

Geliştirilmiş Tekil π Modeli Kullanan Bir Spiral İndüktör Değişkenlik Analizi Algoritması

A Variability Analysis Algorithm for Spiral Inductors Using Enhanced Single- π Model

İhsan Baturay Soysal, Emre Akso, Mustafa Berke Yelten

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

soysali@itu.edu.tr, akso@itu.edu.tr, yeltenm@itu.edu.tr

Özet

Bu bildiri yonga üstü spiral indüktörlerin vekil modellemeleri ile fiziksel karakteristikleri açıklanmaktadır. Yüksek frekanslarda ortaya çıkan kabuk etkisi gibi parazitik etkiler hesaba katılarak geliştirilmiş tekil π modeli uygulanmıştır. Y parametreleri kullanılarak yapılan devre temsiliyle hem şönt hem de diferansiyel konfigürasyonların frekansa bağlı empedans ve kalite faktörü grafikleri elde edilmiştir. Önceden belirlenmiş indüktans – frekans eğrilerinden fiziksel parametrelerin elde edilmesi amacıyla özgün bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma model parametrelerinin farklı birleşim vektörlerini oluşturup hedeflenen indüktans – frekans eğrilerine $\pm 5\%$ 'lik maksimum hata payı dâhilinde kalarak iterasyon yoluyla yakınsamayı temel almaktadır. Bu yöntemin aynı zamanda üretim değişkenliklerinden kaynaklanan farklı kalite faktörü değerlerinin hangi fiziksel parametrelere dayandığını anlamak amacıyla kullanılacağı gösterilmiştir.

Abstract

In this paper, surrogate modelling of on-chip spiral inductors along with their inherent physical characteristics is presented. Taking the skin effect into consideration, enhanced single π model is employed to account for parasitic effects manifesting themselves at higher frequencies. Based on the circuit representation using Y-parameters, both shunt and differential models are explained by means of frequency-dependent impedance and quality factor graphics. In order to extract physical parameters from a predetermined inductance-frequency curve, we offered a novel algorithm which produces distinct combinations of model parameters that evolve through iterations until the result converges to the predetermined data within a 5% error margin. This methodology is a variability analysis approach that can explain which model parameters yield low Q factors due to process variations during integrated inductor manufacturing.

1. Giriş

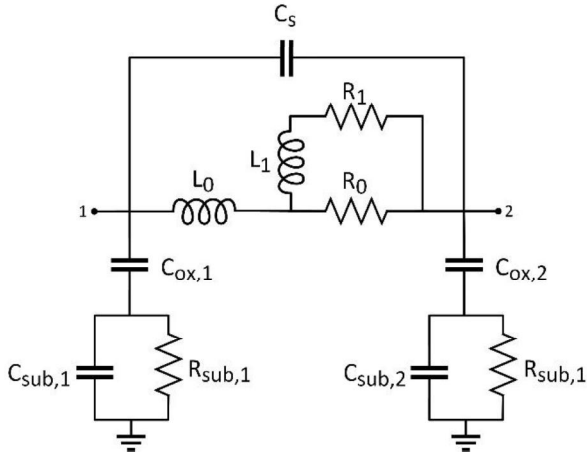
Son yıllarda yonga üstü tümleşik spiral indüktörlerin özellikle analog ve RF devrelerde sıkça kullanılmakta olduğu ve devre tasarımcıları ile bilgisayar destekli modelleme uzmanlarının ilgisini çektiği görülmektedir [1 –5]. Bu durum, giderek tümleşik devrelere yönelen elektronik sektörde ayrıık indüktörlerin kullanılmasının pratik olarak imkânsız olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca spiral indüktörlerin hem kolay tümleştirme imkânı sağlaması hem de düşük maliyetli olması da bu konuda büyük rol oynamıştır. Bu tip indüktörlerin karakteristik özelliklerinin yüksek başarımla elde edilmesi için elektromanyetik benzetim yöntemleri kullanılmalıdır. Ancak, elektromanyetik benzetim yazılımlarından veri elde edilmesi çok uzun zaman almaktadır ve bu tür benzetimler tasarım sürecinde birden fazla kez tekrarlanmak durumundadır [6]. Bu durum tasarım sürecini kaçınılmaz bir şekilde yavaşlattığından elektromanyetik benzetim yöntemleri yerine tasarımcılar vekil modelleri tercih etmektedir. Vekil modellerle ilgili en önemli sorun ise indüktörlerin karmaşık geometrilerine ve indüktör genelinde parazit sığa ve dirençlerin bulunmasından dolayı bir analitik modelin üretilmesi tam anlamıyla başılamamıştır. Örneğin, indüktör modellemesinde en sık kullanılan vekil modellerden olan tekil π modeli temel bazı karakteristikleri yansıtabilirken yüksek frekanslarda ortaya çıkan kimi parazitik etkileri açıklayamamaktadır [7]. Daha kesin açıklamalar getirmek amacıyla oluşturulan çift π modeli gibi modellerin çoğu ise tasarımcının karar vermesini zorlaştıracak derecede karmaşıktır. Bu gerçeklerden yola çıkarak basitlik ve kesin sonuç verme özelliklerini bir arada bulunduran bir vekil model oluşturulması gerekliliği vardır. Ayrıca üretim sırasında ortaya çıkabilecek değişkenliklerin tasarım üzerindeki etkisini de kestirebilmek ve vekil model üzerindeki elemanların değerlerini yüksek başarımla hesaplayabilmek amacıyla kullanılacak bir algoritma da tasarlama sürecini kolaylaştıracaktır.

