

TÜBİTAK UME PROGRAMLANABİLİR JOSEPHSON GERİLİM STANDARDI

Mehedin ARİFOVİÇ
Recep ORHAN
Naylan KANATOĞLU
Saliha TURHAN

ÖZET

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (TÜBİTAK UME), 10 V programlanabilir Josephson tümdevresine dayanan yeni bir kuantum gerilim standardı kurulmuştur. Sıvı helyumda çalışan Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı, 10 V'a kadar DC gerilim yanı sıra 7 V'a (≤ 5 kHz) kadar rms AC gerilim üretebilmektedir. Standart, yapımında kullanılan elektronik ve yazılım sayesinde özel uygulamalara kolayca entegre edilebilmektedir. Bu bildiride, standardın kurulumu ve validasyonu ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Josephson Gerilim Standardı, programlanabilir Josephson tümdevresi, gerilim ölçümü, örnekleme, analog-sayısal dönüştürücü

ABSTRACT

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), the national metrology institute of Turkey, established a new quantum voltage standard based on programmable 10 V Josephson array operated in the liquid helium. Programmable Josephson Voltage Standard is very compact, able to produce reference DC voltage up to 10 V and AC voltages up to 7 V rms (≤ 5 kHz), and can be easily integrated to any custom application. In this paper, the work conducted on the building of the standard and its validation were presented.

Key Words: Josephson Voltage Standard, programmable Josephson array, voltage measurement, sampling, digital to analog converter.

1. GİRİŞ

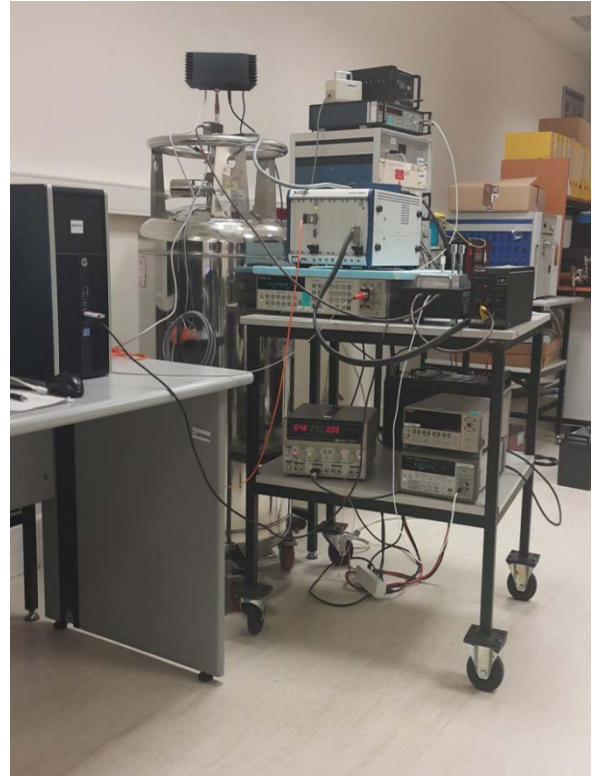
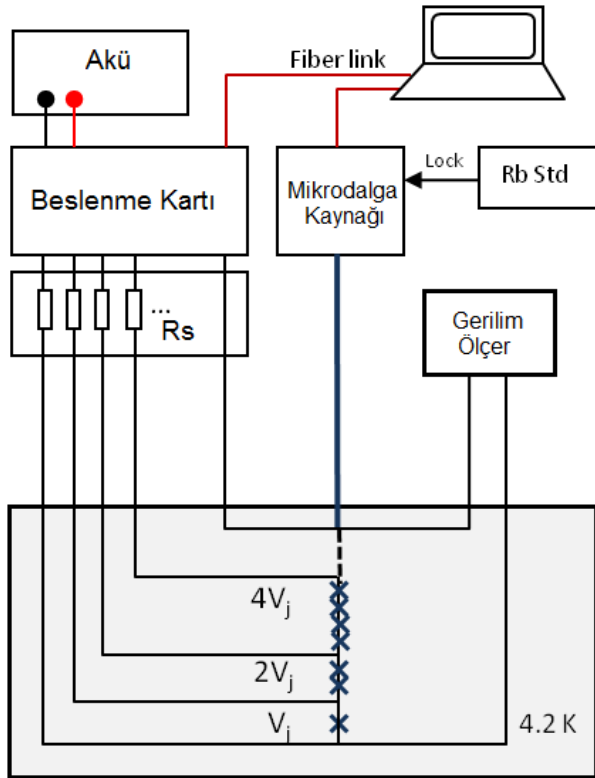
DC gerilim izlenebilirliği, birincil seviyede Josephson etkisi prensibi ile çalışan ölçüm standartları üzerinden gerçekleştirilmektedir [1]. TÜBİTAK UME'de, gerilim birimi 1997 yılından beri klasik histeretik tümdevresine sahip Josephson Gerilim Standardı (JGS) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. [2]. Yapılan iyileştirmelere rağmen bu standartların kullanımı zor ve sadece DC gerilim ile sınırlıdır. Son 20 yılda gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda histeretik olmayan Josephson tümdevreler geliştirmiş ve Josephson etkisi, DC gerilim ölçümlerinin yanı sıra AC gerilim ölçümlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmaların büyük bir kısmı Programlanabilir Josephson Gerilim Standartları (PJGS) ile ilgilidir [3]. Bu sistemler, DC gerilime ek olarak, yüksek doğrulukla adım-yaklaşımlı dalga formları üretme yeteneğine sahiptirler.

