

DC GERİLİM STANDARTLARI VE DC GERİLİM İZLENEBİLİRLİĞİNİN SAĞLANMASI

Ufuk Sovuksu

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü(UME), P.K.21, 41470 Gebze/Kocaeli

Özet

Bu çalışmada SI gerilim biriminin gerçekleştirilmesinde bugün dünyada primer olarak kabul edilen Josephson eklem sistemi tanıtılacak ve bugün hala birçok laboratuvar tarafından primer olarak kullanılan, ancak dünya standartlarında sekonder gerilim standartları olarak görülen standart Weston pilleri ve elektronik dc gerilim standartlarının karakteristikleri ve nasıl muhafaza edildikleri anlatılacaktır. Çalışmada ayrıca Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarı'nda dc gerilim izlenebilirliğinin ne şekilde sağlandığından ve laboratuvarın kısa dönem amaçlarından da bahsedilecektir.

1. Giriş

Uluslararası (SI) birimler sisteminde, gerilim birimi "Volt, (V)" olarak belirtilmiştir. 1V, 1 amperlik sabit bir akım taşıyan iletken bir telin 1 wattlık bir güç açığa çıkan iki noktası arasındaki elektriksel potansiyel farkı olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma göre $V = W/A$ 'dır. Burada W, watt cinsinden gücü, A ise amper cinsinden akımı temsil etmektedir. $1W = 1 \text{ Joule/sn}$, $1 \text{ Joule} = 1 \text{ Nm}$, 1 Nm ise 1 kgm/sn^2 'dir. Bu durumda 1 V temel SI birimleri cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{kgm}}{\text{sn}^2} \text{ m} \frac{1}{\text{sn}} \frac{1}{\text{A}} = \text{kg m}^2 \text{ sn}^{-3} \text{ A}^{-1}$$

Türetilmiş bir SI birimi olan "Volt"un doğrudan temel SI birimleri cinsinden gerçekleştirilmesi pratik bakımlardan oldukça güçtür. Üstelik bu şekilde gerçekleştirilen SI Volt'un gelişen teknolojinin ve bilim dünyasının ihtiyaç duyduğu yüksek kararlılık ve yüksek doğruluk gibi şartları yeterince sağlayamadığı gözlenmiştir. Bu durum, birimin doğrudan olmayan, farklı yöntemlerle gerçekleştirilmesi zorunluluğunu gündeme getirmiştir.