Bildiri beş ana bölümden oluşmaktadır. Bildirinin ikinci bölümünde kullanılan model tanıtılmış üçüncü bölümünde ise indüktörlerin değişkenlik analizinde kullanılacak yeni bir

algoritma önerilmiştir. Model ve algoritmanın beraber kullanılması sonucu elde edilen veriler dördüncü bölümde analiz edilmiştir. Son bölümde ise çalışmanın neticeleri özetlenmiştir.

2. Model

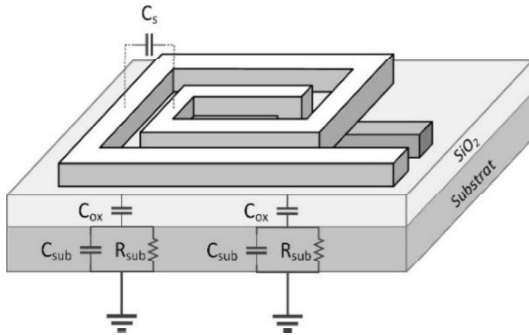
Spiral indüktörlerin fiziksel karakteristikleri yüksek frekanslarda kalite faktörünü kötü yönde etkileyecek şekilde sapmalar göstermektedir. Bu sapmaları modellemek için bu çalışmada, geliştirilmiş tekil π modelinin kullanılması amaçlanmıştır. Şekil 1'de gösterilen geliştirilmiş tekil π modelinde basit tekil π modelinde açıklanmayan kabuk etkisi (skin effect) de dâhil edilmiştir.



Şekil 1: Geliştirilmiş tekil π modeli.

2.1. Tekil π Modeli Parametrelerinin Fiziksel İfadesi

Tekil π modeli, direnç, indüktör ve sığaçlardan oluşan edilgen (pasif) devre elemanlarıyla yonga üstü spiral indüktörlerin temel bazı fiziksel özelliklerini açıklayabilmektedir. Şekil 2'de de görüldüğü üzere, paralel iletkenler arasında bulunan yalıtkan madde nedeniyle oluşan parazitik sığa etkisi model üzerinde C_s (feed-through capacitor) elemanı ile gösterilmiştir. Modeldeki C_{ox} elemanı ise indüktörü oluşturan iletken ve yarıiletken substratın aralarındaki SiO_2 katmanı dolayısıyla oluşan kapasitif etkiyi temsil etmektedir. R_{sub} ve C_{sub} elemanları sırasıyla yarıiletken substratın kendi içindeki direnç ve sığa etkisini ifadelendirmektedir. R_0 telin öz direncinden kaynaklanan direnci temsil ederken L_0 spiral iletkenin indüktans değerine karşılık gelmektedir.