Günümüzde PJGS'ler, sistem parametrelerinin optimizasyonu, DC gerilim standardı, $8\frac{1}{2}$ dijital multimetrenin gerilim kalibrasyonu gibi bazı kalibrasyonları otomatik gerçekleştirebilen kapsamlı yazılım ile birlikte ticari olarak bulunabilmektedir. Ancak, bu standartların başka bir sisteme

entegrasyonu, özellikle AC gerilim uygulamalarında bazı özel ölçümler veya algoritma ihtiyaçlarını karşılamaları gerektiğinde, kullanılan özel yazılım ve elektronik sebebiyle olanaksız veya çok maliyetlidir. Bu duruma örnek olarak, TÜBİTAK UME'de yeni kilogramın gerçekleştirilmesi [4] için başlatılan Kibble Balans projesi gösterilebilir. Bu projede, AC gerilimin ölçülmesi amacıyla, sistemdeki diğer modülerin ölçümleri ile senkronize olan iki adet PJGS'in sisteme entegrasyonu gereklidir. Bu ve benzeri sebeplerinden dolayı, donanımı ve yazılımı üzerinde tam kontrol sahibi olunması amacıyla, PJGS sisteminin yapılmasına karar verilmiştir.

2. TÜBİTAK UME PROGRAMLANABİLİR JOSEPHSON GERİLİM STANDARDININ YAPISI

TÜBİTAK UME tarafından kurulan PJGS sistemin genel şeması ve fotoğrafı Şekil 1'de gösterilmiştir. Sistemde Supracon AG firması tarafından üretilen SNS teknolojisine dayanan 10 V programlanabilir Josephson tümdevresi kullanılmaktadır. Tümdevre ikili sisteme ($2^0, 2^1, 2^2, \dots$) göre gruplandırılmış 18 bölümden ve toplamda 69632 adet Josephson ekleminden oluşmaktadır. Standart, 70 GHz frekansa sahip bir mikrodalga ile uyarılması durumunda, $145 \mu\text{V}$ çözünürlük ile $\pm 10,08 \text{ V}$ aralığında DC gerilimi $1 \cdot 10^{-10}$ doğrulukta üretebilmektedir.



Şekil 1. TÜBİTAK UME Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı

Tümdevre manyetik ekran içinde yerleştirilerek, tüm bağlantı tellerini ve dalga kılavuzunu içeren bir kriyojenik probun üzerine monte edilmiştir. Sistemin çalışması esnasında dış elektromanyetik etkilerden kaynaklanabilen süper iletken akı takılmasını gidermek amacıyla, tümdevrenin altına, kritik sıcaklığın üzerinde ısıtılmasına sağlayan bir ısıtıcı direnç yerleştirilmiştir.

