

UME'DE HASSAS MAXWELL-WIEN KÖPRÜSÜ YAPIMI

Gülray Gülmez, Yakup Gülmez, Enis Turhan, Turgay Özkan

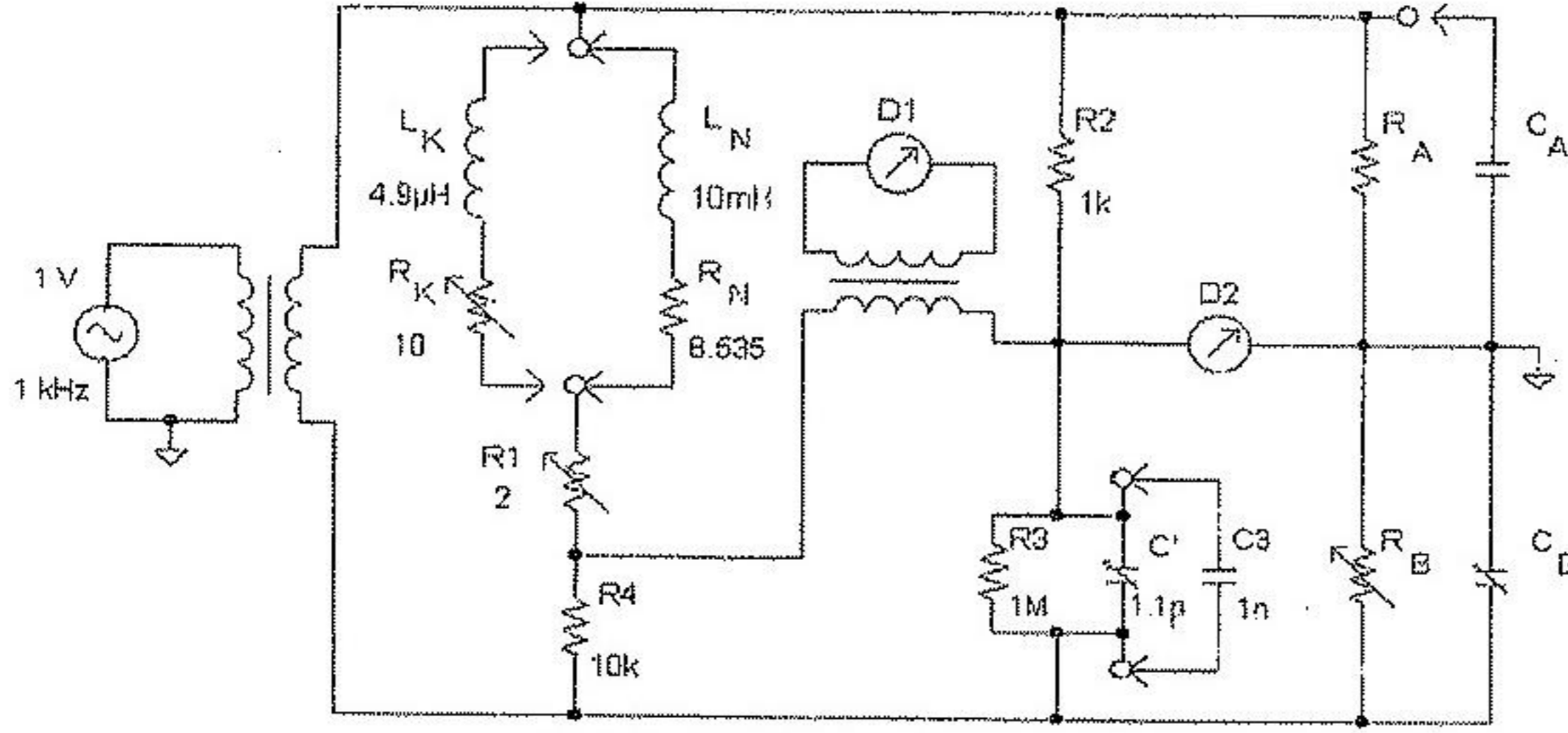
TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), P.K.: 21 41470 Gebze-KOCAELİ
Tel: 262 646 63 55 E-mail: gulay.gulmez@ume.tubitak.gov.tr

ÖZET

İndüktans birimi Henry, UME'de Maxwell-Wien İndüktans Ölçüm Köprüsü ile direnç ve kapasitans birimlerine bağlı olarak birincil seviyede elde edilmektedir. 1997 yılında Maxwell-Wien Köprüsü'nün UME Kapasitans Laboratuvarı'nda kurulmasının ardından ölçüm belirsizliğini düşürme çalışmaları yapılmıştır. Söz konusu ölçüm belirsizliğinin Kasım 1997'de PTB ile yapılan karşılaştırma ölçümlerinde 10 mH indüktans değerinde 1σ 'da 10 $\mu\text{H}/\text{H}$ olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu karşılaştırmanın ardından Maxwell-Wien Köprüsü tasarımı yeniden gözden geçirilmiş ve köprüdeki artık parametrelerin en aza indirilmesi ve daha önemlisi kararlı hale getirilmesi için yeni bir tasarım yapılmıştır. Söz konusu bu yeni tasarım sonrası Aralık 1998'de PTB ile 10 mH indüktans değerinde bir karşılaştırma daha gerçekleştirilmiştir. Bu bildiriye sonuçları sunulacak olan bu karşılaştırma ölçümlerine göre UME Kapasitans Laboratuvarı'nda kurulmuş olan Maxwell-Wien Köprüsü'nün ölçüm belirsizliği 1σ 'da yaklaşık 4 $\mu\text{H}/\text{H}$ olarak belirlenmiştir. Bu bildiriye söz konusu ölçüm belirsizliğine ulaşabilmek için yapılmış olan çalışmalardan, artık parametreleri en aza indirmek için göz önüne alınmış olan tasarım prensiplerinden ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