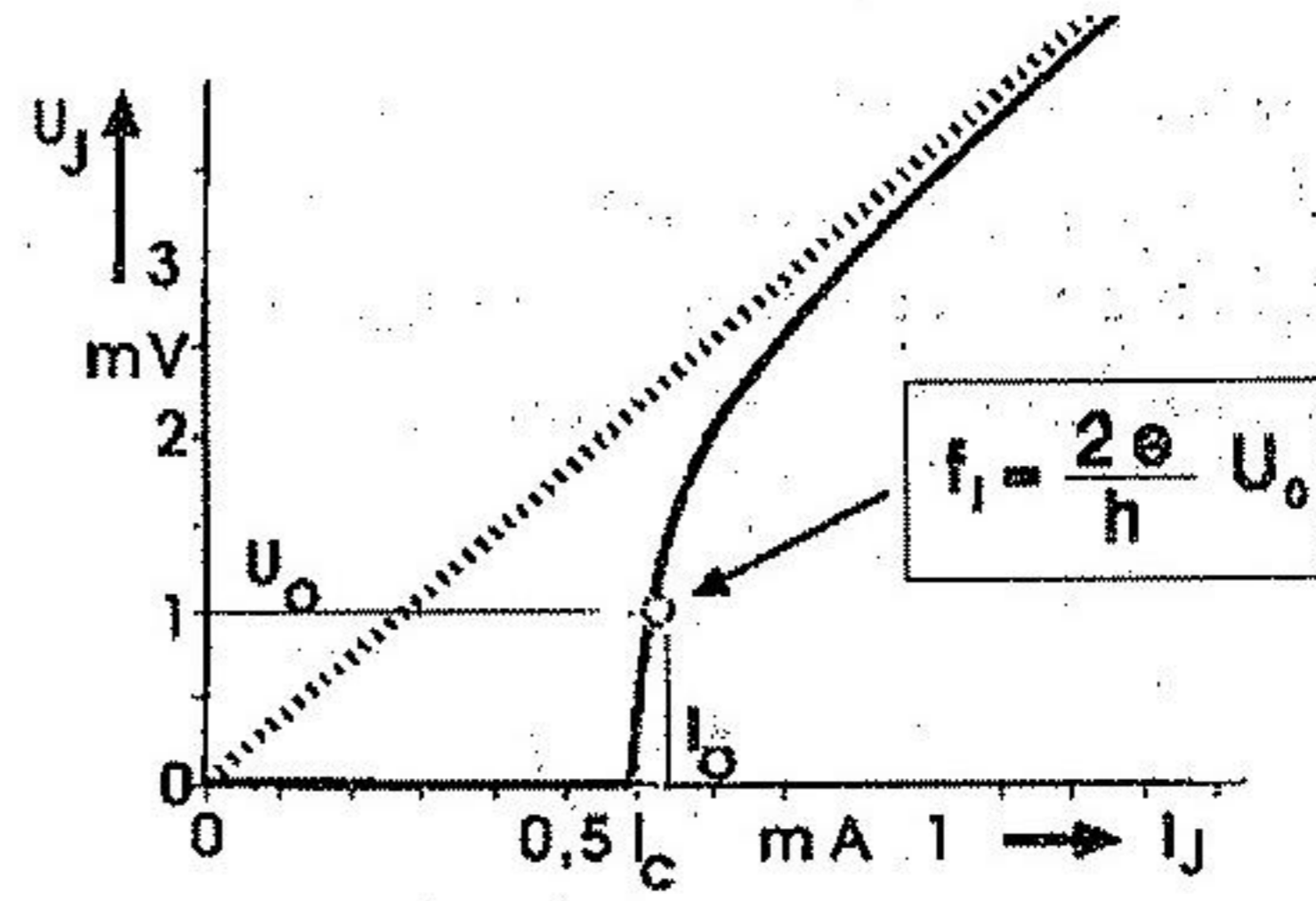
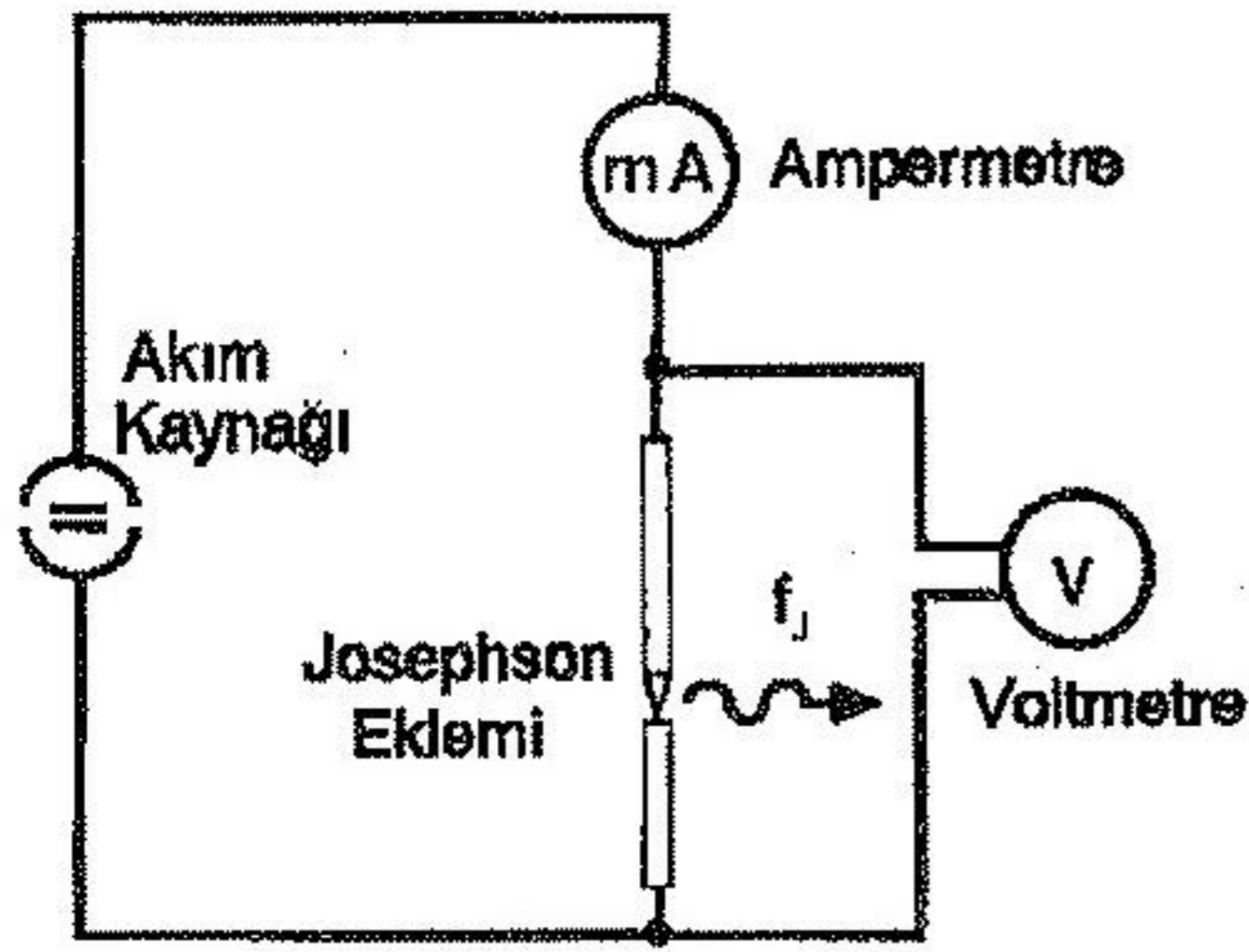
Önceleri bir grup standart pilin - doymuş Weston pilleri-ortalama emf (elektro motor kuvveti) değeri cinsinden ifade edilen SI gerilim birimi Volt, bu ortalama değer zamanla ve sıcaklık, nem, titreşim gibi ortam şartlarına bağlı olarak değiştiğinin gözlenmesi nedeniyle, bugün artık farklı bir yöntemle tanımlanmaktadır. 1962 yılında Brian Josephson tarafından keşfedilen ve 1972 yılında, gerilim biriminin belirlenmesinde uluslararası alanda esas olarak kabul edilen bu yeni yöntemle, SI Volt artık temel fiziksel doğa sabitleri cinsinden ifade edilmeye başlanmıştır.

2. Josephson Eklem Sistemi

2.1 Josephson Etkisi

1962 yılında Brian Josephson elektron çiftlerinin bir süperiletkenden ince bir dielektrik katman üzerinden diğer bir süperiletkene geçişi sırasında belirli bazı etkilerin ortaya çıktığını iddia etti [1]. Josephson'a göre,

- i) bir dc süperakım, kritik akım (I_c) diye adlandırılan maksimum bir değere kadar katmandan hiçbir gerilim düşümü olmaksızın geçebilir. Bu etki "dc Josephson etkisi" olarak adlandırılmış ve ilk olarak Anderson ve Rowell [2] tarafından 1963 yılında gözlenmiştir.
- ii) Belirli gerilim değerlerinde normal bir akım gözlenmekte, ancak katmanda bunun yanısıra, frekansı (f_j), katman üzerinde oluşan dc gerilim (U) ile doğrudan ilişkili bir de ac süper akım oluşmaktadır (şekil 1).