Tümdevre, National Instruments (NI) 1082DC PXI şasesi içine monte edilmiş NI PXIe-6738 32-kanallı DAC (Digital to Analog Converter – Sayısal analog çevirici) kartı ile sürülmektedir. DAC kartının tüm kanalları $0,2 \Omega$ çıkış direncine sahip olup 10 V 'a kadar gerilim üretebilmektedirler. Tümdevrenin her bölümü (18 adet) için birer kanal kullanılıp, sürme (bias) akımlarının kontrolü için her kanala ayrıca seri

bağlı düşük reaktanslı 100 Ω dirençler eklenmiştir. Tüm kanalların senkronizasyonu kart üzerinde donanımsal olarak gerçekleştirildiğinden, kablo karmaşasının önüne geçilmiştir. Her kanalın toplam yol direnci ölçülerek, sistem yazılımı tarafından kullanılmak üzere kaydedilmiştir.

Sistemde kullanılan mikrodalga kaynağı, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Milimetre Dalga ve Terahertz Teknolojileri Stratejik İş Birimi tarafından üretilen bir sentezleyicidir [5]. Doğrudan kriyojenik prop üzerinde yerleştirilecek şekilde tasarlanan sentezleyici, 4 kHz çözünürlükte 69 GHz ila 71 GHz frekans aralığında 200 mW'a kadar sürekli RF güç üretebilmektedir. Sentezleyici çalışma esnasında referans frekans standardına kilitlenmekte olup, bilgisayar kontrolü RS 232 bağlantı ile sağlanmaktadır.

Sistem yazılımı NI LabView programı kullanılarak hazırlanmıştır. Özellikle güçlü donanım desteği, geliştirme verimliliği ve idame kolaylığı gibi avantajlarından yararlanması hedeflenmiştir.

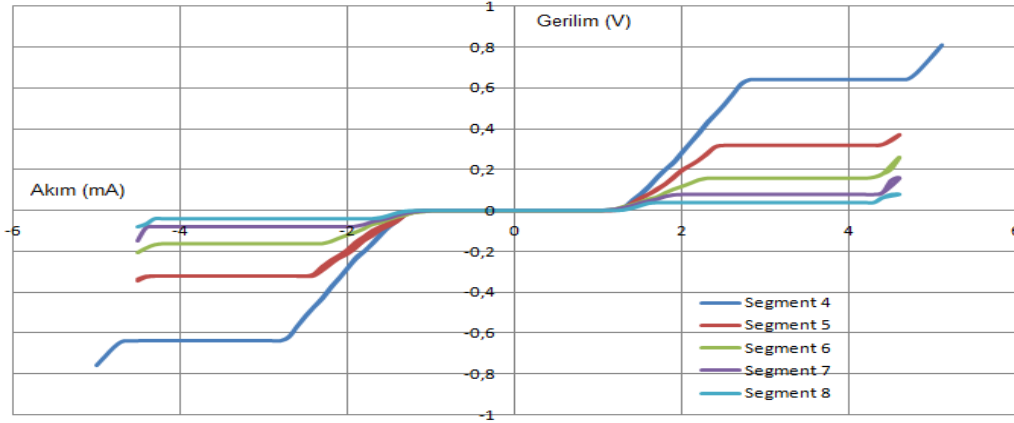
2. TÜBİTAK UME PROGRAMLANABİLİR JOSEPHSON GERİLİM STANDARDININ OPERASYONU

Sistem çalıştırılmadan önce, tümdevrenin tüm bölümlerinin sürme (bias) akımları ile en uygun mikrodalga güç ve frekans belirlenir. PJGS'de kullanılan tümdevrenin karakteristik akım genişliği (I_c) 6 mA olup, en uygun sürme akım (I_b) değerlerinin (2,15 – 3,20) mA aralığında olduğunu tespit edilmiştir (Tablo 1). Mikrodalga frekansı ise, tümdevrenin 1. ve 0. Shapiro adımlarının genişliğini gözleyerek ve 69 GHz ila 71 GHz frekans aralığında taranarak en uygun değer 70,94 GHz olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. TÜBİTAK UME PJGS çalışma parametreleri

