

## UME'DE İNDÜKTANS BİRİMİNİN ELDE EDİLMESİ VE ÖLÇÜM ARALIĞININ GENİŞLETİLMESİ

G. Gülmez, Y. Gülmez, M. Saygılı

### ÖZET

UME'de daha önce indüktans izlenebilirliği Almanya'nın metroloji kuruluşu olan PTB'den sağlanmaktaydı. Ölçüm belirsizliğini düşürmek ve indüktans birimini UME'de elde etmek amacıyla Maxwell-Wien köprüsü gerçekleştirilmiştir. Bu köprü ile indüktans birimi kapasitans ve dirence bağlı olarak elde edilmektedir. İlk aşamada köprü 1 kHz frekansında 10 mH indüktans standardını ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

UME'de Kapasitans ölçme belirsizliği 3 ppm ve dc direnç ölçme belirsizliği de 1 ppm'ler seviyesinde olduğundan Maxwell-Wien köprüsü ile 10 mH standardı 1 kHz'de 10 ppm seviyesinde belirsizlikle ölçülebilmektedir.

İndüktans ölçme aralığını 100  $\mu$ H - 10 H'e genişletmek amacıyla 1/10 İndüktans Karşılaştırma Köprüsü kullanılmaktadır. Bu köprüde Maxwell-Wien köprüsünde değeri belirlenen 10 mH standardı referans alınmaktadır. Bu köprünün belirsizliğini düşürme çalışmaları devam etmektedir.

1 kHz dışında 400 Hz, 200 Hz ve 100 Hz'de de Maxwell-Wien köprüsü 10 mH standardı için gerçekleştirilecek ve bu frekanslarda 100  $\mu$ H - 10 H aralığında 1/10 indüktans karşılaştırma köprüsü ile de ölçüm aralığı genişletilecektir.

**Anahtar Kelimeler :** İndüktans, Maxwell-Wien köprüsü, belirsizlik, karşılaştırma.

### MAXWELL-WIEN KÖPRÜSÜ İLE İNDÜKTANS KALİBRASYONU

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 kullanılan köprüde ufak değişimler elde edilebilmelidir. Bu köprülerde karşılaştırma metodları kullanıldığı için ölçüm devresine etki eden artık empedans etkileri azaltılabilir veya yok edilebilir.

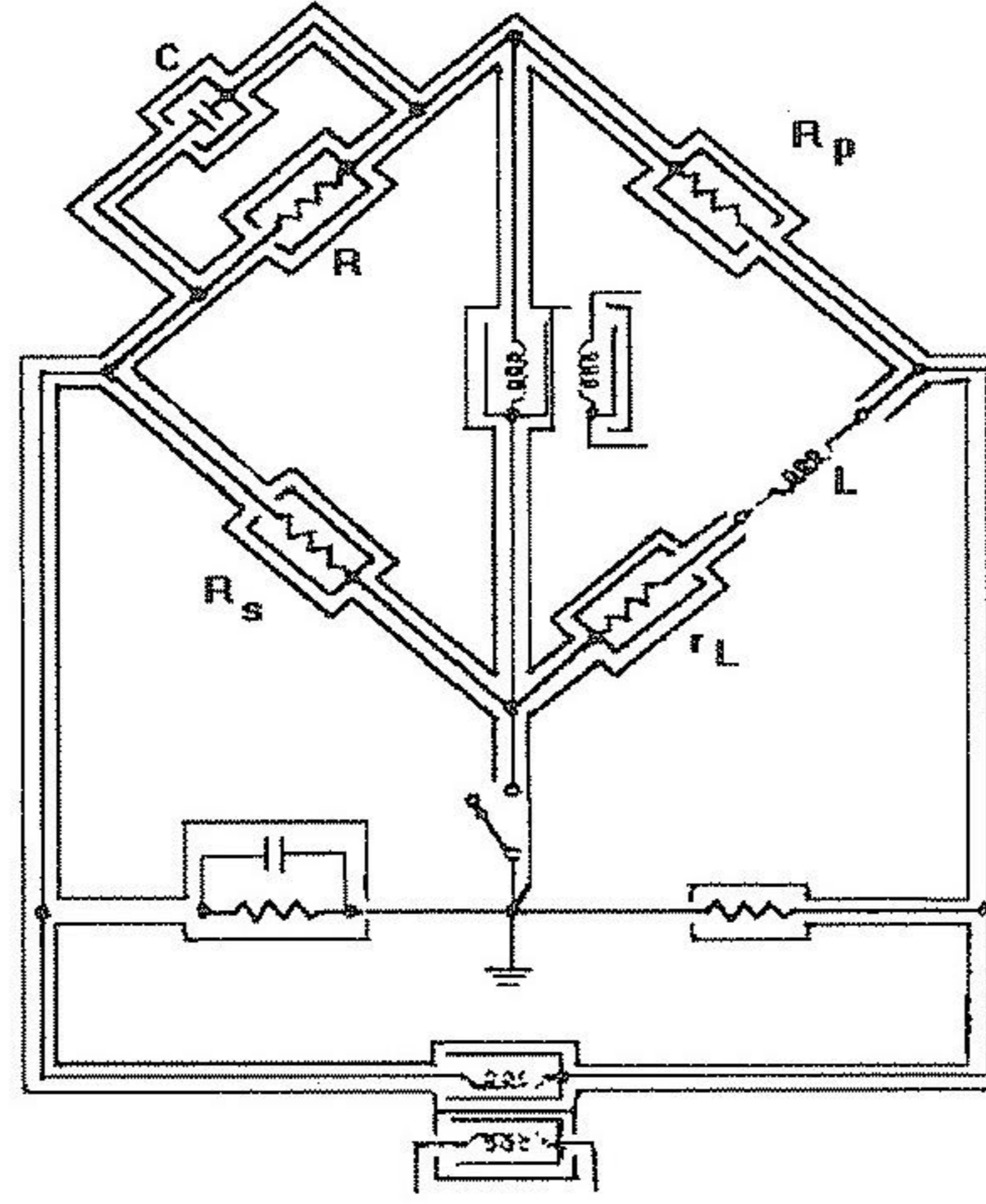
Maxwell-Wien köprüsü J. C. Maxwell tarafından geliştirilmiş ve M. Wien tarafından da ac ölçümlere adapte edilmiştir. Uzun yıllardır da laboratuvarlar tarafından indüktans birimini elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 1'de son derece iyi bir şekilde ekranlanmış Maxwell-Wien köprüsü ve kaçak empedanslar yüzünden toprağa giden akımların yönleri çevrilerek hataları yok etmek amacıyla kullanılan wagner kolları görülmektedir.