1. GİRİŞ

İndüktanslar ve karşılıklı indüktanslar, geometrisine ve ölçülerine göre hesaplanabilir. Eğer geometrileri basit ve boyutları ölçülebilecek mertebede ise indüktans değeri kolaylıkla belirlenebilir. Fakat bu tip indüktanslar standart olarak kullanılamazlar. Doğru indüktans değeri, uygun köprülerle kapasitansın reaktansı, indüktansın empedansı ile karşılaştırılarak elde edilebilir. Hassas ölçümlerde indüktansın değerini bulmak için köprüde ufak değişimler elde edilebilmelidir. Bu tip köprülerde karşılaştırma metotları kullanıldığı için ölçüm devresine etki eden artık empedans etkileri azaltılabilir. Maxwell-Wien köprüsü uzun zamandır indüktans ölçümü konusunda en yaygın kullanılan köprüdür. Maxwell-Wien köprüsü J. C. Maxwell tarafından geliştirilmiş ve M. Wien tarafından da AC ölçümlere adapte edilmiştir. Uzun yıllardır da laboratuvarlar tarafından indüktans birimini elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 1'de Wagner kolları ile birlikte Maxwell-Wien köprüsü görülmektedir. Köprüde indüktans değeri aşağıdaki formülde belirtildiği gibi kapasitans ve direnç birimlerine bağlı olarak hesaplanır. Bu formül köprünün sanal dengesi oluşturulduğunda elde edilen ifadeyi gösterir. Köprüde sanal dengenin yanında gerçel dengenin de gerçekleşmesi gerekir.



Şekil 1. Maxwell-Wien Köprüsü

Gerçel denge ifadesi eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$L_N = (C' + C_3) \cdot R_2 \cdot R_4 - L_{KÖPRÜ}$$

(1)

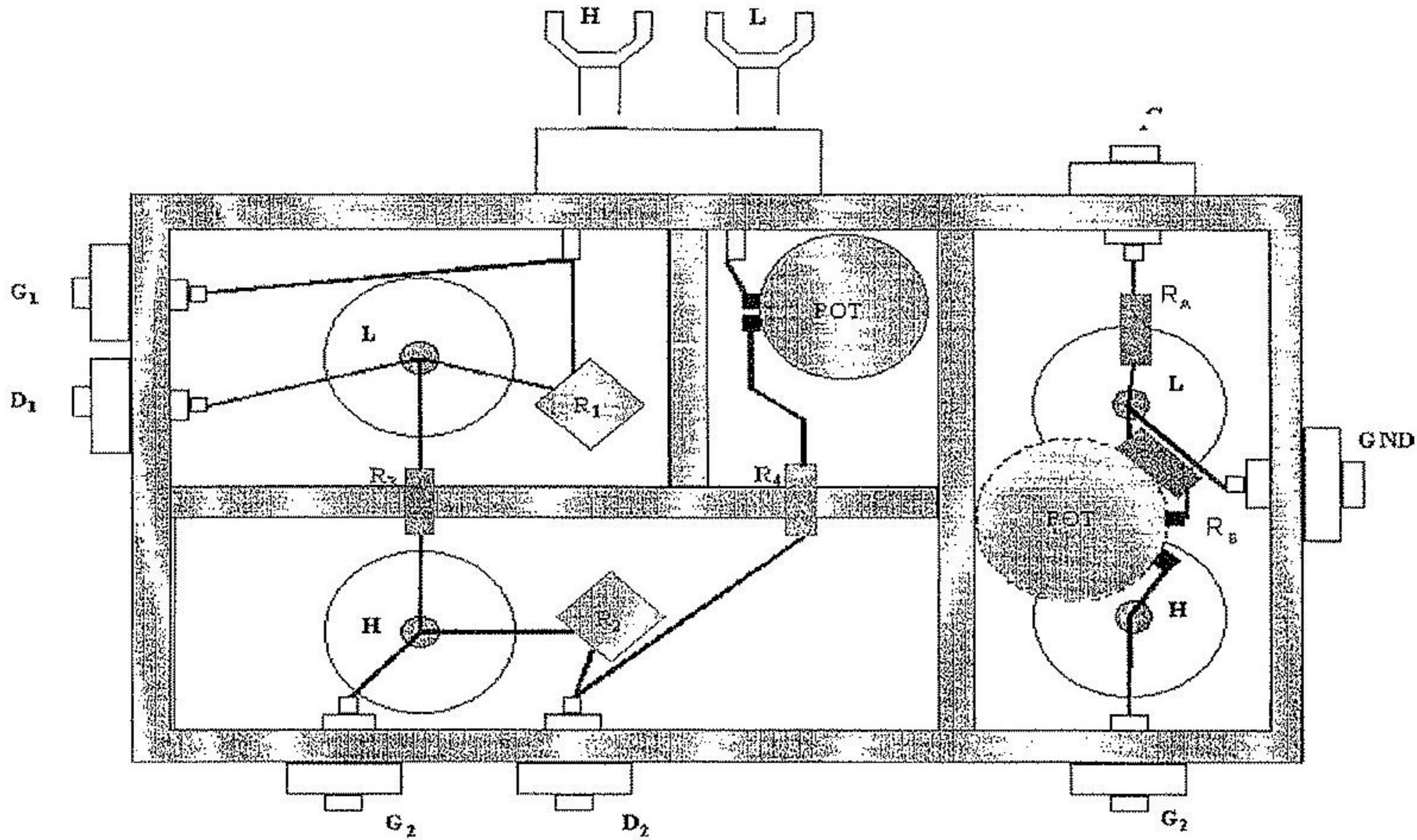
$$(R_K + R_1) / R_4 = R_2 / R_3$$

(2)