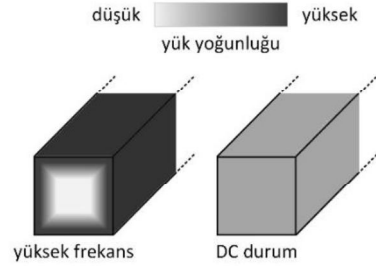
Şekil 2: Model parametrelerinin fiziksel karşılıkları.

2.2. Kabuk Etkisinin Modele Dâhil Edilmesi

Spiral indüktör üzerinde AC akım akması durumunda indüktörü oluşturan teller, etraflarında büyüklüğü zamana bağlı olarak değişen bir manyetik alan oluştururlar. Bu manyetik alan da Faraday indüksiyon yasasına uygun olarak iletkenin kendi içinde girdap akımı adı verilen akım döngüleri doğurur. Bu girdap akımları iletkenin orta bölümündeki akımı engelleyerek yük hareketinin iletkenin dışında toplanmasına sebebiyet vermektedir. DC koşullarda ve yüksek frekanslardaki akım yoğunluğu Şekil 3'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere düşük frekanslar ve DC koşulunda iletken içine eşit olarak dağılan yükler frekans arttıkça iletken yüzeyine doğru itilmekte ve kabuk kalınlığı frekansın kareköküyle doğru orantılı olarak azalmaktadır [8]. Kabuk derinliğinin bulunmasında kullanılan (1) denklemi bu durumu matematiksel olarak ifadelendirir [9]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

Kabuk etkisi iletkenin aktif iletme bölgesini küçültürken iletkenin direnç değerinin artmasına ve kalite faktörünün düşmesine neden olmaktadır. Geliştirilmiş tekil π modelinde bu kabuk etkisi tekil π modelindeki R_0 direncine paralel durumda olan L_1 indüktörü ve R_1 direnci ile modellenmiştir. Böylece yüksek frekanslarda L_1 indüktörü açık devre davranışına yakınsayarak R_0 direncinin etkisinin ön plana çıkmasını sağlayıp kabuk etkisinin temsil edilmesine olanak tanımaktadır. R_1 ve L_1 elemanlarının oluşturduğu merdiven devre olarak da adlandırılan yapı, R_2-L_2 , R_3-L_3 , ..., R_n-L_n çiftlerinin sayısı artırılarak kabuk etkisini daha yüksek doğrulukla modelleyebilir.



Şekil 3: Yüksek frekanslarda ortaya çıkan kabuk etkisi.

2.3. Modelin Y-parametrelerinin Hesaplanması

Tümleşik devre tasarımında spiral indüktörler temel olarak iki farklı konfigürasyonda kullanılabilir. Bunlardan şönt konfigürasyonda indüktörün ikinci terminali GND düğümüne bağlanıp devrenin $C_{ox,2}$, $C_{sub,2}$ ve $R_{sub,2}$ elemanlarını içeren kısmı kısa devre olmakta ve admitans hesabı buna göre yapılmaktadır. Diferansiyel konfigürasyonda ise iki terminal arasındaki eşdeğer admitans hesaplanmaktadır [10].

Şekil 4'te de görüldüğü üzere şönt konfigürasyonda eşdeğer admitans Y_{11} değerine indirgenebilirken, diferansiyel konfigürasyon için bu değer $(Y_{11} - Y_{12})/2$ olmaktadır [3].

Buradaki Y parametrelerine 1 ve 2 numaralı kapılardaki akım ve gerilim değerleri kullanılarak elde edilen

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

matrisinden ulaşılabilir. Buradan yola çıkılarak şönt konfigürasyonu için indüktans,

$$L = \frac{\text{Im}\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)}{\omega} \quad (3)$$

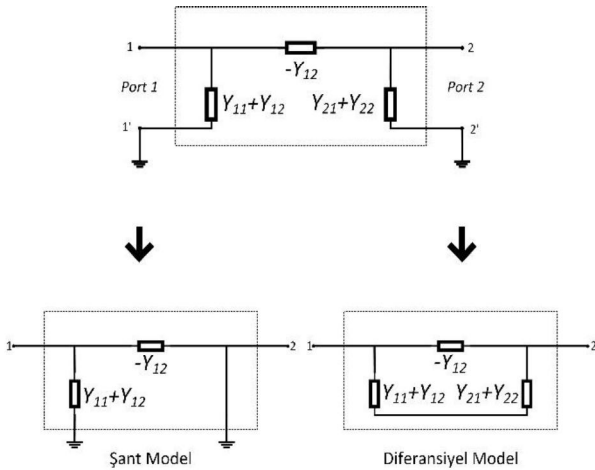
ve kalite faktörü,

$$Q = \frac{\text{Im}\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)}{\text{Re}\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Bu eşitliklerdeki $1/Y_{11}$ değerinin,

