.



Şekil 10. Yarı-iletken Gerilim Standardı Ölçümünün  $I_{segtrim}$  Bağımlılığı

$$V_{UUT} = \frac{V_{UUT}^+ - V_{UUT}^-}{2} = \left\{ \frac{n \cdot N \cdot f}{K_J} + \delta V_{termal} \right\} \cdot \frac{R_{inDMM} + R_{inUUT}}{R_{inDMM} + R_{inUUT} + R_{cableprop}} + (-V_{diff} + \varepsilon_{DVM}) \frac{R_{inDMM}}{R_{inDMM} + R_{inUUT}} + \delta I_{offset} \cdot (R_{cableprop} + R_{inUUT}) + \varepsilon_{zener} + m_{I_{segtrim}} \cdot I_{segtrim} \quad (14)$$

Şekil 9'da,  $R_{in_{UUT}}$  sembolü ile gösterilen devre elemanı kalibre edilen yarı iletken gerilim standardının iç direncidir. Yarı iletken gerilim standartlarının 10 V çıkışlarının iç direnci  $0 \Omega$ 'a yakın iken 1,018 V çıkışlarının iç direnci  $1 k\Omega$  civarındadır. Bu artık devre parametresi, değeri kabaca bilinen  $1 k\Omega$  - $10 k\Omega$  arasında değişen bir direnç kullanılarak, Şekil 11'de gösterilen iki ölçüm sonucundan Eşitlik 11 ile kolayca elde edilebilir. Eşitlik 14'den görüleceği gibi  $\delta I_{offset}$  akımının etkisi gerilim standardının iç direnci ile orantılı olarak artacaktır.



Şekil 11. Gerilim Standardının İç Direncinin Belirlenmesi

$$R_{in_{UUT}} = R_{STD} \frac{(V_1 - V_2)}{V_2} \quad (11)$$

Şekil 10'da verilen ölçümlerin A tipi belirsizliği yaklaşık  $10 nV$  olarak hesaplanmıştır. Bu belirsizlik [4] 'te verilen toplam belirsizlikten biraz daha fazladır. Bu farkın nedeni şu şekilde araştırılmıştır: Kullanılan gerilim ölçerin ofset akımlarının kararlılığı  $1 k\Omega$  büyüklüğünde bir direnç kullanılarak ölçülmüştür.  $1 k\Omega$ 'luk direncin seçilmesinin nedeni yarı iletken gerilim standardının iç direncinin bu büyüklükte olmasıdır. Gerilim ölçer ardışık olarak 10 ölçüm almaya ayarlanmıştır. Her bir ardışık ölçümün farkı alınmıştır. Sonuç  $1 k\Omega$ 'a bölünerek ofset akımları kararlılığının bu yük altında,  $\sim 0,015 nA$  olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, nanovoltmetre bant genişliği [4] 'te verilen değerden biraz daha fazladır. Bant genişliğini ve ölçüm devresinin giriş direncini dikkate alarak gerilim ölçerin gürültüsünden

DVM'nin gürültüsünden dolayı verilen belirsizliğin [4]' den daha büyük olduğu tahmin edilmiştir. Yarı iletken gerilim standarının gürültüsünün ise [4]'teki ile aynı olduğu varsayılmıştır. Daha düşük A tipi belirsizlikler, ofset akımlarının daha kararlı olması beklenen EM N11 veya Keithley 2182 / HP34420 gibi gerilim ölçerler, fark ölçer olarak kullanıldığında ve/veya gerilim ölçerin bant genişliği düşürüldüğünde elde edilebilir.