Köprünün kollarındaki elemanların saf olduğu farzedilirse, indüktans ve indüktansın direnci şu şekilde ifade edilebilir:

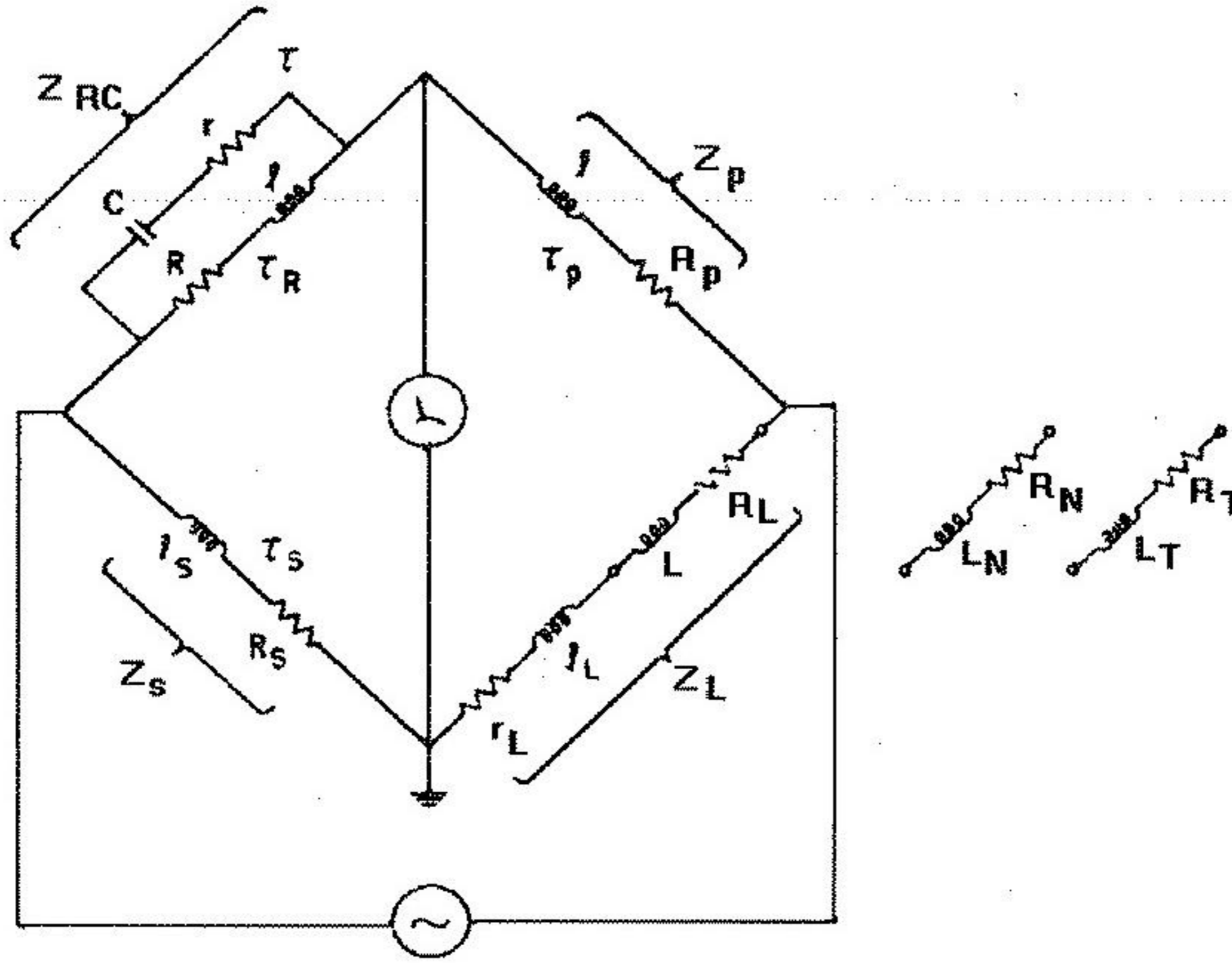
$$L = C \cdot R_p \cdot R_s \quad (1)$$

$$R_s = R_p / r_L \quad (2)$$

Pratikte ise tek bir direncin sadece dirençten oluşması veya kapasitörün tek bir kapasitörden oluşması mümkün değildir. Artık empedans etkileri elemanlar üzerinde sistematik hatalar oluşturur. Bu yüzden hata düzeltmelerini doğru yapabilmek için veya dikkate alınmayacaksa derecesinin bilinmesi için devrenin çok iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Şekil 2'de artık parametreleri ile beraber, fakat Wagner kolları olmaksızın Maxwell-Wien köprüsü gösterilmektedir. Örneğin; indüktansa seri bağlanmış direncin indüktansı  $\lambda_L$ 'dir.  $\lambda_L$  indüktansı kapasitif veya indüktif etkisine göre negatif veya pozitif olabilmektedir. Bununla beraber  $\lambda_L$  frekanstan bağımsız değildir. Diğer parametreler de seri indüktansa sahip olarak gösterilmiştir. Değişken kapasitans standardı kontak dirençlerinden dolayı seri direnç artık parametresine sahiptir. Standart indüktans ise  $R_L$  direncine sahiptir. Köprünün dört kolundaki empedans değerleri artık parametrelerle beraber şöyle ifade edilir:



Şekil 1 Ekran ve Wagner kolu ile birlikte Maxwell-Wien Köprüsü



Şekil 2. Artık parametreleri ile birlikte Maxwell-Wien Köprüsü

$$Z_{RC} = \{ (R_p + j\omega\lambda_p) \cdot (R_s + j\omega\lambda_s) \} / \{ R_L + r_L + j\omega(L + \lambda_L) \} \quad (3)$$

$$Z_p = R_p + j\omega\lambda_p \quad (4)$$

$$Z_L = R_L + r_L + j\omega(L + \lambda_L), \quad (5)$$

$$Z_s = R_s + j\omega\lambda_s \quad (6)$$

$$Z_{RC} Z_L = Z_p Z_s \quad (7)$$

Empedans dengelendikten sonra imajiner kısım şöyle yazılabilir:

$$(1 + \omega^2 r^2 C^2) \{ R(L + \lambda_L) \lambda_R - R_s \lambda_p - R_p \lambda_s \} = C \{ R R_p R_s + \omega (R R_p \lambda_s + R R_s \lambda_p + R_p R_s \lambda_R) \omega r C - \omega^2 (R \lambda_s \lambda_p + R_p \lambda_R \lambda_s + R_s \lambda_R \lambda_p) - (\omega^3 \lambda_R \lambda_p \lambda_s \omega r C) \}. \quad (8)$$

8. eşitlikteki artık parametreler, zaman sabitine ve kayıp faktörüne göre ifade edilirse;

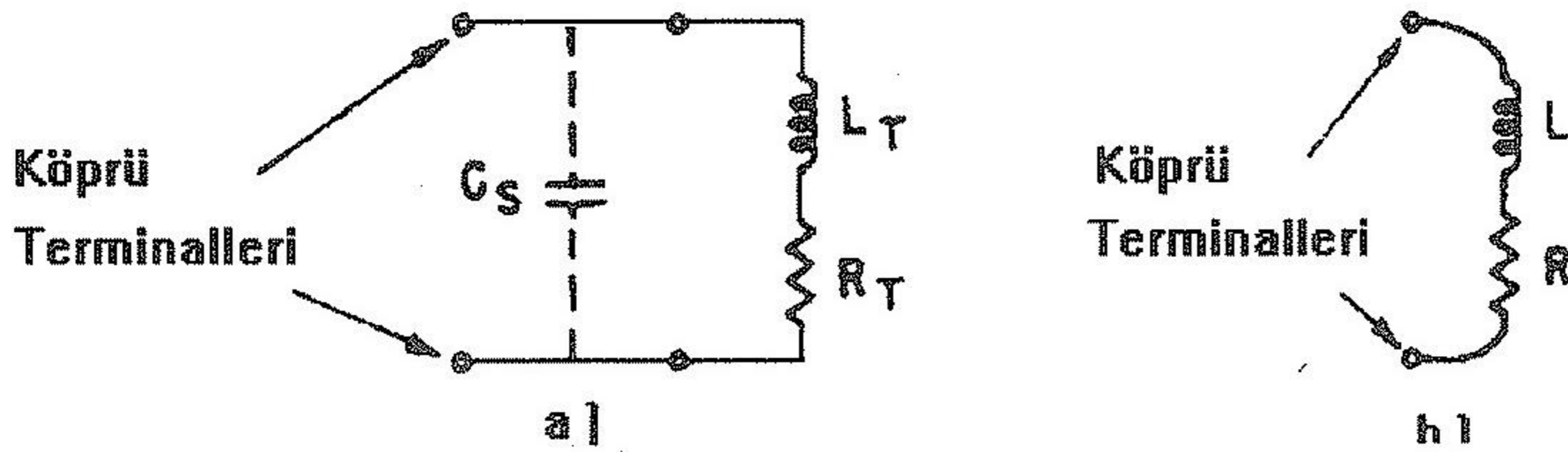
$$\omega r C = D_c \quad (9) \quad \lambda_R / r_R = \tau_R \quad (10) \quad \lambda_p / R_s = \tau_p \quad (11) \quad \lambda_s / R_s = \tau_s \quad (12)$$

ihmal edilebilir hatalarla indüktans değeri şöyle elde edilebilir:

$$L = C R_p R_s \{ 1 - \omega^2 (\tau_p \tau_s + \tau_R \tau_p + \tau_R \tau_s) - D_c^2 + \omega (\tau_p + \tau_s + \tau_R) D_c - \omega^3 \tau_p \tau_s \tau_R D_c \} - (R_L + r_L) \tau_R + R_p R_s / R (\tau_p + \tau_s) - \lambda_L, \quad (13)$$

Elde edilen L ifadesini incelemeden önce indüktansın iki ucu arasındaki artık kapasitansın etkisini incelemek daha yararlı olacaktır. Kapasitansın değeri ne olursa olsun indüktansın bir parçasıdır. Başka bir ifadeyle ölçülecek olan indüktansa iç paralel kapasitans etki etmektedir. Bu

yüzden indüktans değeri frekansa bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3a'da ölçülecek indüktans  $L_T$ , ona seri olan indüktans iç direnci  $R_T$  ve artık kapasitör  $C_s$ 'dir. Şekil 3b'de gösterildiği gibi gerçekte ölçülen indüktans değeri  $L$ 'dir ve  $L_T$ 'nin paralel artık kapasitöründen dolayı şöyle ifade edilebilir:[1]