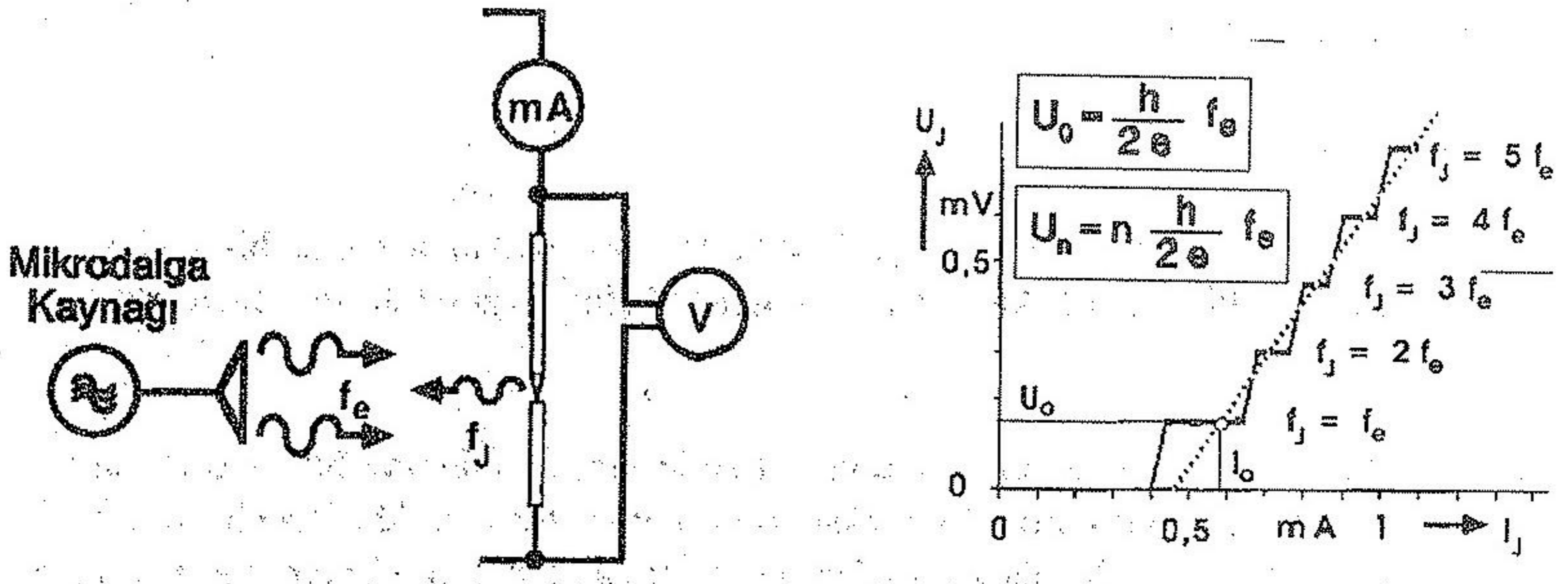


Şekil 1. Josephson Etkisi

Bu ac süperakımın frekansı ve katmanda oluşan dc gerilim arasındaki bu ilişki,

$$f_j = \frac{2e}{h} U$$

şeklinde. Burada e elektron yükü, h ise Plank sabitidir. Oluşan bu ac süperakımın frekansı, frekansı f_e olan bir ac gerilim ile modüle edilebilmekte, bu durumda süperakım $2eU/h \pm nf_e$ frekanslarında Fourier bileşenlerine sahip olmaktadır. Burada n bir tamsayıdır. Eğer belirli bir n değeri için $2eU/h = nf_e$ olursa bu durumda ac süperakım üzerinde, uygulanan ac gerilimin büyüklüğüne ve fazına bağlı olarak bir de dc bileşen oluşmaktadır. Eklem gerilim-akım eğrisi çizildiğinde, akım genişliği uygulanan ac gerilimin büyüklüğüne bağlı bir "sabit gerilim adımı" gözlenmektedir (şekil 2). Bu etki "ac Josephson etkisi" olarak adlandırılmıştır [3]. Dc gerilim metrolojisinde kullanılan Josephson etkisi bu etkidir.