Eşitlikler konunun daha iyi şekilde anlaşılabilmesi için basitleştirilerek verilmiştir. Pratikte ise tek bir direncin sadece dirençten oluşması veya kapasitörün tek bir kapasitörden oluşması mümkün değildir. Artık empedans etkileri elemanlar üzerinde sistematik hataları oluştururlar. Bu yüzden hata düzeltmelerini doğru yapabilmek için veya dikkate alınmayacaksa mertebesinin bilinmesi için devrenin çok iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekir.

2. UME'DE YAPILAN MAXWELL-WIEN KÖPRÜSÜ

Maxwell-Wien teorisine göre Maxwell-Wien Köprüsü'nde kullanılan kapasitans ve direnç standartları, indüktansın değerini ve belirsizliğini belirleyen temel parametrelerdir. Bu nedenle Maxwell-Wien Köprüsü'nün belirsizliğini düşürme çalışmalarında ilk olarak bu nokta hedef alınmıştır. İndüktansının değerinin belirlenmesinde kullanılan R_2 ve R_4 dirençleri $1 \text{ k}\Omega$ ve $10 \text{ k}\Omega$ değerlerinde Vishay tipi dirençler seçilmiştir. Vishay tip dirençlerin sıcaklık katsayıları $-0.6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ olduğundan dikkate değer herhangi bir sıcaklık hatası gelmemektedir. Ayrıca Vishay tip dirençlerin AC karakteristikleri de çok iyidir. 1 kHz 'de yaklaşık 20 nH 'lik bir artık indüktansa sahiptirler. Artık indüktansın büyük bir kısmı direncin komponent kısmında değil bağlantı kollarında bulunmaktadır. Bu yüzden direncin tanım noktaları mümkün olduğu kadar kısa seçilerek devreye bağlanmıştır. Bu artık indüktanslar köprünün karşılıklı kollarına denk geldiğinden birbirini yok etmektedir. Köprüde kullanılan R_3 direnci $1 \text{ M}\Omega$ nominal değere $\pm 15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ sıcaklık katsayısına sahiptir. Köprünün gerçel dengesini sağlamak için kullanılan R_1 ayarlı direnci L_N indüktansına seri olarak bağlanmıştır ve 0.7 ppm çözünürlüğe sahiptir. Şekil 1'de L_N standart indüktansının DC direnci R_N olarak gösterilmiştir. R_0 direnci ise L_0 kısa devre indüktansının DC direncidir. R_A ve R_B dirençleri de Maxwell-Wien köprüsünün Wagner kollarında kullanılmaktadır. Köprüde kapasitans birimini iki ayrı kapasitans standardı oluşturmaktadır ve bu standartlar birbirine paralel bağlanmaktadır. C_3 standardı 1 nF nominal değere sahip dielektrik malzemesi hava olan standart kapasitördür. C' ayarlı kapasitans



Şekil 2. Maxwell-Wien Devresi'nin yerleştirildiği kutu

standardının değeri 0.25 pF ile 10 pf arasında 0.03 fF çözünürlükle değişebilmektedir. C_A ve C_B ayarlı kapasitans standartları köprünün Wagner kolunda kullanılmaktadır. Ölçüm sistemi ile sinyal kaynağı arasında izolasyon transformatorü kullanılmıştır. İzolasyon transformatorü ile ölçüm sistemi elektriksel olarak birbirinden izole edilmiştir. Ölçüm sistemi ile detektör arasında yine izolasyon transformatorü kullanılarak elektriksel izolasyon elde edilmiştir. Maxwell-Wien indüktans ölçüm sisteminde oluşan hataları azaltmak için şekil 2'de gösterildiği gibi sistemin bağlantıları bir kutu içinde yapılmıştır.

Maxwell-Wien Köprüsü 5mm kalınlığındaki bakır kutu içine konularak elektro-statik ve elektro-manyetik ekranlama yapılmıştır. Kutunun yekpare bakırdan yapılmış olması ile kötü iletkenlikten dolayı ekran üzerinde oluşabilecek çeşitli yönlerdeki çevre akımlarının bozucu etkileri en aza indirilmiştir. Bakırın kalınlığının 5 mm olması da düşük frekanslarda da manyetik ekranlama özelliğinin devamını sağlamıştır.