Şekil 3. Cs Artık Kapasitansın İndüktansa Etkisi

$$L_T \cong L (1 - \omega^2 L_T C_s + R_T^2 C_s / L_T + \omega^2 R_T^2 C_s^2) \quad (14)$$

Bu formüldeki son üç parametre kapasitörün etkisinden dolayı indüktansı etkilemektedir. Birinci ve sonuncu etki frekansın karesi ile orantılıdır. Son ifade ilkinden çok daha küçüktür. İkinci ifade ise frekansa bağlı olmamakla beraber yüksek doğrulukla ölçüm yapılmak istendiğinde gözardı edilmemelidir. Örneğin 10 H ölçümünde iç direnç 10 k $\Omega$ 'dur. İndüktans standardı eğer koaksiyel kablo ile köprüye bağlanırsa kablo kapasitörü 100 pF olur. Bu durumda ikinci ifade 0.1 % oranında ölçüm büyüklüğünü etkiler. Genellikle ilk parametre önemlidir ve seri indüktans şu şekilde ifade edilebilir:

$$L_T \cong L (1 - \omega^2 L_T C_s) \quad (15)$$

İndüktansa bağlı paralel  $C_s$  kapasitörü örneğinde olduğu gibi, artık parametrelerin değerini ölçmek veya değerini bilmek oldukça zor bir iştir. Bu yüzden artık parametrelerin ölçüm üzerindeki etkisini yok etmek için yerine koyma metodları kullanılır. Bu yöntemler eşit ve sıfır yerine koyma metodlarıdır. Eşit yerine koyma metodunda nominal değeri aynı olan bir indüktör standart indüktör ile yer değiştirilir. İndüktansın farkı  $C$ ,  $r_L$  veya  $R$ 'nin çok az değişimiyle elde edilir. Bu durumda direncin artık parametreleri ihmal edilmiş olur ve indüktansın uçlarındaki artık kapasitörün etkisi de azaltılmış olur. Bu yöntemde standart indüktör değeri çok iyi bilinmelidir. Diğer yöntem olan sıfır yerine koyma metodunda ise, artık parametrelerin ölçülmesi için değeri ihmal edilebilir düzeyde kısa devre veya değeri bilinen küçük bir test indüktörü kullanılır.

Yerine koyma metodları ile Maxwell-Wien köprüsünde iki denge oluşur.  $L_T$  test indüktörü ve  $L_N$  standart indüktörü ile beraber küçük düzeltme terimlerini  $K$  ile tanımlarsak her iki denge durumunda da eşitlik sabit kalır. Sadece  $C_s$  çok az değişerek  $C_{SN}$  olur. Bu durumda şu eşitlik elde edilir:

$$L_T = L_N + (C - C_N)R_p R_s \{1 - \omega^2 (L_T + L_N)C_s + K\} - \omega^2 L_T L_N (C_s - C_{SN}) + (R_T^2 - R_N^2)C_s - (\lambda_L - \lambda_{LN}) \quad (16)$$

Bu eşitlik devredeki elemanların belirsizlik etkisini göstermesi açısından yararlıdır. Eğer köprüde kaliteli elemanlar kullanıldıysa ve köprü iyi tasarlanmışsa K formülündeki zaman sabitleri çok küçük mertebede olacaktır.

Sıfır yerine koyma metodu uygulandığında C'nin çok iyi ölçülmesi önemli değildir. Fakat  $R_p R_s$  çarpımının çok iyi bir doğrulukla bilinmesi gerekir. Bununla beraber küçük indüktans geometrisi ve ölçülerine bağlı olarak hesaplanabilir veya ölçülebilir. İndüktansın iki ucunu kısa devre ederek de köprünün artık indüktans değeri ölçülebilir. Bu durumda küçük indüktans  $L_N$  sıfır referans indüktansı olarak kullanılır.  $(\lambda_L - \lambda_{LN})$  terimi çok küçük mertebelere indirilebilir. Burada  $\lambda_L$  ( direncin indüktansı )'değerinin direnci değiştiği halde değişmediği farzedilmektedir.  $r_L$ 'deki bu belirsizlik küçük değerli indüktörlerin ölçüm doğruluğunu belirler. çünkü  $r_L$  değiştikçe artık indüktans değişmektedir.  $C_s$  eğer çok küçük değilse  $C_s$ 'nin meydana getirdiği belirsizlik ölçüm doğruluğunu etkiler. Bu nedenle  $C_s$ 'den dolayı oluşan artık empedans etkisi sıfır yerine koyma metodunda ölçüm doğruluğunu belirlemiş olur.  $\omega^2 L$ 'nin büyük olduğu durumlarda daha iyi bir ölçüm doğruluğu için sıfır yerine koyma metodu yerine eşit yerine koyma metodu kullanılmalıdır veya indüktansın uçlarındaki ekranı köprüden ayırarak Wagner kollarını kullanmak gerekir. Bu durumda köprü topraklanmamış olmalıdır.

