

MOSFET Tabanlı Kayıplı Endüktans Benzetimi

Yunus BABACAN^{1*}

Abdullah YEŞİL²

ÖZET: Bu çalışmada sadece MOSFET'lerden oluşan endüktans benzetimi devresi sunulmuştur. Ana yapı olarak sadece iki transistordan ve bir topraklı kapasiteden meydana gelmiştir. Kutuplanması yapılmış tüm yapı ise sadece beş transistordan oluşmaktadır. Devrede harici kapasite yerine MOS-kapasite kullanılmıştır. Devrenin endüktans değeri elektronik olarak ayarlanmaktadır. Devrenin serimi Cadence programı yardımıyla çizilmiş ve serim sonrası benzetimler makaleye eklenmiştir. Ayrıca sunulan endüktans benzetiminin performansını belirtmek amacıyla ikinci dereceden gerilim-modlu band-geçiren filtre devresi kurulmuştur. Benzetim sonuçları teorik sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: MOSFET-C, endüktans benzetimi.

MOSFET Based Parallel Inductance Simulator

ABSTRACT: In this paper inductance simulator based on MOSFET-only is presented. Inductance simulator consists of only two MOSFETs and a grounded capacitor in the core structure while the whole structure is made up of only five MOSFETs. It is used MOS-capacitance instead of external capacitor in the presented inductance simulator. Inductance value can be tuned electronically by changing biasing voltage. Layout is laid by Cadence software and post-layout simulations are given in the paper. Second order voltage mode band-pass filter is given to demonstrate the performance of the proposed inductance simulator. Simulation results are in good agreement with theoretical results.

Keywords: MOSFET-only, inductance simulator.

¹ Yunus Babacan (Orcid ID:0000-0002-6745-0626), Erzincan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

² Abdullah Yeşil (Orcid ID:0000-0002-0607-8226), Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Yunus Babacan, ybabacan@erzincan.edu.tr

Geliş tarihi / *Received*:29.05.2018
Kabul tarihi / *Accepted*:05.09.2018

GİRİŞ

Elektronik sistemlerde endüktör önemli bir yer tutmaktadır. Ancak tümleşik yapılarda bazı problemler bulunmaktadır ki bunlar düşük değerli ve düşük kalite faktörüne sahip endüktanslar üretilmektedir. Ayrıca tümleşik yapılar da çok fazla yer kaplamakta ve değerleri elektronik olarak ayarlanamamaktadır. Bu sebeplerden ötürü, literatürde, belli frekans aralığında endüktör gibi çalışan aktif eleman, MOSFET'ler, direnç ve kapasiteler yardımı ile oluşturulan endüktans benzetim devreleri sunulmaktadır. Bu devreler sayesinde tümleşik yapılarda daha az yer kapayan, yüksek değerli, yüksek kalite faktörüne sahip endüktans benzetimleri oluşturulmuştur. Dezavantajları olarak ise güç harcamaları ve gürültüye sahip olmaları, sınırlı aralıkta çalışmaları belirtilebilir. Literatürdeki yapılar incelendiğinde aktif ve pasif elemanlar ile oluşturulmuş yapılar bulunmaktadır (Chang et al., 1994; Cicekoglu, 1998; Yuce and Cicekoglu, 2006; Yuce, 2008; Kacar and Yesil, 2010; Alpaslan and Yuce, 2011; Prasad et al., 2011; Yesil et al., 2014; Yesil and Kacar, 2014; Kacar et al., 2014; Pathak et al., 2016). Aktif elemanlar ile oluşturulmuş endüktans benzetim devrelerin dezavantajları arasında çok fazla transistor ile gerçekleştirilmiş aktif eleman yapıları bulunmaktadır. Ayrıca bu yapılarda pasif eleman olarak farklı sayılarda dirençler ve kapasite kullanılmıştır. Ayrıca literatürde, sadece MOSFET'lerden (Konal and Kacar, 2017; Thanachayanont and Payne, 1996) oluşan ve MOSFET ve kapasitelerden meydana gelen endüktans benzetim devreleri (Minaei and Yuce, 2012; Saad et al., 2016; Uyanik and Tarim, 2007) de bulunmaktadır. Sadece MOSFET'lerden oluşan endüktans benzetimi devrelerinde harici kapasite yerine geçit- kaynak kapasite kullanılmaktadır. Ancak tasarımlarda geçiş iletkenliğinin ve geçit-kaynak kapasitesinin ayarlanması bazı dezavantajlar getirmektedir. Örnek olarak MOSFET-C tabanlı endüktans