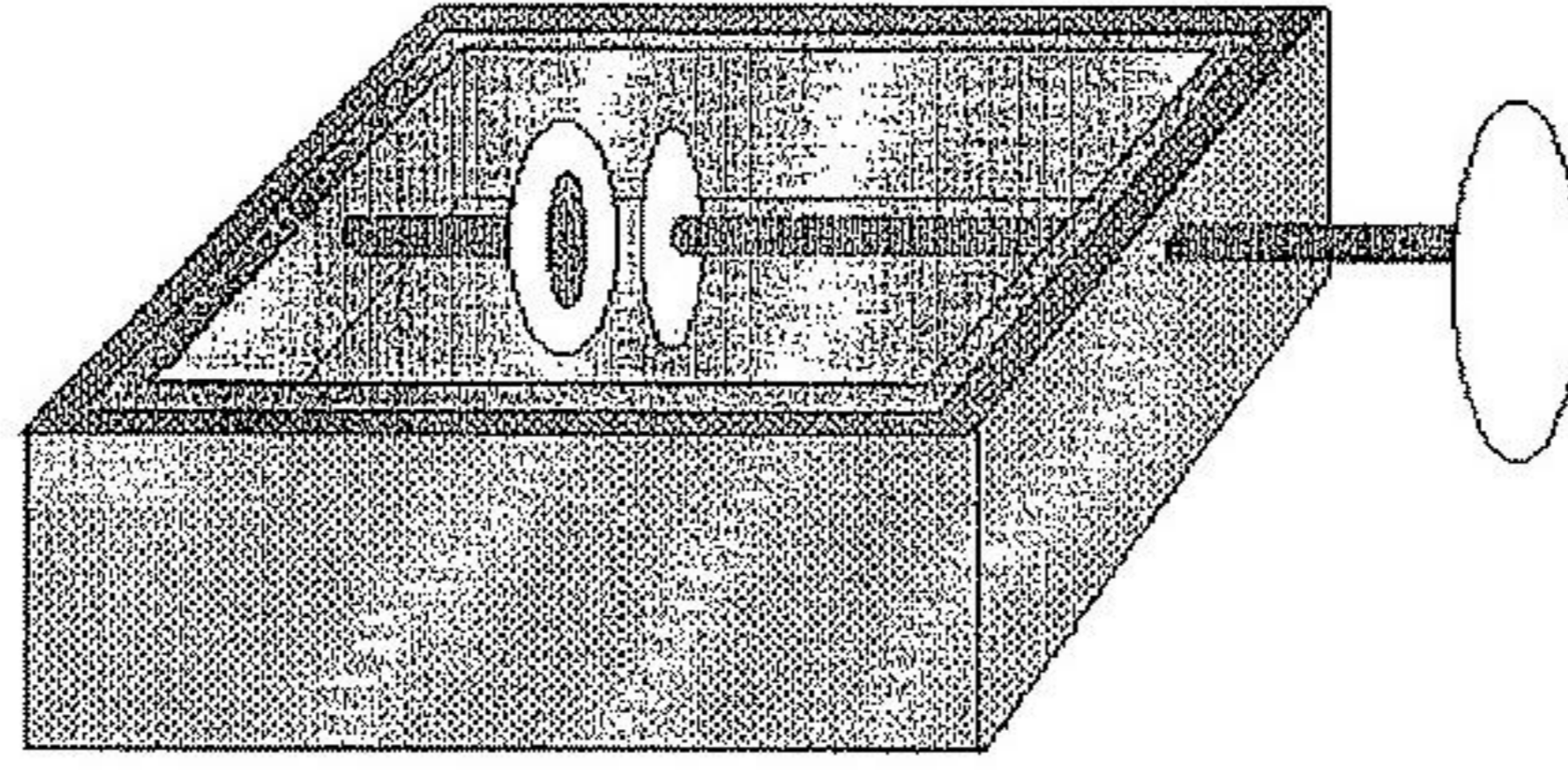
Maxwell-Wien Köprüsü'nün ana kolunda kullanılan kapasitans standartlarının bağlantı konnektörleri GR874 tipindedir ve köprünün bakır kutusuna doğrudan kablosuz bağlanmıştır. Maxwell-Wien Köprüsü'nün Wagner kolu ve ana kolunda kullanılan dekat kapasitörler ise sisteme GR874-konnektörlerine sahip özel kablolarla bağlanmaktadır. Bu tip kablolar GR874 tipli konnektörlerle yapıldığından BNC tipine göre düşük artık parametreye sahiptir. GR874 konnektörlerin kullanılması ile köprüdeki kapasitansın ölçüm için devreden sökülmesi esnasında yapılan takıp çıkarma işlemlerinden dolayı oluşan tekrarlanabilirlik belirsizliği en aza indirilmiştir. Çünkü GR874 tipi konnektörlerin geniş yüzeyli kontak yapısı ile iletkenliği artırılmakta böylelikle artık direnç hatası en aza indirilmekte, çok iyi bir ekranlama sağlandığı için artık kapasitif etkilerin değişmezliği sağlanmakta böylelikle 3 uçlu kapasitans ölçümünde tekrarlanabilirlik sağlanmaktadır. Sonuç olarak GR874 tipli konnektörlerinin sistemde kullanılması sistemin artık parametrelerini azaltmış ve tekrarlanabilirliğini artırmıştır.