$$\frac{1}{j\omega C_s} // \left(j\omega L_0 + \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{j\omega L_1 + R_1}} \right) // \left(\frac{1}{j\omega C_{ox}} + \frac{1}{j\omega C_{sub} + \frac{1}{R_{sub}}} \right) \quad (4)$$

ifadesine eşit olduğu görülmektedir. (2), (3) ve (4) ifadeleri kullanılarak indüktans ve kalite faktörü, açısıl frekansın bir fonksiyonu şeklinde yazılabilir.



Şekil 4: Şönt ve diferansiyel konfigürasyonlar.

3. Algoritma

Spiral indüktörlerin tasarım sürecinde karşılaşılan zorluklardan biri tasarım sürecinde birçok kez indüktans ve kalite faktörü hesaplaması yapılması gerekliliğidir. Bu amaçla kullanılan vekil modellerin içerisindeki devre elemanlarının değerleri teorik olarak hesaplanır ve bunlarla indüktans ve kalite faktörü bulunursa elde edilen sonuçların ölçüm sonuçlarıyla tam olarak bağdaşmadığı görülür. Bunun sebebi giriş bölümünde de açıklandığı gibi tüm parazitik etkilerin vekil modellerde kapsanmasının mümkün olmamasıdır. Ayrıca, üretim sürecinde çeşitli nedenlerden dolayı ortaya çıkan değişkenlikler de indüktör parametrelerini önemli bir miktarda etkilemektedir.

Tasarlanan indüktörler için üretim değışkenlikleri sonucunda başarının ne ölçüde farklılaşacağını hızlı ve verimli bir şekilde kestirebilmek amacıyla bu bildiriye analog devrelerde parametrik hata testlerinin ölçülmesinde kullanılmış bir yaklaşımdan esinlenerek yeni bir algoritma önerilmiştir [11]. Algoritma önceden belirlenmiş olan bir indüktans – frekans eğrisine üretim değışkenliklerini hesaba katarak hızlı bir şekilde (< 3 dakika) yakınsamayı hedeflemektedir.

Sunulan algoritmanın oluşturulmasının bir başka amacı ise değışkenlik analizi amacıyla da kullanılabilmesidir. Böylelikle üretim değışkenliklerinin beraberinde getirdiği farklı kalite faktörlerine sahip indüktörler için de parametre değerleri hesaplanabilmektedir. Ayrıca indüktör parametrelerinin alabileceği köşe değerleri belirlenerek indüktörün bulunduğu devrenin davranışına ne ölçüde etki edeceği görülebilmektedir. Böylece özellikle RF devre tasarımcıları, tasarlanacak devre açısından bir indüktörün indüktans değerlerinin güvenilir sınırlar içerisinde kalıp kalamayacağını saptayabilir.

Bu çalışmada sunulan algoritma MATLAB ortamında uygulanmıştır. Algoritmanın mantıksal akışı aşağıda verilmiştir.

1. Geliştirilmiş π modeli parametrelerinin ($L_0, R_0, L_1, R_1, C_s, C_{ox}, C_{sub}, R_{sub}$) başlangıç değerlerinin belirlenmesi.
2. Hesaplanan parametrelerin vektör formuna çevrilmesi:
 $x_{ind} = [L_0, R_0, L_1, R_1, C_s, C_{ox}, C_{sub}, R_{sub}]$
3. Her bir parametre için, ilk değerlerinin $\pm 20\%$ 'si içerisinde kalacak şekilde M adet rastgele dağılım vektörü belirlenmesi. Bu değerler üretim değışkenlikleri sonucu oluşabilecek parametre savrulmalarına tekbül etmektedir.