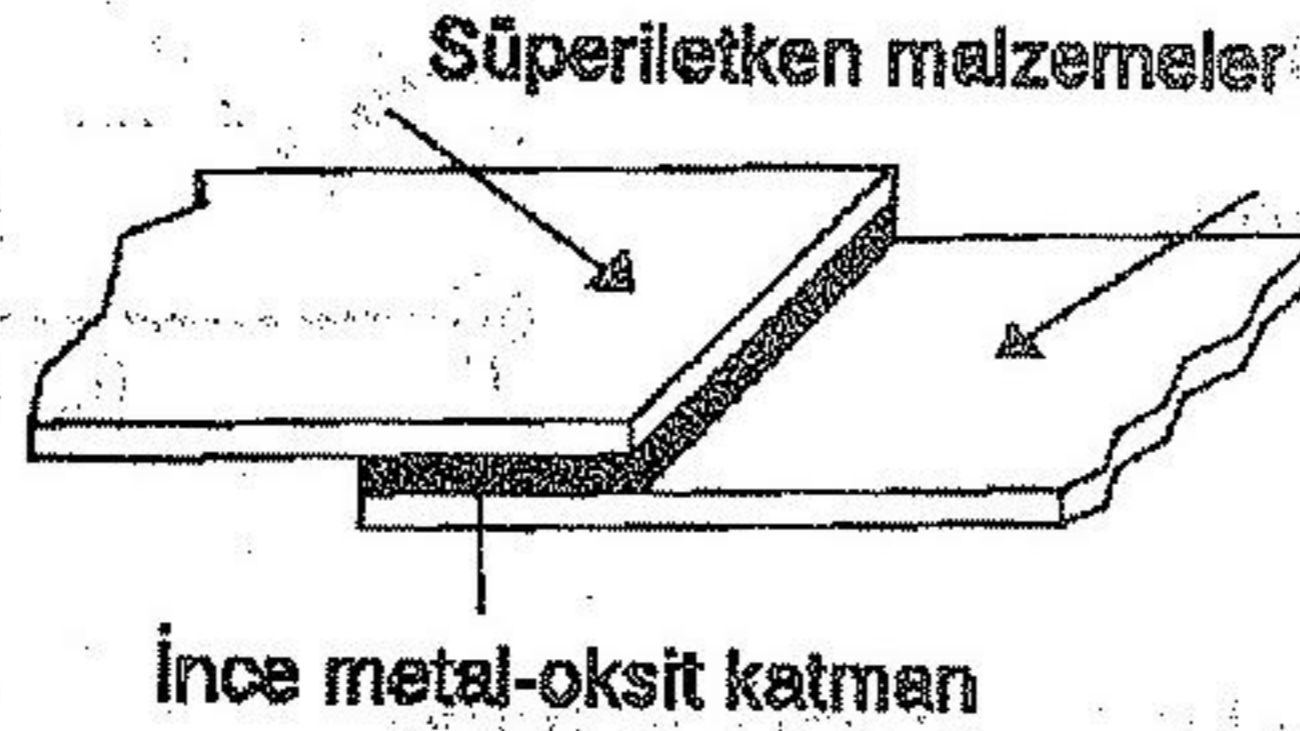


Şekil 2. Sabit gerilim adımlarının oluşması

$U_n = n \cdot h \cdot f_e / 2e$ değerlerinde oluşan bu sabit gerilim adımları ilk defa Shapiro [4] tarafından gözlenmiş, bu nedenle Shapiro adımları olarak adlandırılmıştır.

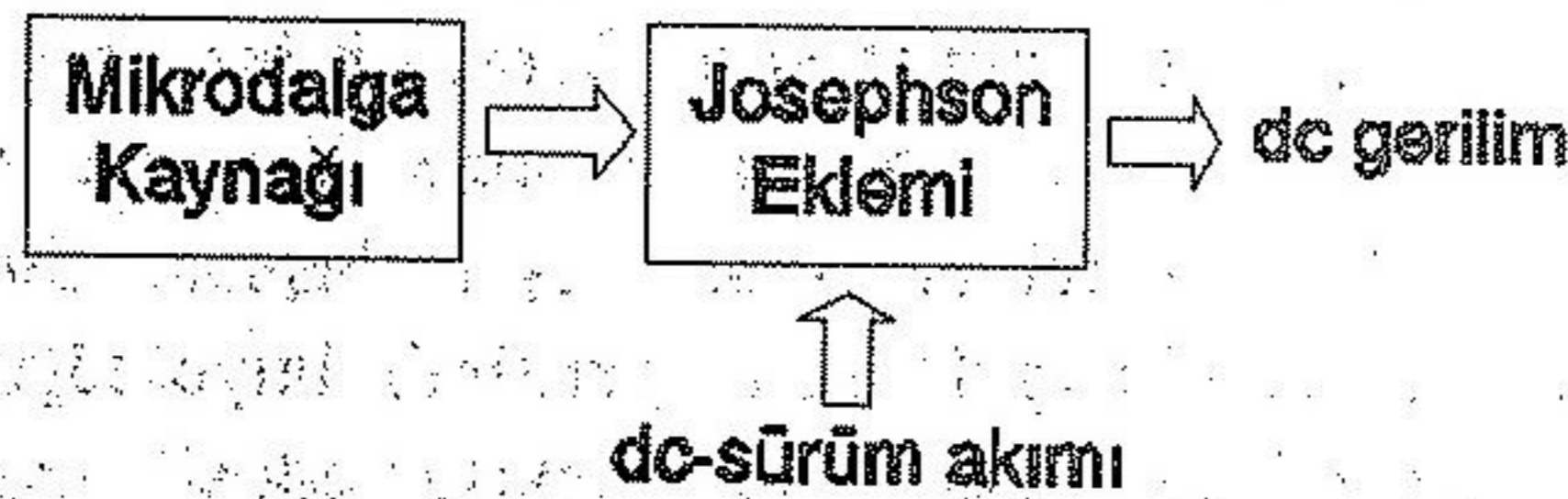
2.2 Josephson Eklemi

Josephson etkisi temel fiziksel sabitler aracılığıyla gerilimi frekansa bağlayan fiziksel bir etkidir. Josephson eklemi ise, birbirlerinden ince yalıtkan bir oksit tabakasıyla ayrılmış iki süperiletken malzemenin zayıfça biraraya getirilmesiyle oluşmaktadır. Aşağıda (şekil 3) basitleştirilmiş bir Josephson eklemi görülmektedir.



Şekil 3. Basitleştirilmiş bir Josephson eklemi

Bir Josephson eklemi ideal bir frekans-gerilim dönüştürücüsüdür. Dc akım ile sürülmüş bir Josephson eklemi bir mikrodalga kaynak ile uyarıldığında, eklem üzerinde, daha önce de bahsedildiği gibi, uyarıcı sinyalin frekansı ile orantılı, sabit gerilim adımları oluşmaktadır. Bugün dünyada primer gerilim standardı olarak kullanılan ve kararlılığı yalnızca mikrodalga kaynağın ürettiği sinyalin frekansına bağlı olan, bu sabit gerilim adımlarıdır. Josephson eklem sisteminin basitleştirilmiş blok diyagramı şekil 4'te gösterilmiştir.