**Tablo 3.** Yarı-iletken Gerilim Standardı Kalibrasyonu için Belirsizlik Bütçesi

$X_i$		$u(X_i)$	Olasılık Dağılım Fonksiyonu	Duyarlılık Katsayısı	$u(y_i)$
$K_J$	483597,8484169840 GHz/V				
N	7034				
n	1				
f	70,00000000 GHz	< 0,000000010 GHz	Normal		< 0,1 nV
$V_{diff}$	9481 nV	< 0.2 nV	Normal		< 0,2 nV
$\delta V_{termal}$	nV	< 0,1 nV	Dikdörtgen		< 0,1 nV
$\delta I_{offset}$	<b>0,00000 nA</b>	<b>&lt; 0,015 nA</b>	Dikdörtgen	<b>1 k<math>\Omega</math></b>	<b>&lt; 15,0 nV</b>
$R_{in\_DMM}$	>10 G $\Omega$	> 10 G $\Omega$	Dikdörtgen	0,00 V/ $\Omega$	< 0,0 nV
$R_{iso\_DMM\_cable}$	>1000 G $\Omega$	> 1000 G $\Omega$	Dikdörtgen	0,00 V/ $\Omega$	< 0,0 nV
$R_{in\_VUUT}$	>1000 $\Omega$		Dikdörtgen	0,00 V/ $\Omega$	< 0,0 nV
$R_{cable\_prop}$	~4 $\Omega$		Dikdörtgen	0,00 V/ $\Omega$	< 0,0 nV
$\epsilon_{zener}$	0 nV	< 6,0 nV	Normal	<b>1</b>	< 6,0 nV
$\epsilon_{DVM}$	<b>0 nV</b>	<b>&lt; 2,0 nV</b>	Normal	0,99999999	<b>&lt; 2,0 nV</b>
$I_{segritim}$	0,00000 nA	< 120,0 $\mu$ A	Dikdörtgen	0,000007 V/A	< 0,0 nV
$m_{Isegritim}$	0,00000 V/A	0,0000 V/A	Dikdörtgen	0,00012 A	< 0,0 nV
$V_{UUT}$	<b>1,018150548 V</b>	Birleşik standart belirsizlik ( $1 \sigma$ )			< 16,3 nV
		Genişletilmiş Belirsizlik			< 33 nV
		Genişletilmiş Bağlı Belirsizlik			< 32 nV/V

## SONUÇLAR

Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı gerilim ölçer karakterizasyonunda ve yarıiletken gerilim standardı kalibrasyonunda kullanılmıştır. Ölçümlerin model fonksiyonları, ölçüm devresindeki artık devre elemanları dahil olmak üzere oluşturulmuştur. Ölçümlerin belirsizlikleri model fonksiyonlarına göre değerlendirilmiştir. Ölçümlerin sağlıklı olup olmadığını araştırmakta kullanılan, geliştirilen yazılım ve matematiksel araçlar sunulmuştur. Bölüm 3 ve 4'de sunulan çalışmalar, sistemin yüksek hassasiyetli gerilim ölçerlerin ve yarı-iletken gerilim standartlarının kalibrasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışmalarla, Geleneksel JGS yerine PJGS ile bu kalibrasyonların, yazılım kontrolünde hızlı ve daha çok ölçüm alınarak daha güvenilir şekilde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca her iki kalibrasyonda da ısıl gerilim ve ofset akımlarından kaynaklanan hata kaynaklarının, PJGS'nin kuantum adımları arasında hızlı anahtarlanabilme yeteneği nedeniyle kolayca bertaraf edilebileceği gösterilmiştir.

## TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma kısmen EMPIR JRP QuADC bünyesindeki EA tarafından finanse edilmektedir. EMPIR, EMPIR katılımcı ülkeleri ve EURAMET tarafından ortaklaşa finanse edilmektedir. T.C.Ö. Josephson

Voltage Standard Systems hakkındaki değerli tartışmaları ve STD'yi ödünç verdikleri için PTB'den Ralf Behr'a teşekkür etmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] B.D Josephson, "Possible New Effects in Superconductive Tunneling", Phys. Letters , pp. 251-253, 1962
- [2] Anderson P., R. J. M., "Probable Observation of the Josephson Superconducting Effect". Phys. Rev. Lett, vol 10, pp. 230-232, 1963
- [3] S.Shapiro, "Josephson Currents in Superconducting Tunneling: The Effect of Microwaves and Other Observations", Phys. Letters, vol. 11, num 2, pp 80-82, July,1963.
- [4] P Pöpel, R., "The Josephson Effect and Voltage Standards" Metrologia, vol 29, pp. 153-174, 1992.
- [5] B. N. Taylor, T. J. Witt, " New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects" *Metrologia*, vol. 26, no. 1, pp. 47-62, 1989
- [6] V. Sienknecht and T. Funck , "Realization of the SI Unit Volt by Means of a Voltage Balance", *Metrologia* 22,209-212 ,1986
- [7] Samuel P. Benz, C. A. H., "Application of the Josephson Effect to Voltage Metrology". Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 10, 2004.
- [8] Kautz R. L., "On a proposed effect voltage standard at zero current bias" Appl. Phys. Lett., Issue 36, pp. 386-388, 1980.
- [9] Ralf Behr, O. K. J. K. F. M. a. L. P., "Development and metrological applications of Josephson arrays at PTB". Meas. Sci. Technol. Issue 23, 2012.
- [10] CCEM, "Guidelines for Implementation of the 'Revised SI' ", Version 1.0, 08.12.2017
- [11] N. Fletcher, G.Rietveld, J. Olthoff, I. Budovsky, M. Milton "Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values", *NCSLI Measure*, Vol. 9, Iss. 3, 2014
- [12] F.Mueller, R. Behr, T.Weimann, L. Palafox, D. Olaya, P. D.Dresselhaus, and S.P.Benz, "1V and 10VSNS programmable voltage standards for 70GHz,"IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 981–986, Jun. 2009
- [13] <https://www.ptb.de/empir/quadc-project.html>
- [14] Coskun Ozturk, T., Erturk, S., Tangel, A., Gedik, A., Yogun, M., Celep, M. "Establishing Programmable Josephson Voltage Standard and Maintaining its Quantum Accuracy", *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications*, 8:1 (2019) : 19-25
- [15] Seron, O. at all, "Precision ac–dc transfer measurements with a Josephson waveform synthesizer and a buffer amplifier." *IEEE Trans.Instrum. Meas.* , Issue 61, p. 198–204, 2012
- [16] Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK, Sarp ERTÜRK, Ali TANGEL, Mehedin ARİFOVİÇ, Saliha TURHAN, "Metrological Measurements Using Programmable Josephson Voltage Standard" *eleco* 2017
- [17] "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", GUM,1995