Eşit yerine koyma metodu eğer değeri çok iyi bilinen  $L_N$  standart indüktör varsa onun yerine  $L_T$  test indüktörü köprüye bağlanabilir. Bu durumda C kapasitansı ile  $R_p R_s$  çarpımı değerinin çok doğru kalibre edilmesine gerek yoktur. İki denge durumunda sadece C ve  $r_L$  az miktarda değişir.  $D_c$  ve  $\lambda_L$  artık parametreleri ve diğer artık parametreler iki durumda da değişmeden kalırlar. Eşit yerine koyma metodu eşitlik şöyle yazılabilir.

$$L_T = L_N + (C - C_N) R_p R_s (1 - 2\omega^2 L_T C_s + K) - \omega^2 L_T^2 (C_s - C_{SN}) + (R_T^2 - R_N^2) C_s - (\lambda_L - \lambda_{LN}) \quad (17)$$

Bu formülde  $C_s$  ve  $C_{SN}$  birbirine eşit kabul edilmemiştir fakat pratikte değerler birbirine çok yakındır.  $\lambda_L - \lambda_{LN}$  ifadesi,  $r_L$  ayarlanabilir seçildiğinde minimuma indirilebilir. Standart indüktördeki  $r_L$  ile test indüktöründeki  $r_L$  farkı büyükse  $\lambda_L - \lambda_{LN}$  ifadesi doğruluğu sınırlar.

$(R_T^2 - R_N^2) C_s$  ifadesine özellikle dikkat edilmelidir. Çünkü bu ifade indüktansın seri direncinin etkisini göstermektedir. Deri etkisi ihmal edildiğinde bu ifadenin frekanstan bağımsız olduğu söylenebilir. Bilindiği gibi deri etkisiyle yüksek frekanslarda akım direncin yüzeyinden akar. Düşük frekanslarda diğer düzeltme ifadeleri ihmal edilse bile  $(R_T^2 - R_N^2) C_s$  ifadesi ihmal edilmemelidir.

$\tau_p, \tau_s, \tau_R$  zaman sabitleri  $1\mu s$ 'den küçük olduğunda ve  $D_c=0.001$  veya daha düşük olduğunda  $\omega = 10000$  rad/s iken  $K=0.0003$ 'den daha küçük olur. 1% 'lik indüktansların nominal farkı için K hatası ihmal edildiğinde 3 ppm'ler seviyesinde bir hata yapılmış olur.  $C_s$  artık kapasitörü mümkün olduğu kadar küçültülür veya değeri sabitleştirilirse eşit yerine koyma metodundaki düzeltmelerin sebebi sadece indüktörlerin iç dirençleri olacaktır.

Köprünün hassasiyeti matematiksel bulunarak sistemin uygun şekilde tasarlanması gereklidir. Bunun için dengede iken indüktansın değeri  $\Delta L$  kadar değiştiğinde dedektör geriliminin değiştiğinin incelenmesi gerekir [2]:

$$U_d = (dU_d / dL) \Delta L = S_L \Delta L = S_L' \delta_L \quad (18)$$

Bu formülde  $S_L$  ve  $S_L'$  köprünün  $L$  değiştiği zamanki hassasiyetidir.  $\delta_L = \Delta L / L$  ise  $L$ 'nin bağıl değişimidir. Burada  $U$  köprü gerilimi,  $\omega$  açısal frekansıdır.  $S_L$  ve  $S_L'$  hassasiyetleri şu koşullarda maksimuma ulaşır. Aynı şekilde  $r_L$ 'nin hassasiyeti de hesaplanabilir:

$$S_L/U = \omega R_s / \{(R_s + r_L)^2 + \omega^2 L^2\} \quad (19) \quad S_L'/U = \omega L R_s / \{(R_s + r_L)^2 + \omega^2 L^2\} \quad (20)$$

$$R_s = \{(r_L)^2 + \omega^2 L^2\}^{1/2} = L(1 + 1/Q^2)^{1/2} \quad (21) \quad S_{RL}/U = R_s / \{(R_s + r_L)^2 + \omega^2 L^2\} \quad (22)$$

$$S_{rL}'/U = R_s r_L / \{(R_s + r_L)^2 + \omega^2 L^2\} \quad (23) \quad S_L / S_{rL} = \omega \quad (24) \quad S_L' / S_{rL}' = \omega L / r_L = Q \quad (24)$$

Köprünün hassasiyeti özellikle düşük frekanslarda, düşük indüktans ölçümlerinde kontrol edilmelidir.

Maxwell - Wien köprüsünde oluşabilecek gürültünün de incelenmesi gerekir. Maxwell-Wien köprüsünde denge durumundayken dedektörün çıkış empedansı [3]:

$$Y_{out} = (1/R_s) \{(R_s + r_L)(R_p + R) + \omega^2 L^2 + j\omega L(R_p - R)\} / \{(R_p + r_L)^2 + \omega^2 L^2\} \quad (25)$$

$$R_s = R_p \quad \square \quad Y_{out} = 1 / R_s \quad (26) \quad u_n = (4kTBR_s)^{1/2} \quad (27)$$

Burada  $k = 1.38 * 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  ( Boltzmann's sabiti ),  $T$ : mutlak sıcaklık,  $B$ ; bant genişliğidir. Köprünün hassasiyetini yükseltmek ve gürültü seviyesini düşük tutmak için köprüdeki direnç değerleri uygun seçilmelidir. Ya da hassasiyeti yüksek bir dedektör kullanılmalıdır.