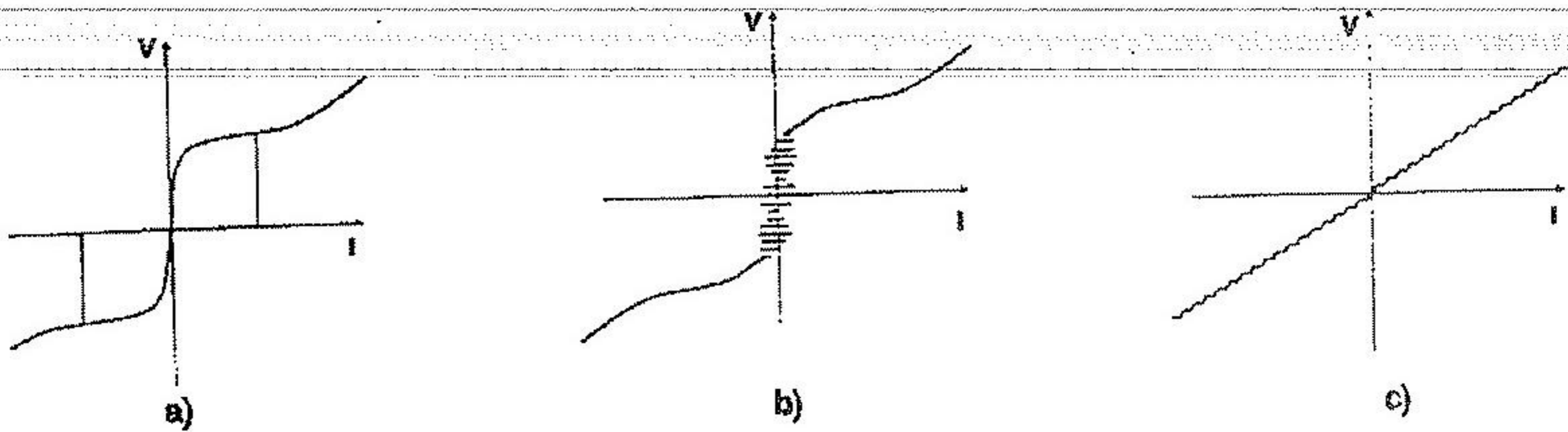
Şekil 4. Basitleştirilmiş Josephson Eklem Sistemi

Bir Josephson ekleminin çıkış gerilimi,

$$U_j = n \frac{1}{K_j} f \quad , n = 0,1,2...$$

olarak tanımlanmıştır. Burada U_j eklem gerilimi, f mikrodalga kaynağın ürettiği sinyalin GHz cinsinden frekansı, K_j ise Josephson sabitidir. $K_j = 2e/h$ değerinin temel SI birimleri cinsinden ifadesinde güçlüklerle karşılaşıldığından ve bu şekilde elde edilen K_j değerindeki belirsizlik yüksek olduğundan, K_j 'nin gerçek değeri yerine ona çok yakın konvansiyonel bir değer, K_{J-90} kabul edilmiş ve 1990 yılından itibaren tüm dünyada bu değer kullanılmaya başlamıştır [5]. Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Komitesi (International Committee on Weights and Measures (CIPM))'nin 1988'de önerdiği ve Ocak 1990'da uygulamaya giren bu değer, $K_{J-90} = 483597.9$ GHz/Volt 'tur.

Josephson eklem sistemi ile başlangıçta elde edilen gerilim değerlerinin pratik olarak kullanımı oldukça zordu. Tek bir Josephson eklemi üzerinden elde edilebilecek gerilim değeri en fazla mV'lar mertebesinde olabiliyordu. Daha yüksek gerilim değerleri elde etmek için çok sayıda Josephson ekleminin seri olarak bir araya getirilmesi gerekiyordu. Ancak bu durumda da, her bir eklemi sürececek birbirinden bağımsız çok sayıda dc akım kaynağına ihtiyaç duyulacaktı; bu ise biraraya getirilebilecek eklem sayısını, dolayısıyla elde edilebilecek maksimum gerilim değerini sınırlıyordu. Sürüm akımı problemi sonunda yüksek kapasitansa sahip eklemelerin üretilmesiyle çözümlendi. Bu tür eklemelerin en temel özelliği düşük mikrodalga güç ile uyarıldıklarında, üzerlerinde oluşan sabit gerilim adımlarının sıfır sürüm akımında ortaya çıkmalarıydı (şekil 5). Bu durum, serideki eklemelerin herbiri için ayrı bir akım kaynağı sorununu ortadan kaldırıyor, dolayısıyla çok sayıda eklemin biraraya getirilmesini ve tek bir akım kaynağı ile sürülmesini mümkün kılıyordu. Bu şekilde, sıfır-akım modunda çalışan, diğer bir deyişle sabit gerilim adımları sıfır sürüm akımında oluşan Josephson eklemelerinin seri olarak biraraya getirilip 1 V'a kadar hassas Josephson gerilim referansları elde edilmesi fikri ilk olarak 1976 yılında ortaya atıldı [6]. Bugün aynı şekilde, değerleri -15 V ile 15 V arasında değişen oldukça kararlı Josephson gerilim standartları elde edilebilmektedir. Birçok primer metroloji laboratuvarının gerilim referansı olarak kullandıkları bu standartlar ile 10^{-8} mertebelerinde bir belirsizlikle standart Weston pili veya elektronik referans standardı kalibrasyonu yapılabilmektedir [7].