UME Kapasitans Laboratuvarı'nda yapılmış olan Maxwell-Wien Köprüsü'nde indüktans standardının değerinin değişimi sıcaklık kontrollü sistemle çok dar bir bölgeye sıkıştırıldığından kapasitans standardının değerini değiştirebilmek için gerekli olan değişken kapasitans standardının çözünürlüğü ve kararlılığı çok iyi olmak zorundaydı. Ayrıca yapılacak olan

değişken kapasitans standardı paralel olarak bağlanacağı GR1404 kapasitans standardının kayıp faktörünü de etkilememesi gerekmektedir. Şekil 1'de 'C' olarak gösterilen değişken kapasitans standardının yapımını sınırlayan bu hususlara dikkat edilerek UME Kapasitans Laboratuvarı'nda şekil 3'te gösterilen değişken kapasitans standardı tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (3)$$

Şekil 3'te görüldüğü gibi fosfor-bronz plakalar arasında oluşan kapasitans eşitlik 3'te verilen bağıntıdan hesaplanabilir. Eşitlik 3'te görülebileceği gibi değişken bir kapasitansı elde etmek için iki seçenek vardır. İlk yöntem kapasitansı oluşturan plakaların alanlarını değiştirmek, ki bu çok zordur ve doğrusallığı tam olarak sağlanamayabilir; ikinci yöntem ise kapasitansı oluşturan plakalar arası mesafeyi değiştirmektir.



Şekil 4. UME'de yapılmış olan Değişken Kapasitans Standardı

UME'de yapılmış olan değişken kapasitans standardı kapasitansı oluşturan plakalar arası mesafeyi değiştirme mantığına dayanmaktadır.

Şekil 3'te gösterilen değişken kapasitans standardını üç kısımda inceleyebiliriz. Birinci bölüm, sistemin iskeletini oluşturan ve elektrostatik ekranlamayı sağlayan 5mm kalınlığındaki duru alüminyumdan imal edilmiş olan kutu kısmı, ikinci bölüm, iki adet fosfor-bronz alaşımından 40 mm çapında dairesel olarak imal edilmiş olan plakaların birbirine paralel olarak biri hareketli diğeri sabit millere tutturulması ile elde edilmiş olan değişken kapasitans standardını oluşturan elektrotlar kısmıdır. Fosfor-bronz plakaların yine bronzdan imal edilmiş olan millerden elektriksel olarak izole edilmesi gerekmektedir. Bunun için fosfor-bronz plakalar politetrafuloretilden (PTFE) yapılmış olan dairesel yapıların üzerine yapıştırılarak elektriksel izolasyon sağlanmıştır. Değişken kapasitans standardının değerini ayarlamak için hareketli olması gereken milin hareketi milin vida şeklinde imal edilmesi ile sağlanmıştır. Bu vida şeklindeki milin kutunun dışındaki dairesel biçimdeki hareket kolundan bir el hareketi ile döndürülmesi suretiyle kapasitansı oluşturan plakaların eksenine dik bir yatay hareket sağlanır ve bu şekilde kapasitansı oluşturan plakalar arası mesafe değiştirilerek kapasitansın değerinde değişim sağlanmış olur. Vida biçiminde imal edilmiş olan milin vida adımı yaklaşık 0.5 mm civarındadır bu şekilde de değişken kapasitans standardının çözünürlüğü 0.03 fF mertebelerinde elde edilmesi sağlanmıştır. Hareketli olan mil toplam 80 tur atabilmektedir ve değişken kapasitans standardının değeri 0.25 pF-10 pF arasında değişebilmektedir. Maxwell-Wien sisteminde kullanılan tüm kapasitans standartları üç uçlu olarak tanımlanmıştır, bu yüzden değişken kapasitans standardının da üç uçlu tanımlanma zorunluluğu vardır. Bu noktadan yola çıkarak değişken kapasitans standardının dış ekranı üçüncü uç olarak tanımlanmıştır ama değişken kapasitans standardının AH2500A ile yapılan testlerinde kararlılığının ve çözünürlüğünün istenen seviyede olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni ise dış ekranın plaka yüzeyleri ile arasında oluşan parazitik kapasitansın etkisiydi. Bu sebepten plakalarla özellikle

yüzeyleri ile arasında oluşan parazitik kapasitansın etkisiydi. Bu sebepten plakalarla özellikle hareketli olan plaka ile toprak (üçüncü uç) arasında daha kararlı bir kapasitans oluşturulması gerekmekteydi. Bu da Şekil 3'te gösterilmeyen ama kutunun içine yapılmış olan ikinci bir ekranla sağlanmıştır. Ayrıca kapasitansın sıcaklık bağımlılığını en aza indirmek için değişken kapasitans standardını oluşturan kutu içine ısı izolasyonunu sağlamak için köpük yerleştirilmiştir. Yapılan bu son işlemler ile değişken kapasitans standardının kısa dönem kararlılığı 0.01 fF olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak 10 mH değerinin Maxwell-Wien köprüsünde elde edilme belirsizliğinde değişken kapasitans standardından gelen hata 0.1 ppm'in altına indirilmiştir. Değişken kapasitans standardının dielektrik malzemesi Şekil 3'te görüldüğü gibi havadır ve bu yüzden GR1404 Kapasitans standardının kayıp faktörünün artması yönünde önemli bir etkisi bulunmamaktadır.