## UME'DE MAXWELL-WIEN KÖPRÜSÜYLE İNDÜKTÖR KALİBRASYONU

Maxwell-Wien köprüsünün başarılı sonuç verebilmesi için öncelikle dirençlerin koyulacağı kutu çok iyi bir şekilde tasarlanmıştır. Bu kutu olabildiğince küçük yapılmış ve dirençler ayrı bölmelere koyularak aralarında karşılıklı indüktansların oluşması engellenmiştir. Konnektör seçiminde; artık empedans ve direnç etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olması özelliği dikkate alınmıştır. UME'de tasarlanan Maxwell-Wien köprüsü için yapılan kutu Şekil 4'de görülmektedir. Maxwell-Wien köprüsünde 0.01 ppm duyarlılığa sahip standart değişken  $C$  kapasitörü ve 0.6 ppm/°C sıcaklık katsayısına sahip  $R_1$ ,  $R_2$  dirençleri kullanılmıştır. Dirençlerin en büyük avantajı ise zaman sabitinin çok küçük olması yani artık parametrelerinin ihmal edilebilir düzeyde olmasıdır. Bu dirençlerin indüktif değeri katalog bilgilerine göre 80 nH'den daha düşüktür. Kutu içindeki bağlantılar olabildiğince kısa kablolarla yapılmıştır. İndüktans standardına bağlanacak kablodan gelecek artık empedans ve direnç etkisini azaltmak için "twinax" kablo ile dört uçlu bağlantı yapılmıştır. Köprünün topraklaması için bakır bir plaka kullanılmış; bütün toprak noktaları burada birleştirildikten sonra bu bakır plaka da genel toprağa götürülmüştür. Sinyal kaynağı ve dedektörden gelecek toprak kapasitans etkileri izolasyon trafoları kullanılarak giderilmiştir.

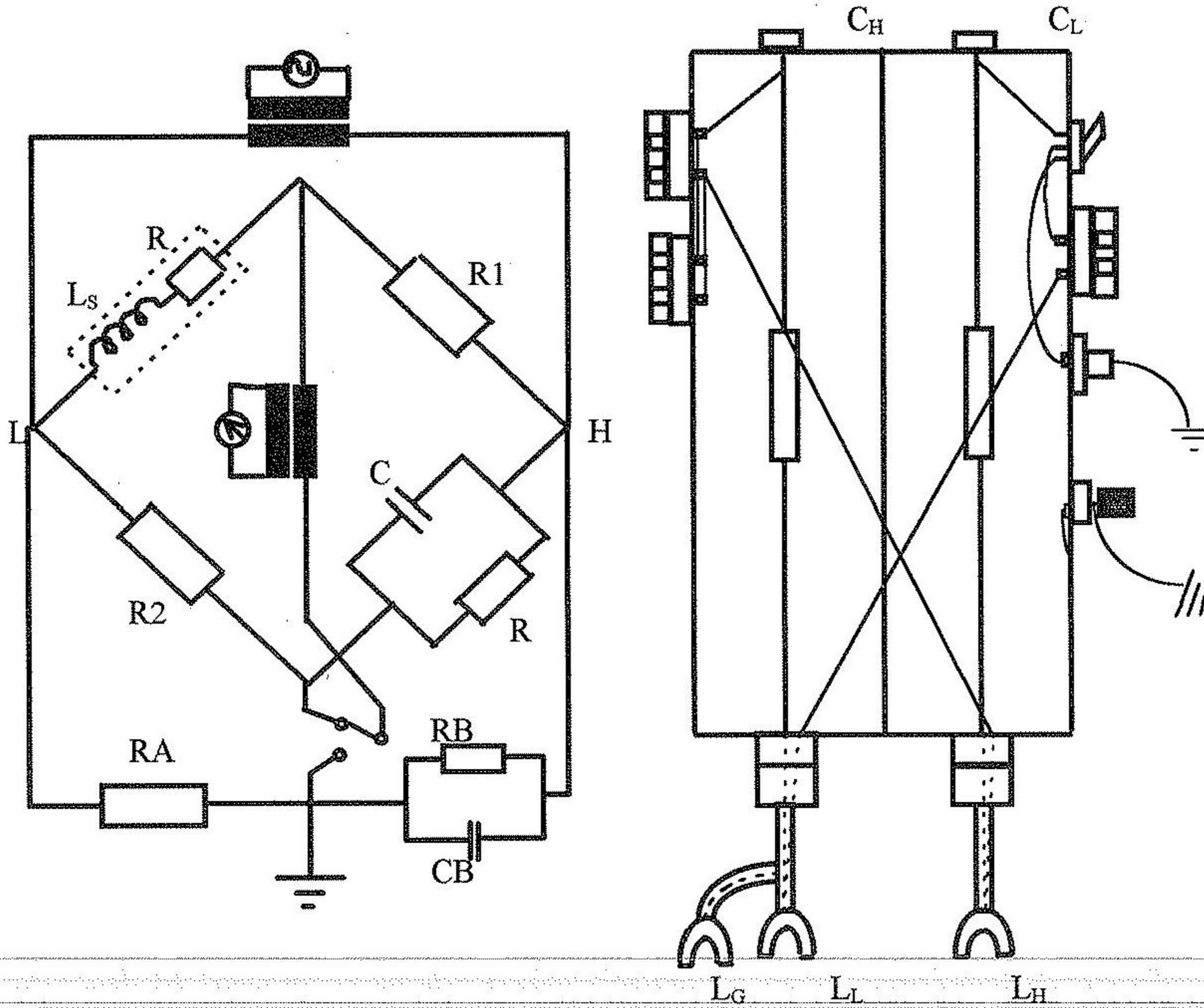
Yapılan ölçümlerin doğruluğundan emin olabilmek için köprünün artık parametrelerinin etkisinin ölçümden çıkarılması gerekmektedir. Bu amaçla sıfır yerine koyma metodu kullanılmıştır. Bu metodda istenen indüktans standardı ölçüldükten sonra, değeri bilinen ve standart indüktörün dc direncine eşit olan küçük bir indüktörle 2. ölçüm alınır. Dengeleme işleminde sadece kapasitör değiştirilmelidir. Bu iki ölçüm sonucu birbirinden çıkarılarak köprünün artık parametreleri olan  $L_K$  yok edilmiş olur.

$$L = R_1 \cdot R_2 \cdot C + L_K \quad \text{I. Ölçüm (28)}$$

$$L_s = R_1 \cdot R_2 \cdot C' + L_K \quad \text{2. Ölçüm (29)}$$

$$L - L_s = R_1 \cdot R_2 \cdot (C - C') \quad (30)$$

Maxwell-Wien köprüsüyle 10 mH nominal değerinde alınan ölçüm sonuçlarının standart sapmaları 13 ppm - 16 ppm arasında değişmektedir. Bu sallaşma standartların sıcaklıkla olan değişiminden ve Maxwell-Wien köprüsünün kararlılık seviyesinden kaynaklanmaktadır.