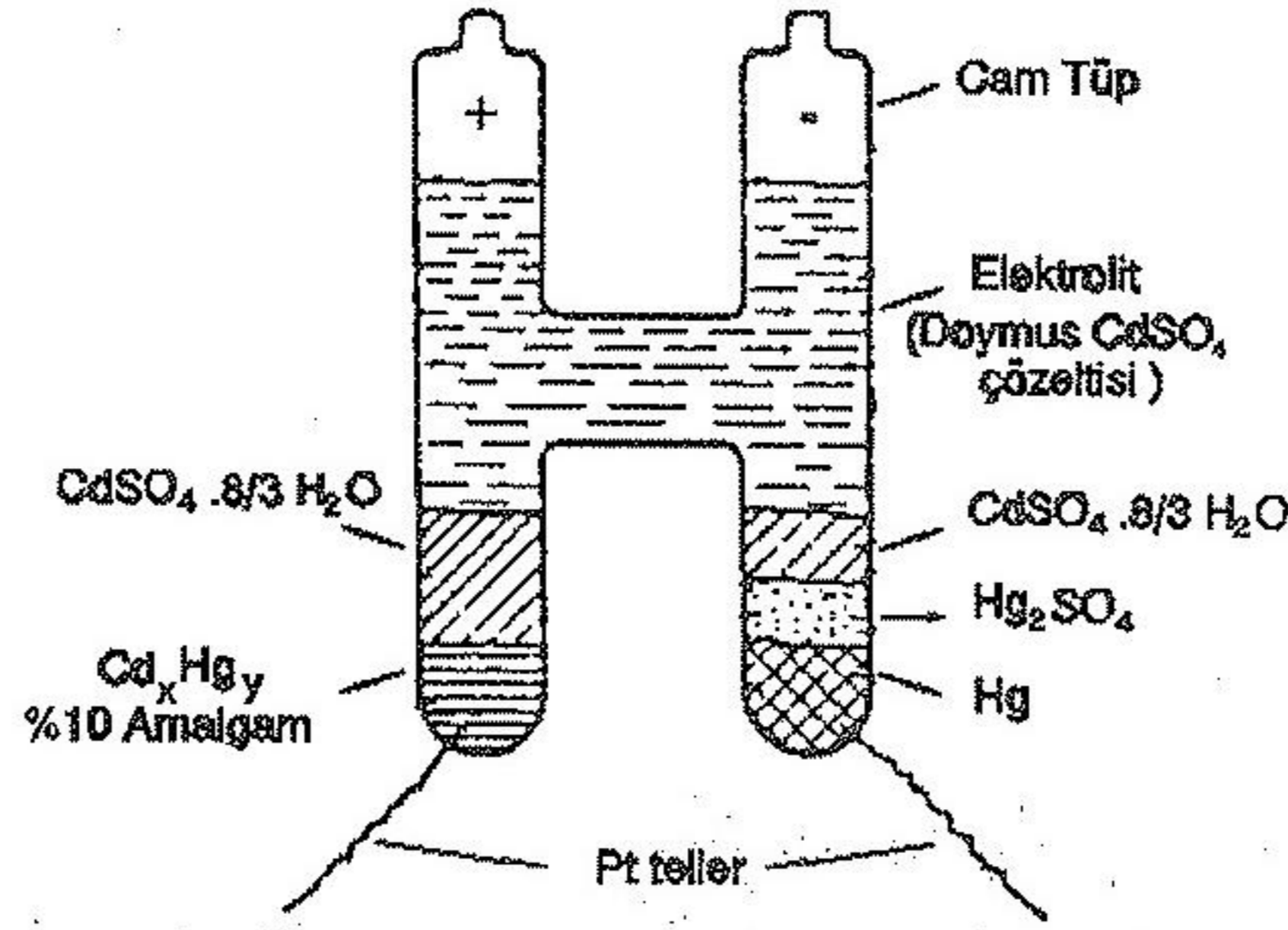


Şekil 5. Josephson ekleminin I-V karakteristiği: a) mikrodalga uyarısı olmadığında, b) düşük mikrodalga güç ile uyarıldığında sıfır-akım sabit gerilim adımları c) yüksek değerde mikrodalga güç ile uyarıldığında normal sabit gerilim adımları

3. Standard Weston Pilleri

İlk olarak 1892 yılında Edward Weston tarafından üretilen standart Weston pilleri, o tarihlerden itibaren gerilim biriminin elde edilmesinde uzun yıllar primer standart olarak kullanılmışlardır. 1972 yılında Josephson eklem sisteminin kullanılmaya başlamasıyla sekonder konuma düşen standart piller, bugün hala birçok Ulusal Metroloji laboratuvarının primer gerilim standardını teşkil etmektedirler.

Bir Weston pili temel olarak doymuş kadmiyum sülfat (CdSO_4) çözeltisi içinde kadmiyum amalgam bir anod ile civa/civa-sülfat bir katod içeren "H" şeklinde cam bir tüpten oluşmaktadır. Pil çıkış gerilimi anod ve katod üzerine iştirilmiş platin teller üzerinden alınmaktadır. Tipik bir doymuş Weston pilinin yapısı şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Doymuş Weston pilinin yapısı

3.1 Standart Pillerin Karakteristikleri

Doymuş bir Weston pilinin emf değeri 20°C 'de ortalama 1.0186 V 'tur. Pil emf değerinde yılda $0-10\ \mu\text{V}$ arasında bir azalma gözlenmektedir. Pillerin uzun süreli kararlılıkları, temel olarak yapılarında yer alan elektrolitin pH değeri ile ilişkilidir (Froehlich 1974).

Weston pillerinin sıcaklık katsayıları 20°C 'de yaklaşık $-40\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 'dir. Bu değer, gerçekte, pilin anod ve katod uçlarının sıcaklık katsayıları arasındaki farktır. "+" ucun (anod) sıcaklık katsayısı $310\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ iken "-" ucun (katod) sıcaklık katsayısı $-350\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 'dir. Bu nedenle, pilin her iki ucu, eşit sıcaklıkta bulundurulmalıdır. 1 ppm'lik bir sıcaklık belirsizliği elde etmek için iki uç arasındaki sıcaklık farkının $2\ \text{m}^\circ\text{C}$ 'den daha az olması gerekmektedir. Bir pil ani bir sıcaklık değişimine maruz kaldığında emf değeri sıcaklık katsayısı ile orantılı biçimde değişmektedir. Pilin eski değerine kavuşması için her bir derecelik sıcaklık farkı için yaklaşık 1 gün beklenmelidir.

Bir Weston pili üzerinden akım çekildiğinde çıkış gerilimi düşmektedir. Bunun en önemli nedeni pillerin 500-1000 Ω arasında değişen bir iç dirence sahip olmalarıdır. 0.1 μA 'lık bir akım değeri bile yaklaşık 50 μV 'luk veya 50 ppm'lik bir gerilim düşümüne neden olabilmektedir. Bu nedenle, standart piller yalnızca sıfır-akım, sıfır-denge devrelerinde kullanılabilirler.

Titreşim, pil değerinde değişime neden olabilmektedir. Değişim miktarı ppm'in onda biri mertebelerindedir. Çok hassas ölçümler yapmak için pillerin titreşimden yalıtılmış özel yerlerde korunmaları gerekmektedir.