Bölüm (Segment)	Josephson Eklem Sayısı	I_{b+} (mA)	I_{b-} (mA)
1	1	3,20	3,19
2	1	3,11	2,98
3	1	2,91	2,91
4	2	2,92	2,93
5	4	2,92	2,92
6	8	2,91	2,91
7	17	2,91	2,90
8	34	2,90	2,90
9	68	2,68	2,71
10	136	2,18	2,30
11	272	2,30	2,27
12	544	2,15	2,30
13	1088	2,77	2,82
14	2176	2,86	2,93
15	4352	2,53	2,54
16	8704	2,48	2,52
17	17406	2,67	2,70
18	34813	2,68	2,70

Ölçülen V-I karakteristikleri birinci kuantum adımların ($n = 1$) düz platoların merkez değerleri her bölüm (segment) için en uygun sürme akımı olarak alınmıştır (Şekil 2). Bu şekilde belirlenen sistem parametreleri, genel olarak 60 litre sıvı helyum kullanımı gerektiren 3 hafta süren çalışma süresince değişmezler. Ancak parametrelerin belli aralıklarla kontrol edilerek sistemin kuantum durumunda çalıştığı teyit edilmesi gerekebilir.



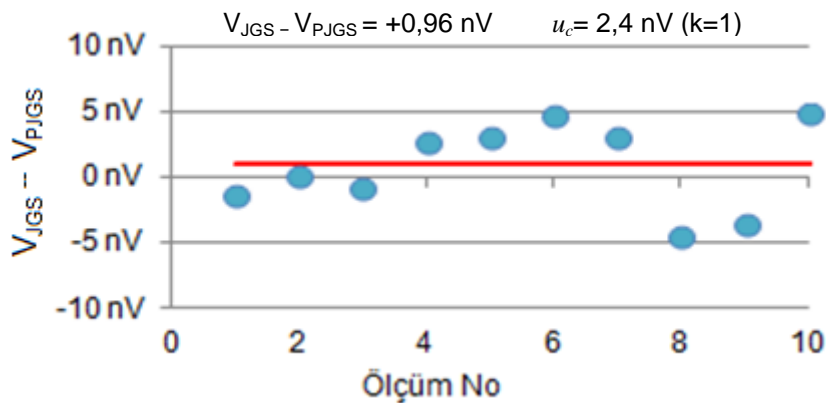
Şekil 2. PJGS tümdevresinin 4-8 bölümlerinin V-I karakteristiği

3. SİSTEMİN VALİDASYONU

PJGS sistemin validasyonu, TÜBİTAK UME JGS kullanılarak iki yöntem ile gerçekleştirilmiştir. PJGS önce, DC gerilim standardı (Fluke 732B) kullanılarak dolaylı olarak, daha sonra ise doğrudan konvansiyonel DC Josephson Gerilim Standardı (JGS) ile karşılaştırılmıştır. TÜBİTAK UME'de 1997'den beri DC gerilim ölçümlerinde ulusal standart olarak kullanılmakta olan SNS Josephson tümdevresi yapılı JGS, daha önce pek çok uluslararası karşılaştırmada kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınarak güvenilirliği doğrulanmıştır [6].

Dolaylı karşılaştırmada, Fluke 732B DC Standardın 1,018 V ve 10 V çıkış gerilimleri sırasıyla JGS, PJGS, JGS kullanılarak ölçülmüştür. 1 saat içinde tamamlanan ölçümler süresince Fluke 732B standardının lineer davrandığı kabul edilerek her iki standart ile belirlenen ölçüm sonuçları arasındaki fark belirlenmiştir. Buna göre, JGS ile PJGS sistemleri arasındaki fark, $0,05 \cdot 10^{-6}$ belirsizlik (%95, $k=2$) ile, 10 V için $+0,03 \cdot 10^{-6}$, 1,018 V için $+0,006 \cdot 10^{-6}$ olarak belirlenmiştir.