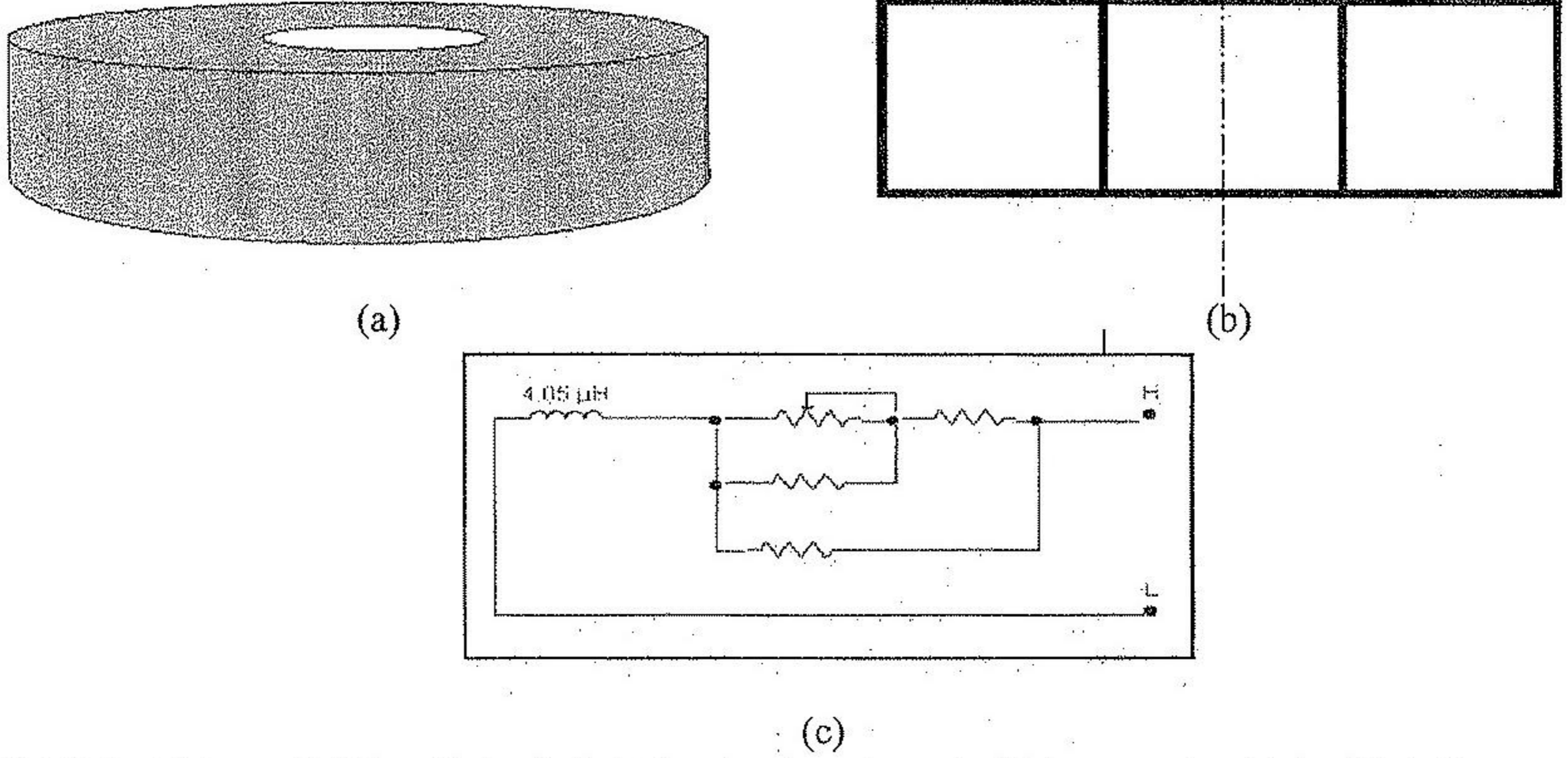
İlk tasarlanan durumda UME'de yapılmış olan Maxwell-Wien Köprüsü'nde GR1404 1000 pF hava dielektrikli kapasitans standardı kullanılmıyordu, bunun nedeni UME Maxwell-Wien Köprüsü'nde kullanılan GR1482-H tipindeki indüktans standardının değeri 9.99902 mH ile 9.99975 mH değerleri arasında olmasıydı. Maxwell-Wien Köprüsü'nün denge durumunda 1000 pF'lık nominal değerden daha düşük bir nominal değere sahip kapasitans standardı kullanılabilmesi için ölçümü yapılacak olan indüktans standardının değerinin 10 mH anma değerinden büyük olması gerekmektedir. Bu nedenle 1997 yılında yapılmış olan köprüde GR1413 dekat kapasitans standardı zorunlu olarak kullanılmış ve Maxwell-Wien Köprüsü'nde indüktans standardı kapasitans ve direnç standartlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Burada kullanılan GR1413 dekat kapasitans standardının çözünürlüğü 1pF ve dielektrik olarak kullanılan malzeme ise mikadır. 1997 yılında yapılmış olan Maxwell-Wien Köprüsü'nde her ölçüm alınıp denge durumu elde edildikten sonra dekat kapasitans standardının köprüden sökülerek AH2500A dijital kapasitans köprüsünde ölçülmesi zorunluluğu vardı. Sık sık yapılan bu söküp takma işlemleri nedeni ile köprü'nün kararlılığı olumsuz yönde etkilenmekteydi. GR1413 dekat kapasitans standardının mika dielektrikli olması kapasitansın kayıp faktörü hava dielektrikli olan GR1404 kapasitörünün kayıp faktöründen yüksek olmasını sağlamıştır. Kayıp faktörünün yüksek olması kapasitans standartlarında kısa dönem kararlılığını etkilemekte ve bu da Maxwell-Wien Köprüsü'nde toplam belirsizliği artırmaktadır. GR1404 hava dielektrikli kapasitans standardının kullanılmak istenmesinin nedeni sıcaklık bağımlılığı 5 ppm/C° ve kayıp faktörünün değeri $D_{1kHz} < 10^{-5}$ olmasıdır. Oysa GR1413 Dekat kapasitans standardının sıcaklık bağımlılığı 20 ppm/C° ve kayıp faktörünün değeri $D_{1kHz} < 3 \cdot 10^{-4}$ olmaktadır ayrıca GR1413 dekat kapasitans standardının çözünürlüğü düşüktür [2]. UME'de yapılmış olan çözünürlüğü ve kısa dönem kararlılığı daha iyi olan değişken kapasitans standardı ile bu sorunların üstesinden gelinmiştir[2]. Ayrıca GR1482-H tip standart indüktansın sıcaklık belirsizliği 40-50 ppm'ler mertebesinde olması [2] indüktans standardının değerinin laboratuvar sıcaklığının değişimine bağımlılığını artırmakta bu da Maxwell-Wien ölçüm sisteminin belirsizliğini artırmaktadır. Buraya kadar anlatılan Maxwell-Wien Köprüsü'nün belirsizliğini etkileyen hususları değiştirmenin ilk adımı kısa dönem kararlılığı yüksek olan GR1413 Dekat kapasitans standardının yerine kısa dönem kararlılığı daha iyi olan GR1404 kapasitans standardı kullanmak ve eşitlik 1'de görülebileceği gibi indüktansın değerini 10 mH anma değerine yükseltmek ve ikinci aşama olarak indüktans standardının sıcaklık bağımlılığını en aza indirmek için indüktans standardı sıcaklık kontrollü hale getirmektir. Sıcaklık kontrollü sistemde, indüktans standardının yerleştirildiği sıcaklık, 33°C'lar civarında seçilerek indüktansın değeri 10.004379 mH değerine yükseltilmiştir. İndüktansın değerinin yükseltilmesi ile Maxwell-Wien ölçüm sisteminde GR1413 dekat kapasitans standardı kullanma zorunluluğu ortadan kalkmıştır ve bu kapasitans standardının yerine amaçlandığı gibi GR1404 hava dielektrikli kapasitans standardı kullanılabilmiştir. Yapılan değişikliklerle Maxwell-Wien Köprüsü'nün laboratuvar sıcaklığına