benzetimleri, transistorların geçiş iletkenlikleri ve harici kapasite ile gerçekleştirilmektedir. Uyanik ve Tarim (Uyanik and Tarim, 2007) tarafından önerilen MOSFET-C tabanlı endüktans benzetimi devresi altı transistor ve bir topraklı kapasiteden oluşmaktadır. Yapının dezavantajı olarak giriş işareti ile birlikte giriş kutuplama gerilimi de olması gerekmektedir. Saad ve arkadaşları (Saad et al., 2016) tarafında sunulan endüktans benzetimi devresi üç transistordan, bir topraklı kapasiteden, bir iki-ucu yüzen direnç ve üç akım kaynağından oluşmaktadır. Minaei ve Yuce tarafından (Minaei and Yuce, 2012) altı transistordan ve bir topraklı kapasiteden oluşan topraklı endüktans benzetimi devresi tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, aktif eleman kullanmaksızın ana yapıda sadece iki MOSFET ve bir topraklı kapasiteden oluşan endüktans benzetimi sunulmuştur. Sunulan endüktans benzetiminin endüktans değeri kutuplama gerilimleri ile elektronik olarak ayarlanmaktadır. Devre literatürdeki yapılar ile karşılaştırıldığında çok az transistor ile gerçekleşmiştir. Ayrıca herhangi bir direnç kullanılmamış ve $134\mu\text{W}$ gibi bir düşük bir güç harcamasına sahiptir. Önerilen endüktans benzetime ait denklemler elde edilmiş, parazitik elemanların etkileri araştırılmıştır. Sunulan endüktans benzetimine ait serimi Cadence programı yardımıyla çizilmiştir ve serim sonrası benzetim sonuçları çalışmaya eklenmiştir. Ayrıca önerilen yapının performansını göstermek amacıyla ikinci dereceden gerilim-modlu band-geçiren filtre devresi seçilmiş ve benzetim sonuçları verilmiştir.

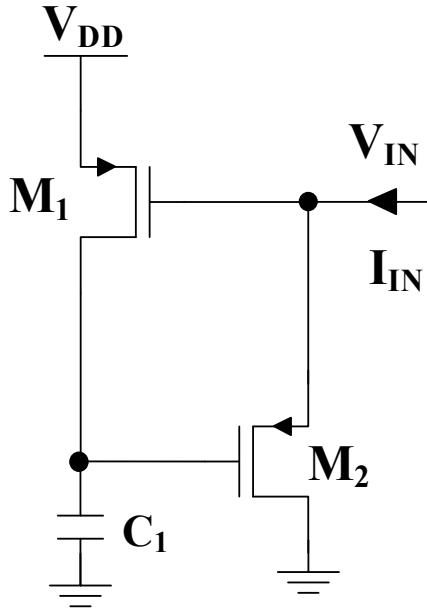
MATERYAL VE YÖNTEM

Önerilen Mosfet-C Tabanlı Endüktans Benzetimi

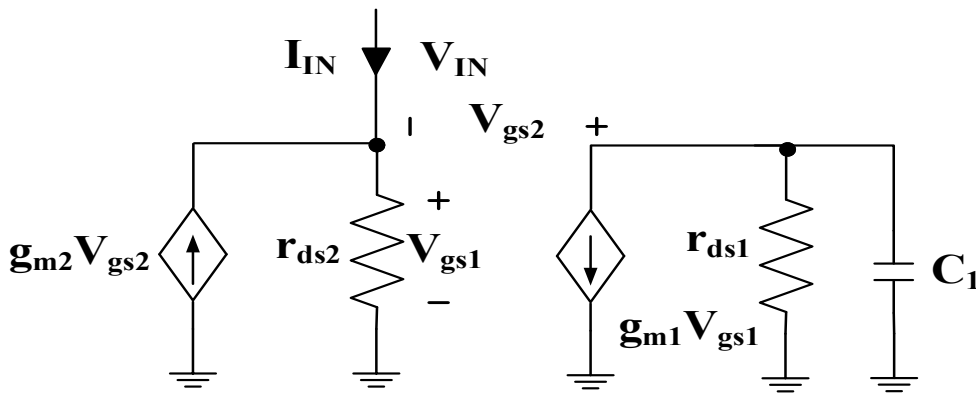
Şekil 1'de de görüldüğü gibi önerilen endüktans benzetimi kutuplamasız içyapıya

sahip olup sadece iki transistor ve bir topraklı kapasiteden oluşmaktadır. Topraklı kapasiteler tümleşik devrelerde avantaj sağlamaktadır.