3.2. Standart Pillerin Muhafaza Edilmesi

Standart piller genel olarak sıcaklık kontrollü ve titreşimden yalıtılmış özel alanlarda muhafaza edilmelidirler. Pillerin muhafazasında, oda sıcaklığının $\pm 1^\circ C$ 'de kontrol edilmesi ilk koşuldur. Bu koşul sağlansa bile, bir pilin diğer pillerle hassas olarak karşılaştırılması mümkün olamamaktadır. Bunun için, pillerin, sıcaklığı en fazla birkaç mK civarında değişen sıcaklık kontrollü özel kutularda veya yağ banyolarında bulundurulması gerekmektedir. Bu tür kutu veya yağ banyolarında sıcaklık kararlılığı genel olarak, bir kolu sıcaklığı algılayan termistörü, bir kolu, değeri, istenen sıcaklık noktasındaki termistör rezistansı ile aynı olan hassas bir direnç içeren, diğer iki kolu ise 1:1'lik bir direnç oranı sağlayan bir dc veya bir ac köprü devresiyle sağlanmaktadır. Köprü çıkış gerilimi, kutu veya yağ banyosunun sıcaklığını ayarlayacak ısıtıcı akımı sürmekte kullanılmaktadır.

Standart piller genel olarak belirli sayılarda, gruplar halinde muhafaza edilirler. Bunun nedeni pillerin tek başlarına düzensiz değişimler göstermeleridir. Bir laboratuvarın referans gerilim değeri olarak kullandığı değer, muhafaza ettiği grup içindeki pillerin emf değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Ticari olarak üretilmiş standart pil kutuları genel olarak 4 veya 12 pil içermektedir. Farklı piller ve herbir pilin kendi iki bölgesi arasındaki sıcaklık birliğini sağlamak amacıyla, piller bir alüminyum blok içine yerleştirilmiştir. Alüminyum blok yıllık sıcaklık değişimi $\pm 0,01^\circ C$ yi geçmeyecek şekilde $30^\circ C$ 'lik bir sıcaklığa ayarlanmıştır. Kutu içindeki herbir pilin elektrotları platin teller ile bakır terminallere taşınmıştır. Ticari standart pil kutuları üzerinde ayrıca, ana besleme gerilimi olmadığı durumlarda sıcaklık kontrol devrelerini sürecektir ekstra bir güç kaynağı kullanımını mümkün kılacak düzenek de mevcuttur.

4. Elektronik Dc Gerilim Standartları

Elektronik dc gerilim standartlarının gelişimi son 10 yıl içinde oldukça hızlanmıştır. Elektrokimyasal yapıya sahip Weston pillerinin kullanım ve muhafazasında karşılaşılan güçlükler, bu tür standartların istenmeyen bazı özellikleri, üretici firmaları yeni arayışlara itmiştir. Üretim teknolojisindeki gelişmeler sonucu bugün kısa dönem kararlılıkları piller kadar iyi, muhafaza edilmeleri oldukça kolay, taşınabilir, üstelik pillerin sahip oldukları dezavantajlara sahip olmayan elektronik dc gerilim standartları elde edilebilmektedir.

4.1. Elektronik Dc Gerilim Standartlarının Karakteristikleri

Elektronik gerilim standartları 1 V, 1.018 V ve 10 V olmak üzere temel olarak üç farklı değerde üretilmektedirler. Bu tür standartlarda referans olarak, nominal değerleri 6 ile 7 V arasında değişen, yıllık kararlılıkları 1-2 ppm civarında olabilen Zener diyotlar kullanılmaktadır. 1 V ve 1.018 V'luk çıkış gerilimleri rezistiv bölücüler veya daha hassas teknikler, 10 V'luk gerilim değeri ise özel olarak seçilmiş, düşük gürültülü, yüksek kararlılıklı işlemsel kuvvetlendiriciler kullanarak elde edilmektedir. Bugün genel eğilim daha çok 10 V'luk standartlar üretme yönündedir. 10 V'luk referansların ölçülmeleri diğerlerine nazaran kolaydır; üstelik bu referanslarda termal emf etkisi daha az hissedilmektedir. Örneğin 1 μ V'luk bir termal emf, 1 V'luk referans için 1 ppm'lik bir hata yarattırken bu hata 10 V luk referans için 0.1 ppm'e karşılık gelmektedir. Üstelik, 10 V'luk referansların 10 V'luk Josephson standardı ile doğrudan karşılaştırılması bugün artık mümkün olabilmektedir.

Elektronik dc gerilim standartlarının yıllık kararlılıkları 1.5 - 15 ppm arasında değişmektedir. Ticari olarak üretilmiş en iyi standartlar, yıllık, 10 V için 1.5 - 2 ppm, 1V ve 1.018 V için ise 2-3 ppm civarında bir kararlılığa sahip olabilmektedir. Bu belirsizlik, çoğunlukla, bölücü devrelerinde kullanılan rezistiv elemanların değerlerinde zamanla meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır. Bu tür gerilim standartlarının kısa süreli kararlılıkları 0.2 - 0.5 ppm/ay arasında değişmektedir.

Elektronik referansların sıcaklık katsayıları 0.04 ppm/°C ile 1 ppm/°C arasındadır. 10 V'luk referanslar yaklaşık 0.05 ppm/°C'lik bir sıcaklık katsayısına sahiptirler. Bu değer 1 V ve 1.018 V 'luk referanslar için 0.1 ppm/°C civarındadır.