Maxwell-Wien Köprüsü teorisine göre indüktans değerinin iyi tayin edilebilmesi için Maxwell-Wien devresinin artık indüktanslarının da ölçülüp, standart indüktör ölçümünden elde edilen sonuçtan çıkarılması gerekmektedir. Eşitlik 1'de L_N standart indüktansının denge denklemi, eşitlik 4'te L_K kısa devre indüktansının denge denklemi gösterilmektedir. Eşitlik 1 ve 4'ü taraf tarafa birbirlerinden çıkarırsak, eşitlik 5'te gösterildiği gibi köprünün artık parametrelerini ifade eden $L_{KÖPRÜ}$ teriminden kurtulunmuş olunmaktadır. Eşitlik 5'te gösterildiği gibi L_N standart indüktansının değerini hassas olarak belirleyebilmek için L_K kısa devre indüktansının kararlı olması gerekmektedir.

$$L_K = R_2 \cdot R_4 \cdot C' - L_{KÖPRÜ} \quad (4)$$

$$L_N = R_2 \cdot R_4 \cdot (C_3 + C' - C'') + L_K \quad (5)$$

UME'de yapılmış olan kısa devre indüktans standardında amaçlanan hedef yüksek çözünürlük ve kararlılık elde edilmesi idi. Bu nedenle bakırdan 90mm x 45mm x 25mm boyutlarında içi vakumlanmış toroidal bir çekirdek blok halindeki bakır kütlenin işlenmesi sonucunda yapılmıştır. Şekil 5'te kısa devre indüktansının toroidal çekirdeği ve elektriksel şeması gösterilmektedir. Kısa devre indüktansının toroidal çekirdek kısmı iki parçadan oluşmaktadır. Bu iki parça gümüş kaynak ile birbirine monte edilmiştir. Burada gümüş kaynağın seçilmesinin nedeni iyi bir iletken olan bakırın iletkenliğinde herhangi bir kayba yol açmamak ve dolayısıyla toroidal manyetik çekirdeğin kaynak noktalarında oluşabilecek olan herhangi bir manyetik direnç kaybına neden olmamaktır. Toroidal çekirdeğin içinde oluşmuş olan hava kanalındaki hava kaynak sırasında oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı havanın genleşmesi ile dışarı çıkar, soğuma işlemi ile birlikte içeride vakumlanmış ortam oluşur. Burada oluşan vakum etkisinin toroidal çekirdeğin sıcaklık bağımlılığının azaltılması ve manyetik alan çizgilerinin daha düzgün dağılması yönünde katkısı olmuştur. Bakırın kalınlığının 6 mm olarak seçilmiştir ki bu da diamanyetik malzeme olan bakırın manyetik özelliklerini iyileştirmiştir. Kısa devre indüktansı bu toroidal çekirdeğin etrafına 0.6 mm çapındaki bakır telin 40 tur sarılmasıyla 4.05 μ H'lik indüktans değeri elde edilmiştir. Sıcaklık kontrollü indüktansın direnç değeri 8.860 Ω 'lar civarında olması rezistif dengeleme açısından kısa devre indüktansının da toplam direncinin bu mertebelerde olmasını gerektirmektedir.