Endüktans benzetiminde harici direnç yerine transistorların geçiş iletkenlikleri kullanılmıştır.



Şekil 1. Önerilen endüktans benzetimin ana yapısı



Şekil 2. Önerilen endüktans benzetimin küçük işaret cevabı

Bilindiği gibi transistorların geçiş iletkenlikleri kutuplama akımı ile değiştirebileceği için eşdeğer endüktans değeri de elektronik olarak ayarlanabilecektir. Şekil 1' de sunulan endüktans benzetiminin eşdeğer küçük işaret eşdeğeri ise Şekil 2' de verilmektedir. Şekil 2' deki küçük işaret eşdeğeri göz önünde bulundurularak ve transistörlerin çıkış dirençleri ihmal edilerek, devreye ait giriş

admitans transfer fonksiyonu aşağıdaki verildiği gibi elde edilir.

$$Y_{IN-2} = \frac{I_{IN}}{V_{IN}} = g_{m2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{sC_1} \quad (1)$$

Denklem (1) de açıkça görüldüğü üzere eşdeğer endüktans değeri, transistorlerin geçiş iletkenlikleri yardımıyla elektronik olarak ayarlanabilir. Ayrıca denklem (1) den görüldüğü gibi saf endüktansa paralel gelen bir direnç

bulunmaktadır. Eşdeğer endüktansa paralel gelen bu direnç endüktans benzetimin yüksek frekanslardaki çalışmasını sınırlayıcı etkide bulunacaktır. Sunulan endüktans benzetime ait kalite faktörü denklemi (2) de verilmiştir.

$$Q_L = \frac{g_{m1}}{\omega C_1} \quad (2)$$

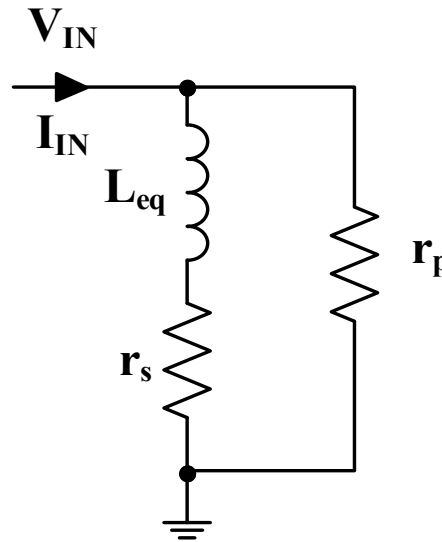
$$Z_{IN-2-parasitic} = \frac{V_{IN-2}}{I_{IN-2}} = r_{ds2} // \frac{1}{g_{m2}} // \left(\frac{1}{g_{m2}g_{m1}r_{ds1}} + \frac{sC_1}{g_{m1}g_{m2}} \right) \quad (3)$$

şeklinde olur.

Denklem (3) den görüldüğü gibi denklem (1) deki saf endüktans değerine seri olarak bir direnç gelmektedir. Endüktansa seri gelen bu direnç, endüktansın düşük frekans bölgesinde sınırlayıcı

Burada ω açısal frekanstır. Ana transistörlerin çıkış dirençleri hesaba katılarak önerilen endüktans benzetiminin giriş empedans transfer fonksiyonu hesaplanırsa;

etkiye sebep olacaktır. Ancak $g_{m1}r_{ds1}$ değeri büyütürsek düşük frekanslardaki çalışma bölgesi artırılabilir. Dahası, g_{m2} değeri arttırarak da düşük frekans bölgesinde iyileşmeler sağlanabilir.



Şekil 3. Eşdeğer pasif elemanlı model.