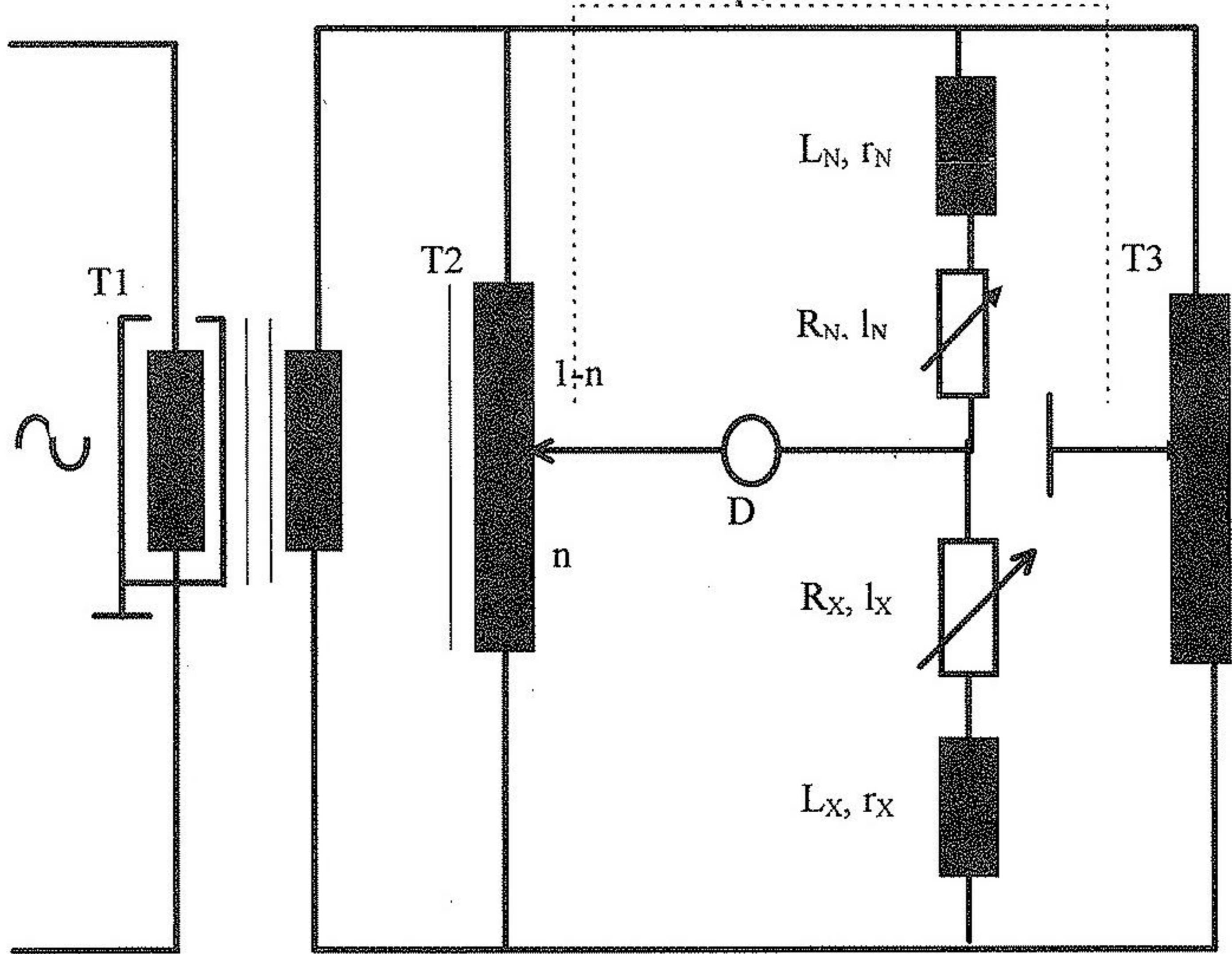
Şekil 4 .a- UME'de gerçekleştirilen Maxwell-Wien köprüsünün devresi

b - Maxwell-Wien köprüsü için yapılan bakır kutu

UME'de 1 mH ve 100 mH nominal değerleri için Maxwell-Wien köprüleri yapılmış ve 10 mH nominal değeri ile 100, 200, 400 ve 1000 Hz frekanslarında ölçümler alınmaktadır. Bahsedilen dört ayrı frekans ve üç ayrı nominal değer için 10-15 ppm mertebelerinde belirsizlikler hedeflenmektedir.