$$x_1 = [L_{0,1}, R_{0,1}, L_{1,1}, R_{1,1}, C_{s,1}, C_{ox,1}, C_{sub,1}, R_{sub,1}]$$

$$x_2 = [L_{0,2}, R_{0,2}, L_{1,2}, R_{1,2}, C_{s,2}, C_{ox,2}, C_{sub,2}, R_{sub,2}]$$

⋮

$$x_M = [L_{0,M}, R_{0,M}, L_{1,M}, R_{1,M}, C_{s,M}, C_{ox,M}, C_{sub,M}, R_{sub,M}]$$

Oluşturulan değerler her iterasyonda başlangıç değerinden uzaklaşabileceği için ilk değerlerin $\pm 15\%$ 'i içinde kalmaması durumunda aykırı yönlü olarak yeni değerler seçilir.

4. (2), (3) ve (4) bağıntıları kullanılarak M farklı indüktans ve kalite faktörü değerlerinin belirlenmesi.
5. Her bir geliştirilmiş π modeli vektörü için baştan belirlenmiş indüktans – frekans eğrisi ile 4. adımda bulunan analitik çözüm arasındaki farkın grafiksel hesaplanması.
6. Eğer tüm değerler için indüktans ve kalite faktörü değerleri başlangıçta belirlenen eğri değerlerinin $\pm 5\%$ 'inden küçük ise en küçük hatayı veren rastgele dağılım vektörünün çözüm olarak belirlenmesi ve algoritmanın sonlandırılması.
7. Eğer bu hata payının dışında kalan sonuç veren bir vektör elde edilmişse en küçük hatayı veren vektör kullanılarak adım 3'e dönülmesi.

8. Çözüm olarak belirlenen vektörden elde edilen indüktans ve kalite faktörü değerlerinin belli bir frekans aralığında başlangıçta belirlenen eğrinin değerleri ile karşılaştırılacak şekilde grafik olarak gösterilmesi. Eğrilerin yakınsaması aralarındaki farkın karelerinin toplamının minimize edilmesi şeklinde gerçekleşmiştir.

Algoritmanın vektör rastgeleleştirilmesi işleminin tekrarlanması ile amaçlanan çözümle bağdaşmayan değerlere doğru ıraksamasını engellemek için çeşitli kontrol mekanizmaları kullanılmıştır. Bu önlemler sayesinde, çözüm bulunamadığında algoritmanın baştan başlatılması ile zaman kaybının önlenmesi sağlanmıştır.

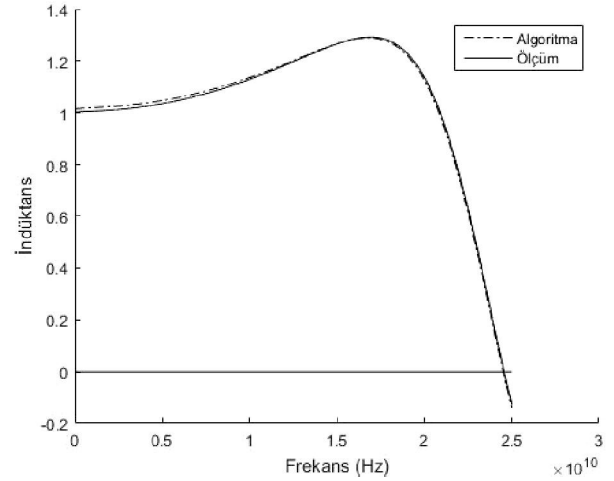
4. Çıkarımlar ve Tartışma

Algoritma 0.35 mikron teknolojisi tabanlı bir ticari kitin indüktörleri üzerinde kullanılmış ve indüktans değerleri normalize edilmiştir. Hedef indüktans – frekans eğrileri düşük, normal ve yüksek olmak üzere üç farklı şekilde seçilmiştir.