BULGULAR VE TARTIŞMA

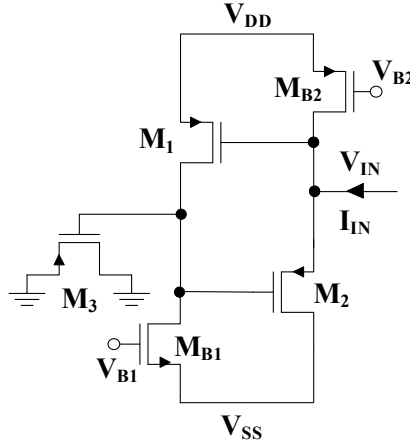
Sunulan endüktans benzetiminin performansını göstermek için TSMC 0.18 μ m teknoloji parametreleri kullanılarak Cadence programında benzetim sonuçları verilmiştir. Kutuplaması yapılmış endüktans benzetiminin tüm yapısı Şekil 4’ de gösterilmiştir. Tüm transistörlere ait genişlik ve uzunluklar ise sırasıyla $(W/L)_1 = 50 \mu\text{m} / 0.72 \mu\text{m}$, $(W/L)_2 = 6 \mu\text{m} / 0.18 \mu\text{m}$, $(W/L)_3 = 80 \mu\text{m} / 1 \mu\text{m}$, $(W/L)_{B1} = 15 \mu\text{m} / 0.72 \mu\text{m}$, $(W/L)_{B2} = 30 \mu\text{m} / 0.72 \mu\text{m}$

şeklinde verilmiştir. Devrenin DC besleme gerilimleri ile kutuplama gerilimleri sırasıyla $V_{DD} = 0.55\text{V}$, $V_{SS} = -0.9\text{V}$, $V_{B1} = -0.36\text{V}$ ve $V_{B2} = -0.14\text{V}$ ‘dur. Devreye ait güç harcaması ise $134 \mu\text{W}$ ’tır. Şekil 5’ de sunulan endüktans benzetimine ait serimi bulunmaktadır. Serim kapladığı alan $584 \mu\text{m}^2$ ’dir.

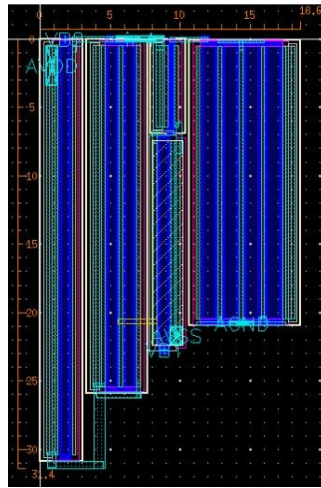
Çalışmada verilen tüm benzetim sonuçları serim sonrası benzetim sonuçlarıdır. M_{B1} ve M_{B2} transistörleri akım kaynağı olarak kullanılmıştır. M_3 transistörü ise MOS-cap (Razavi, 2017) olarak kullanılmıştır ve değeri benzetim

sonuçlarında 0.336pF olarak ölçülmüştür. Sunulan endüktans benzetiminin de endüktans karakteristiğinin frekans ile değişimi Şekil 6’da verilmiştir. 10 MHz çalışma frekansındaki endüktans değeri benzetimden $37.4\ \mu\text{H}$ olarak bulunmuştur. Endüktansa seri gelen eşdeğer

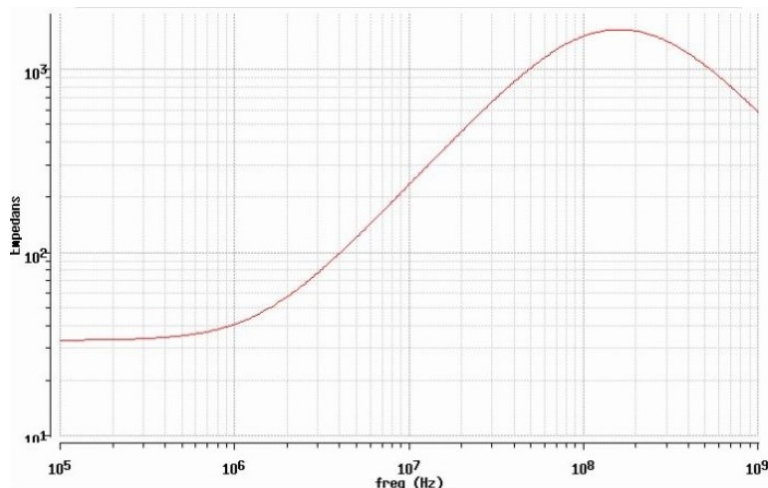
parazitik direncin değeri $33\ \Omega$ olarak bulunur. Şekil 7’de 10MHz’deki endüktans değerinin V_{B1} kutuplama gerilimi ile değişimi bulunmaktadır. Burada endüktans değerinin elektronik olarak değiştirilebileceği açıkça görülmektedir.