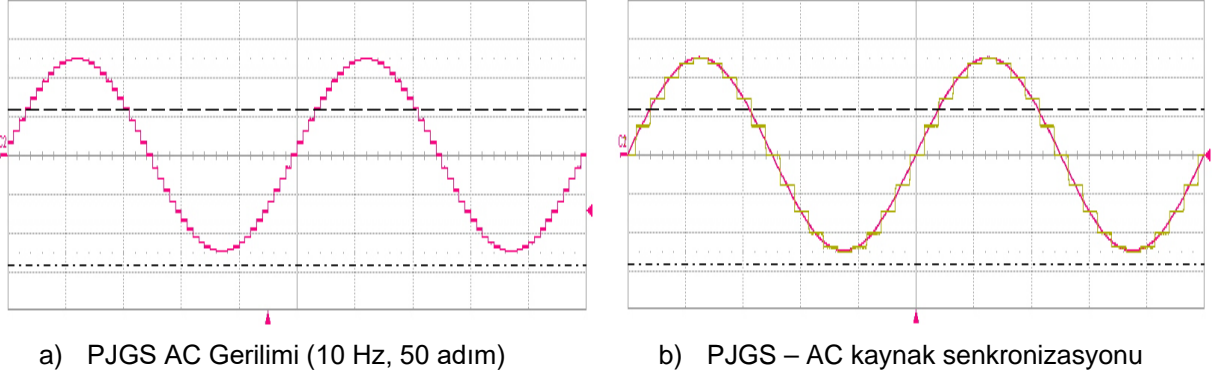
PJGS ile JGS'nin doğrudan karşılaştırması ise 10 V gerilim değerinde gerçekleştirilmiştir [7]. Bu karşılaştırmada, PJGS sistemi ve yazılımı kullanılarak, JGS ile aralarındaki gerilim farkı ölçülmüştür. Şekil 3'de gösterilen sonuçlar iki sistemin uyum içinde olduğunu ortaya koymuştur. Buna göre, JGS ile PJGS sistemleri arasında 10 V için fark, 2,4 nV ($0,24 \cdot 10^{-9}$) belirsizlik ($k=1$) ile $+0,96$ nV ($0,096 \cdot 10^{-9}$) olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. JGS - PJGS 10 V doğrudan karşılaştırma sonucu

3. AC GERİLİM UYGULANMASI

Histeretik olmayan PJGS tümdevresinin kararlı duruma gelme (oturma) zamanı ns mertebesinde kısa olduğundan, adım yaklaşımli (step-approximated) AC gerilim üretme yeteneğine sahiptir. AC sinyalin frekansı ve periyot başına adım sayısı sistem yazılımı tarafından kontrol edilmektedir. (Şekil 4 (a))



Şekil 4. PJGS tarafından üretilen adım yaklaşımli AC gerilim ve AC kaynağı ile senkronizasyon

Sistemde kullanılan besleme kartı tarafından üretilen dalganın ardışık adımları arasına geçiş zamanı $1 \mu\text{s}$ 'nin altında olup, 1 kHz'e kadar örnekleme temelli ölçümler için yeterlidir. Ayrıca, besleme kartı üzerinde bulunan harici tetikleme ve referans frekans girişi ekstra cihazlarla birlikte çeşitli senkronizasyon seçenekleri sunmaktadır. Besleme kaynağını topraktan izole tutmak amacıyla, tetikleme ve referans frekans bağlantıları için özel yapılmış fiber-optik dönüştürücüler kullanılmaktadır.

PJGS'nin en yaygın AC uygulamalarından biri, AC gerilim kaynağı kalibrasyonudur. Faz kilitleme seçeneğine sahip bir Fluke 5720A kalibratörün ürettiği sinüs sinyali ile PJGS'nin ürettiği dalga formu senkronizasyonu Şekil 4(b)'de gösterilmiştir. Gösterilen PJGS dalga formu 20 adım olup, her iki sinyalin frekansı 10 Hz ve tepe değerleri 10 V'tur. AC kaynağın gerilim değerini belirlemek için öncelikle üretilen test sinüs sinyali ile PJGS'nin ürettiği referans sinyalinin her adımının düz bölgelerindeki farkı ölçülür. Ardından, PJGS gerilim seviyeleri ile fark gerilimleri toplanarak oluşturulan sinyalin parametreleri hesaplanır.⌋