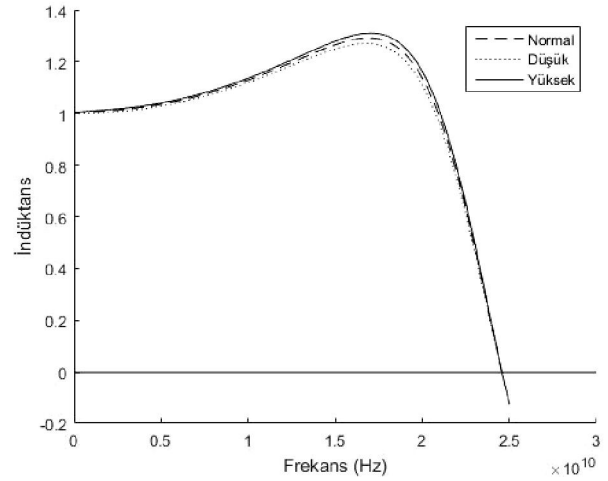
Geliştirilmiş tekil π modeli kullanılarak elde edilen indüktans – frekans eğrileri ile hedeflenen indüktans – frekans eğrileri arasında tekil π modeline kıyasla yüksek frekanslarda daha büyük oranda bir örtüşme olduğu görülmüştür. Bu durum standart tekil π modele parazitik etkilerin eklenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Şekil 5'te de görüldüğü gibi, %5 maksimum hatayı geçmeyecek şekilde ayarlanan algoritma ile elde edilen sonuç %1,92 hata oranı ile başlangıçta belirlenen hedef indüktans-frekans eğrisine yakınsamıştır. Bu çalışmada 0.35 mikron teknolojisi tabanlı bir ticari kit kullanılmıştır ve indüktans değerleri normalize edilmiştir.

Şekil 6'da üretim değişkenliklerinden kaynaklanan indüktör karakteristik eğrilerinin farklılıkları gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, üretim aşamasında karşılaşılan değişiklikler indüktörün indüktans değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüksek ve düşük kalite davranışları geliştirilmiş tekil π modelinde bulunan parametrelerin öngörülebilir değerler dâhilinde değiştirilmesiyle yüksek doğrulukla elde edilebilmektedir. Parametreler düşük ve yüksek kalite faktörü ve indüktans eğrilerine yakınsarken yarattıkları etkiler şu şekilde özetlenebilir:

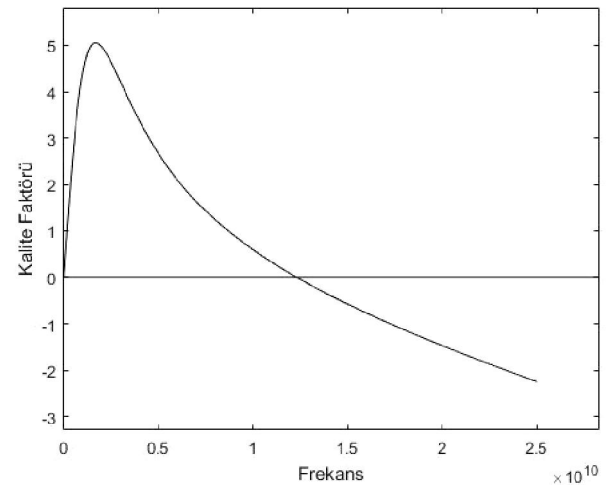
- C_s değeri artırıldığında indüktans eğrisinin tepesi frekans etkisinde sola kaymakta ve tepe değeri büyümektedir.
- C_{sub} değeri artırıldığında öz-tınlama frekansı azalmakta ve indüktör daha düşük frekanslarda kapasitif değer göstermeye başlamaktadır. Bu parametrenin değeri diğer parametrelere göre indüktans eğrisine daha fazla etki etmektedir.
- C_{ox} değerinin artması indüktans değerinin tepe noktasını sola kaydırmakta, indüktörün kapasitif değer göstermeye başladığı frekansı etkilememektedir.
- R_{sub} değerinin artması indüktansın tepe değerinin daha yüksek frekanslarda ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Parametrenin düşük frekanslarda etkisi çok az görülürken yüksek frekanslarda bu parametredeki küçük değişiklikler indüktans değeri üzerinde büyük değişikliklere yol açmaktadır.



Şekil 5: Algoritma sonucu elde edilen ve başlangıçta belirlenen indüktans-frekans eğrileri.



Şekil 6: Düşük, normal ve yüksek kalite indüktans eğrileri.



Şekil 7: Kalite faktörünün frekansa bağlı değişimi.