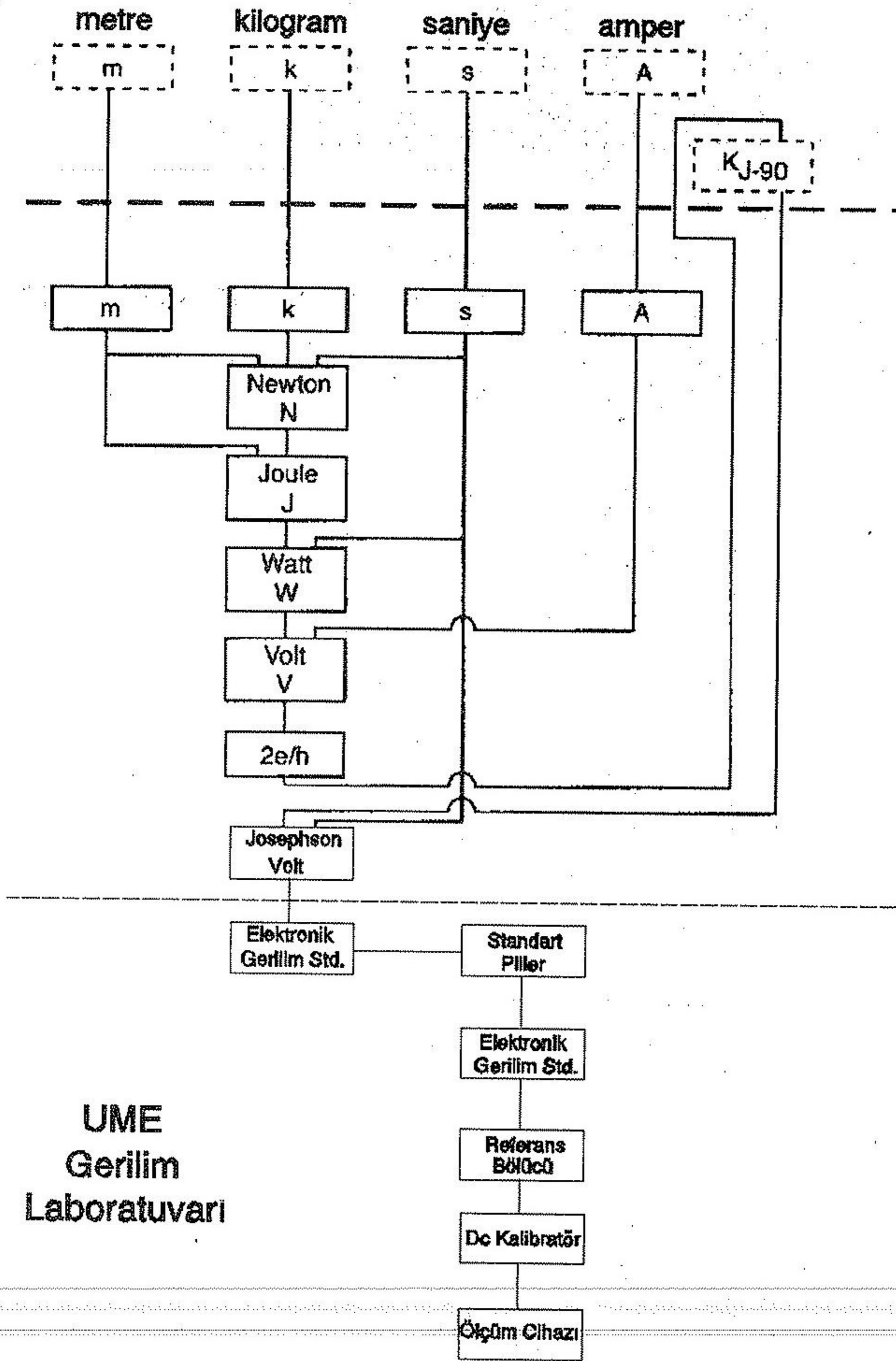
4.2. Elektronik Dc Gerilim Standartlarının Muhafaza Edilmesi

Elektronik dc gerilim standartlarının muhafaza edilmesi, standart pillerinkine nazaran oldukça kolaydır. Bu tür standartlar titreşim, sıcaklık gibi ortam şartlarına piller kadar duyarlı değildirler. Bu nedenle hareket ettirilmeleri ve taşınmaları mümkün olabilmektedir. Transfer standart olarak kullanılan, taşınabilir referanslar daha çok bu tür elektronik gerilim standartlarıdır. Bu standartların piller gibi sıcaklık kontrollü ortamlarda korunmaları, belirtilen karakteristiklerde çalışmalarını mümkün kılmak açısından önemlidir.

5. Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarı

UME Gerilim laboratuvarı'nda primer gerilim birimi 4'lü 2 grup standart Weston pili üzerinden elde edilmektedir. Ulusal gerilim birimi bu pillerin grup ortalamasıdır. Transfer standart olarak kullanılan elektronik bir dc gerilim standardı belirli periyotlarda yurt dışına gönderilmekte, orada primer Josephson Standardı ile karşılaştırıldıktan sonra izlenebilirliği UME Gerilim Laboratuvarı'na aktarmaktadır. Dc gerilim izlenebilirlik şeması şekil 7 'de verilmiştir.

UME önümüzdeki yıl içinde primer Josephson eklem sistemini kurmayı planlamaktadır. Bu sayede, ülkenin izlenebilirliğin elde edilmesi konusunda dışa olan bağımlılığı ortadan kalkacak, UME Gerilim Laboratuvarı, çalışmalarına dünya standartlarında primer bir düzeyde devam edecektir.



Şekil 7. Dc gerilim izlenebilirlik şeması

Kaynaklar

- [1] Josephson, B.D., Phy.Lett., 1962, 1, 251-253
- [2] Anderson, P.W., Rowell, J.M., Phy., Rev. Lett., 1963, 10, 230-232
- [3] Pöpel, R. Metrologia, 1992, 29, 153-174
- [4] Shapiro, S., Phy.Rev.Lett. 1963, 11, 80-82
- [5] Taylor, B.N., Witt, T.C., Metrologia, 1989, Vol.26, 47-62
- [6] Levinsen, M.T., Chiao,R.Y., Feldman, M.J., Tucker,B.A., Appl.Phys.Lett., 1977, 31,776-778
- [7] Niemeyer, J., Grimm, L., Metrologia, 1988, 25, 135-140.