## 1/10 İNDÜKTANS ORAN KÖPRÜSÜ İLE İNDÜKTANS KALİBRASYONU

1/10 indüktans oran sistemi kullanılarak  $100 \mu\text{H} - 10 \text{ H}$  arasındaki standart indüktansların 100, 200, 400 ve 1000 Hz frekanslarında ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu köprünün şeması Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekilde toroid biçiminde  $T_1$  trafosu sinyal kaynağı ile köprü arasına izolasyon amacıyla yerleştirilmiştir. İzolasyon trafosu çift çekirdekli sarım tekniğine göre sarılmıştır. Çift katlı sarım tekniği kullanılarak sinyal kaynağının iç direncinin  $T_2$  indüktif gerilim bölücünün giriş direncine oranının sonuca etkisi  $10^{-6}$  mertebesinde oluşması sağlanmıştır. Böylelikle sinyal kaynağının iç direncinin sarım oranına etkisi azaltılmış olmaktadır. İki çekirdekli yapıda çekirdekler üst üste konulması ile sarım kapasitansının etkisi de küçültülmüş olmaktadır. Primer ve sekonder arasında elektro-statik ekranlama yapılmıştır. Köprüde sinyal kaynağı ile  $T_1$  arasında indüktif kapling oluşmaması için şok bobini kullanılmıştır. Sekonder ise, elektro-manyetik açıdan ekranlanmıştır.  $T_2$  ise 7 dekadlık bir indüktif gerilim bölücüdür (İGB). İndüktansları karşılaştırmak için bu bölücü kullanılmaktadır.  $T_3$ , 7 dekadlık bir İGB'dir ve Wagner toprak dengelemesi için kullanılmaktadır. İGB'lerde de çift çekirdekli sarım tekniği prensibine göre yapıldığı için indüklenmiş akımın değeri küçük olmaktadır. Akımın değerinin küçük olması ile dekadın herbir sargısındaki sarım dirençleri ve artık indüktansların simetriği bozucu etkisi azaltılmış olur.



Şekil 5: 1/10 Oran Köprüsü.



Bu köprü ile bilinen bir indüktans standardı vasıtasıyla bilinmeyen bir standart özindüktörün veya karşılıklı indüktörün değeri dekad indüktif bölücüler yardımıyla ölçülebilir. Köprü dengeye gelmesi için hem indüktif hem de resistif komponentlerin eşitlenmesi gerekmektedir. Ölçülecek indüktans standartları farklı dirençlere sahiptir. Köprüde 1 ppm'lik hassasiyet elde edebilmek için gerekli direnç duyarlılığı 100  $\mu$ H için 6.5  $\mu$ ohm, 1 mH için 65  $\mu$ ohm, 10 mH için 650  $\mu$ ohm, 100 mH için 6.5 mohm, 1 H için 65 mohm ve 10 H için 650 mohm'dur. Köprünün denge denklemi 31. eşitlikte verilmiştir. 1 mH'den büyük indüktansların değerini bulmak için 32. eşitlik kullanılabilir.

$$n/(1-n) = Z_N/Z_X \quad (31)$$

$$L_N/L_X = \{n/(1-n)\} \cdot (1 + \lambda_x/L_X) - \lambda_N/L_X \quad (32)$$

1 mH'den düşük indüktansların ölçümünde köprüde oluşan  $\lambda_x$  artık indüktans hatası daha yüksek olduğundan farklı bir ölçme yöntemi kullanılır. Bu hatayı kompanze etmek amacıyla önce  $L_N$  ile aynı nominal değerde diğer bir  $L_H$  indüktansı  $L_X$ 'e seri bağlanır. 33 nolu denklem elde edilir. Daha sonra  $L_X$  çıkartılarak yalnızca  $L_H$  ile  $L_N$  karşılaştırılıp 34. denklem elde edilir. Bu iki denklik kullanılarak  $L_X$ ,  $L_N$  ve  $\lambda_N$ 'ye bağlı olarak 35 nolu eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$L_N/(L_X + L_H) = \{n_x/(1-n_x)\} \cdot \{1 + \lambda_x/(L_X + L_H) - \lambda_N/(L_X + L_H)\} \quad (33)$$

$$L_N/L_H = \{n_o/(1-n_o)\} \cdot (1 + \lambda_x/L_H) - \lambda_N/L_H \quad (34)$$

$$L_X = (L_N + \lambda_N) \cdot \{(1 - n_x)/n_x - (1 - n_o)/n_o\} \quad (35)$$

Köprü için gerekli direnç standartları yapıldıktan sistemin 100 mH'e kadar 2 ppm duyarlılığa, 100 mH ve daha büyük indüktanslar için ise 0.2 ppm duyarlılığa sahip olduğu görülmüştür. 1 mH, 10 mH ve 100 mH indüktans standartlarının sıcaklık katsayısı çıkartılarak ölçüm belirsizliği küçültülmüştür.

## İLERİYE DÖNÜK HEDEFLER

Kısa dönem, aylık ve yıllık belirsizliklerin bulunması için bahsedilen frekanslarda Maxwell-Wien Köprüsü ve 1/10 İndüktans Oran Köprüsü ile yapılan ölçümler devam ettiril mektedir. Bu çalışmaların sonucunda indüktans biriminin oluşturulması ve türetilmesinde belirsizliğin 10 - 30 ppm kalacağı tahmin edilmekte ve çalışmalar bu hedefi gerçekleştirmek için devam etmektedir.

## REFERANSLAR

- [1] R. Hanke, K. Dröge, "Calculated Frequency Characteristic of GR1482 Inductance Standards Between 100 Hz and 100 kHz," IEEE Trans. Inst. Mes., vol. 40, no 6, Dec 1991
- [2] J. Bohacek, "Application of Maxwell-Wien Bridge Circuit to the measurement of Four Terminal-Pair Inductances," PTB-Mitteilungen, vol. 103, no 3, 1993
- [3] R.D. Cutkosky, "Techniques for Comparing Four-Terminal-Pair Admittance Standards," Journal Res. NBS, vol. 74, no C, 1970