- R_0 değerinin artması düşük frekanslarda indüktansı artırırken indüktörün daha düşük frekanslarda kapasitif değer göstermesine yol açmaktadır. İndüktansın tepe değerine etkisi çok azdır.
- R_1 değerinin artması düşük frekanslarda indüktansı düşürmektedir.
- L_1 ise düşük frekanslarda indüktansı çok fazla yükseltirken yüksek frekanslarda indüktansta düşüşe neden olmaktadır.

5. Sonuç

Bu bildiride, yonga üstü tümleşik spiral indüktörlerin karakteristiklerini yüksek doğrulukla temsil etme gücüne sahip olan bir vekil model önerilmiştir. Modelin standart tekil π modeline kıyasla indüktörün yüksek frekanslarda ortaya çıkan fiziksel özelliklerini daha iyi yansıttığı görülmüştür. Fiziksel etkilerin en önemlisi olan kabuk etkisi bu bağlamda modele dâhil edilmiştir. Böylece tasarımcıların, sonuçlanması çok uzun zaman alan elektromanyetik benzetimlere göre çok daha kısa sürede ve daha yüksek doğrulukla karar vermesi sağlanmıştır.

Bu çalışmanın bir diğer önemli amacı ise üretim değişkenliklerinden kaynaklanan etkilerin tasarımı ne yönde etkileyeceğinin tasarımcı tarafından fark edilmesini sağlamaktır. Bildiride önerilen algoritma da bu konuda tasarımcıya büyük oranda yardımcı olacaktır. Algoritma yardımıyla vekil modeldeki teorik olarak hesaplanmış fiziksel parametrelerin verdiği indüktans değerinin ölçüm sonuçlarına yaklaşması için nasıl değişmesi gerektiği hesaplanabilmektedir. Üretim aşamasındaki hatalardan kaynaklanan değişkenliklerin yol açtığı indüktans değeri sapmaları da algoritma tarafından öngörülebilmektedir. Böylece değişkenlik analizi dâhilinde yüksek ve düşük kalite faktörüne sahip indüktörler de modellenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] J. Chen, "On-Chip Spiral Inductor/Transformer Design and Modeling for RF Applications", Doktora tezi, Elek. Müh. Böl., Fudan Üni., Orlando, Florida, 2006.
- [2] N.A. Talwalkar, C.P. Yue, S.S. Wong, "Analysis and Synthesis of On-Chip Spiral Inductors", *IEEE Transaction on Electron Devices*, cilt 52, sayı 2, sayfa 176-182, 2005.
- [3] B. Liu, D. Zhao, P. Reynaert, G.G.E. Gielen, "Synthesis of Integrated Passive Components for High-Frequency RF ICs Based on Evolutionary Computation and Machine Learning Techniques", *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, cilt 30, sayı 10, sayfa 1458-68, 2011.
- [4] S.K. Mandal, S. Sural, A. Patra, "ANN and PSO-based Synthesis of On-Chip Spiral Inductors for RF ICs", *IEEE Transaction on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, cilt 27, sayı 1, sayfa 188-192, 2008.
- [5] A.M. Niknejad and R.G. Meyer, "Analysis, Design, and Optimization of Spiral Inductors and Transformers for Si RF ICs", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, cilt 33, sayı 10, sayfa 1470-1481, 1998.
- [6] F. Passos et al., "Analytical Characterization of Variable Width Integrated Spiral Inductors", *International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems"*, sayfa 586-591, Gdynia, Polonya, 2013.

- [7] Chuan Wang et al., "A Wideband Predictive 'Double- π ' Equivalent-Circuit Model for On-Chip Spiral Inductors", *IEEE Transactions on Electron Devices*, cilt 56, sayı 4, sayfa 609-619.
- [8] Y. Cao. et al. "Frequency-Independent Equivalent-Circuit Model for On-Chip Spiral Inductors," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, cilt 38, sayı 3, sayfa 419-426, Mart 2003.
- [9] A. V. Vorst et al., *RF/Microwave Interaction with Biological Tissues*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [10] K. Okada ve K. Masu, "Modeling of Spiral Inductors," *Advanced Microwave Circuits and Systems*, Vitaliy Zhurbenko, Ed. InTech, 2010, sayfa 291-312.
- [11] M. B. Yelten et al., "Scalable and Efficient Analog Parametric Fault Identification", *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design*, sayfa 387-392, San Jose, California, ABD, 2013.