SONUÇ

TÜBİTAK UME'de, 10 V'a kadar DC gerilim yanı sıra, 7 V'a ($\leq 5 \text{ kHz}$) kadar rms AC gerilim üretebilen Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı (PJGS) kurulmuştur. Standart, 1997'den beri kullanılmakta olan Josephson Gerilim Standardı ile 10 V gerilim değerinde doğrudan karşılaştırılmış olup, iki standart arasındaki fark 2,4 nV belirsizlik ($k=1$) ile +0,96 nV olarak belirlenmiştir. Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı, sistemin kompakt yapısı, harici senkronizasyon yetenekleri ve TÜBİTAK UME yapımı kontrol yazılımı sayesinde, DC ve AC gerilim ölçümleri ve uygulamalarında büyük kolaylık sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Josephson B D 1962 Possible new effects in superconductive tunnelling Phys. Lett. 1 251–3
- [2] S. Selcik (Turhan), B. Akyel and P. Gutmann, "The 10V Fixed Frequency Josephson Junction Voltage Standard at UME", CPEM 1998 Conf. Digest, p. 556 - 557, June 1998.

- [3] Hamilton C A, Burroughs C J and Kautz R L Josephson D/A converter with fundamental accuracy IEEE Trans. Instrum. Meas. 44 223–5, 1995
- [4] Ahmadov, H. “An Oscillating Magnet Watt Balance”, 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 09-19 July (2016), Ottawa, Canada
- [5] İ.Ünal, M. Tekbaş, A. Kaya, T. Coşkun Öztürk, “Josephson Gerilim Standardı Sistemi İçin Milimetre Dalga Sentezleyici”, ELECO 2016, Bursa, Türkiye
- [6] R. Behr and A. S. Katkov, “Final report on the key comparison EUROMET.BIPM.EM-K10.a: Comparison of Josephson array voltage standards by using a portable Josephson transfer standard”, Metrologia. vol. 42, Technical Supplement, 01005, 2005.
- [7] S Turhan, N Kanatoğlu, R Orhan, M Arifovic, “Direct Comparison of DC Josephson Voltage Standard and Programmable Josephson Voltage Standard of TÜBİTAK UME”, CPEM 2018, Paris, France

ÖZGEÇMİŞ

Mehedin ARİFOVİÇ

1997 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 1997 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2001 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde Elektronik alanında yüksek lisans çalışmasını tamamlamıştır. Halen UME Gerilim Laboratuvarında laboratuvar sorumlusu olarak görev yapmaktadır. Birincil seviyede elektriksel ölçümler, referans cihazlar yapımı ve ölçüm otomasyonu konularında çalışmaktadır.

Recep ORHAN

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun olmuştur. 2013 yılında TÜBİTAK BİLGEM UEKAE'de araştırmacı olarak işe başlamış ve 10 ay çalışmıştır. Mobil Verici Yön Tespit Sistemi (MobDF) Projesi'nde yazılım geliştirme ve sistem testlerinin gerçekleştirilmesinde görev almıştır. 2014 yılında UEKAE'den ayrılarak TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı'nda Araştırmacı olarak işe başlamıştır. Gerilim cihazları kalibrasyonu, otomatik kalibrasyon programları geçiltirmenin yanı sıra Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı sisteminin kurulumunda yer almış ve kontrol programını yazmıştır. 2018 yılında Elektrodinamik Laboratuvarında göreve başlamış, Kibble Balans deneyine elektrik ölçüm sisteminin kurulumu, kontrol yazılımı ve analiz yazılımları ile katkıda bulunmuştur. İlgi alanları; kuantum gerilim standartları, işaret işleme ve ölçüm otomasyonudur. Üniversite giriş sınavında ilk yüz derecesi vardır.

Naylan KANATOĞLU

Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik-Haberleşme Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 1994 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarında çalışmaya başlamıştır. Birincil seviyede elektriksel ölçümler, referans cihaz yapımı ve TS EN ISO/IEC 17025 standardı uygulamaları konularında çalışmaktadır.

Saliha TURHAN

1992 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1993 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarında çalışmaya başladı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını tamamlayarak Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi unvanını aldı. 2007 yılından bu yana UME Kalite Yönetim Temsilcisi Yardımcılığı görevini de yürütmektedir. Birinci seviyede DC ve düşük frekans gerilim ölçüm sistemleri, kalibrasyonları ve belirsizlik hesaplamaları, laboratuvarlararası karşılaştırmalar ile TS EN ISO/IEC 17025 standardı uygulamaları konularında çalışmaktadır.