## ÖZGEÇMİŞ

### Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK

Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında mezun olmuştur. Yüksek lisansını Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Müh. ABD'da 2004 yılında tamamlamıştır.

2002 yılında TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı'nda göreve başlamıştır. Burada "Yüksek Doğruluklu Kalibratörlerin AC İşaret Kaynağının Doğrudan Sayısal Sentez Tekniği ile Gerçekleştirilmesi" konulu yüksek lisans çalışmasını tamamlamıştır. Halen UME Gerilim Laboratuvarı'nda birincil seviyede DC oran, gerilim ve akım standartlarının oluşturulması, muhafazası ve kalibrasyonu konularında çalışmaktadır. Uzmanlık alanı DC ve düşük frekans gerilim, akım ve direnç ölçüm/kalibrasyonları ve belirsizlik hesaplamalarıdır. Endüstriye eğitim, kalibrasyon ve test hizmetlerinin verilmesinde, ulusal ve uluslararası karşılaştırmalarda görev almaktadır.

2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Müh. ABD'da doktora öğrenimine başlamıştır. Şu anki ilgi alanları AC Josephson Gerilim Standartlarının Kurulumu ve bu standartların kullanıldığı elektriksel ölçümlerdir.

### **Sarp ERTÜRK**

1995 yılında Ankara, Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nden Elektrik-Elektronik Mühendisliği derecesini aldı. 1996 ve 1999 yıllarında Essex Üniversitesi'nden Elektronik Sistemler Yüksek lisans ve doktora dereceleri aldı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi'ne Yrd. Doç. Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde 2008 yılında aynı bölümde Profesör Dr. derecesini aldı.

Başlıca uzmanlığı: Görüntü İşleme, Sinyal İşleme, Uzaktan Algılama, Gömülü Sistemler. İlgi alanları Bilgisayar Görme, Dijital İletişim, Bilgi Sistemleri ve Devreler ve Sistemlerdir.

### **Ali TANGEL**

1986'da Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nden Elektronik Mühendisliği dalında lisans derecesi aldı. 1991 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektronik Mühendisliği alanında yüksek lisans derecesi aldı. Amerika Birleşik Devletleri'nden 1999'da Pennstate Üniversitesi'nden doktora derecesini aldı. 1987-1993 yılları arasında Ankara Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. 1993 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümüne katıldı ve 2011 yılında doçent oldu. Halen aynı bölümde profesör olarak çalışmaktadır. Ana uzmanlık alanları Analog ve Karışık Sinyal Elektronik Devre Tasarımları, VLSI Tasarımı, Alan Programlanabilir Kapı Dizileri ve Uygulamaları ve Yarı İletken Elektroniğidir.

### **Mehedin ARİFOVİÇ**

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 1997 yılında mezun olmuştur. Yüksek lisans eğitimini Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Elektronik alanında tamamlamıştır.

1997 yılında TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı'nda araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. Birincil seviyede AC/DC gerilim ve akım ölçümleri, referans cihazların yapımı, ölçüm otomasyonu ve ISO 17025 Kalite Sistemi konularında çalışmaktadır. Halen UME Gerilim Laboratuvarı sorumlusu olarak görev yapmaktadır.