Şekil 5. a) Maxwell-Wien Sisteminde kullanılan kısa devre indüktansının toroidal çekirdeği
b) Toroidal çekirdeğin kesiti
c) Maxwell-Wien Köprüsünde kullanılan kısa devre indüktansının elektriksel devre şeması

Bu nedenle kısa devre indüktansına çözünürlüğü sağlamak için 8.860Ω mertebesinde ayarlı bir seri direnç eklenmiştir. Daha sonra bu sistem elektrostatik ekranlama için 5mm kalınlığındaki duru alüminyum kutu içine yerleştirilmiştir. Sıcaklık kararlılığını sağlayabilmek amacı ile kutu içine köpük parçalar yerleştirilmiştir. Yapılan kısa devre indüktansının kısa dönem kararlılığı 10 nH olursa indüktansın elde edilme belirsizliğine kısa devre indüktansının katkısı 1ppm civarındadır. Bizim yaptığımız indüktans da bu değer 2 nH'dir. Ayrıca kısa devre indüktansına seri bağlanan direncin çözünürlüğü de indüktansın elde edilme belirsizliğini önemli ölçüde etkilemektedir. UME'de yapılan sistemde kısa devre indüktansının belirsizliği 1nH olup sisteme 0.1 ppm hata getirmektedir.

3. UME-PTB ARASINDA GERÇEKLEŞEN ULUSLARARASI KARŞILAŞTIRMA

Yukarıda anlatılan 1998 yılı içerisinde UME Maxwell-Wien Köprüsü'nde yapılan iyileştirmelerin sonuçları alındıktan sonra sistemin belirsizliğinin uluslararası düzeyde ispat edilmesi için PTB ile 1998 yılı içerisinde bir uluslararası karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda görülmüştür ki UME'de gerçekleştirilen Maxwell-Wien Köprüsü ile hedeflenen belirsizlik seviyesine ulaşılmıştır. Bu uluslararası karşılaştırmaya ilişkin olarak PTB ve UME'nin ölçüm sonuçları ve ölçüm belirsizlikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 2'de UME-Maxwell-Wien Köprüsü'nün belirsizlik kaynakları tanımlanmıştır. Bu tabloda en dikkati çeken husus A tipi ölçüm belirsizliğinin 0.47 ppm mertebelerinde olmasıdır. A tipi belirsizlik çok küçük olduğu halde B tipi belirsizlik terimleri çok büyüktür. Burada ilk dikkati çeken 1000 pF'lık kapasitansın sıcaklık kararlılığından oluşan belirsizliktir ki değeri 2.88 ppm mertebesinde dir. Bundan sonra belirsizliği oluşturan en büyük terimler kapasitans ve direnç ölçümlerinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 1. 1998Yılında UME-PTB arasında gerçekleştirilen uluslararası karşılaştırmada UME'nin ölçüm sonuçları.

Enstitü	Tarih	L_3
PTB	12.11.1998	$10.004381 \pm 5.62 \times 10^{-6}$ mH
UME	23.12.1998	$10.004379 \pm 4.68 \times 10^{-6}$ mH

Tablo 2. UME-Maxwell-Wien köprüsü'nün belirsizlik kaynakları

Belirsizlik Kaynakları	Belirsizlik(ppm) ($\sigma=1$)
A tipi ölçüm belirsizliği	0.47
1000 pF C_3 Kapasitansının ölçüm belirsizliği	1.5
R_1 direnci ölçüm belirsizliği (DC)	0.8
R_2 direnci ölçüm belirsizliği (DC)	0.8
R_1 direnci frekans bağımlılığından kaynaklanan belirsizlik	0.75
R_2 direnci frekans bağımlılığından kaynaklanan belirsizlik	0.75
10 mH indüktans standardının sıcaklık kararlılığından oluşan belirsizlik	0.3
Kısa devre kapasitansının ölçüm belirsizliği	0.82
Kısa devre indüktansının kısa dönem kararlılığı	0.4
Kapasitans standardının sıcaklık kararlılığından oluşan belirsizlik	2.88
R_1 standardının sıcaklık kararlılığından oluşan belirsizlik	0.35
R_2 standardının sıcaklık kararlılığından oluşan belirsizlik	0.35
Kapasitans standardının sıcaklık kararlılığından oluşan belirsizlik	0.01
Toplam Belirsizlik	3.786

4. SONUÇ

UME Kapasitans Laboratuvarı'nda 1998 yılında yapılan çalışmalar ile indüktans ölçüm belirsizliği hedeflenen seviyeye indirilmiştir. Ancak şu anda Maxwell-Wien Köprüsü'nün en önemli hata bileşeni, kapasitans ve direnç standartlarının UME'de birincil seviye olarak elde edilememesinden kaynaklanan transfer belirsizliğidir. UME Direnç Laboratuvarı'nın direnç standardında birincil seviyeye gelmesinden sonra UME Kapasitans Laboratuvarı'nda kapasitans standardı birincil seviye olarak elde edilecektir. Bundan sonra Maxwell-Wien Köprüsü'nde indüktansın elde edilme belirsizliği daha da geliştirilmeye açıktır.

5. KAYNAKLAR

- [1] GILBERT Engineering Co., Inc, "Precision Microwave Coaxial Components", G-1400-232
- [2] QuadTech, "Precision Bridges/Standards", JN3504-002, GenRad Inc, 1990
- [3] Gülmez Y., Turhan E., Gülmez G., UME, H. Eckardt p. Rather PTB, "Intercomparison of 10 mH Inductance Standard Between UME-PTB", CPEM'98 Conference Digest, Washington, July 6-10 1998