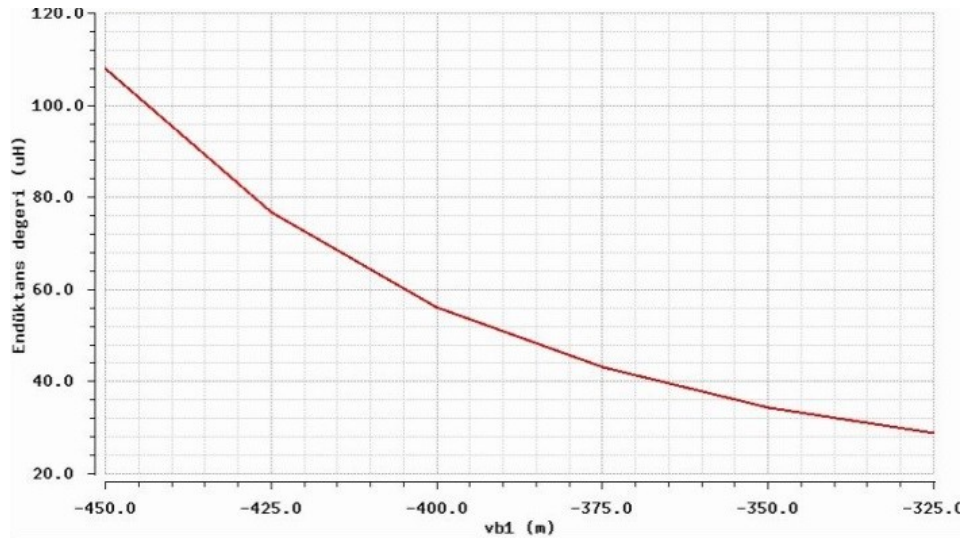
Şekil 4. Kutuplamaları yapılmış endüktans benzetimi



Şekil 5. Sunulan endüktans benzetiminin $18.6\ \mu\text{m} \times 31.4\ \mu\text{m}$ 'lik serimi



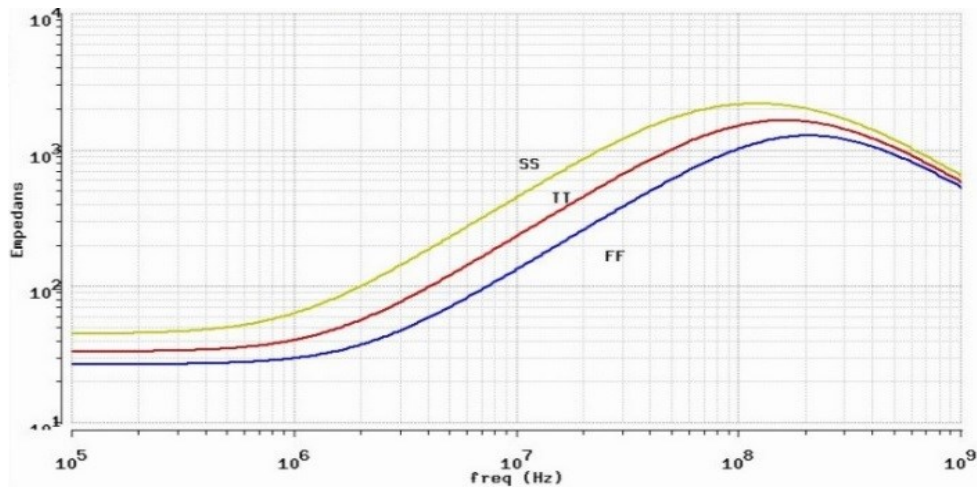
Şekil 6. Endüktans karakteristiğinin frekans ile değişimi



Şekil 7. Kutuplama gerilimi ile endüktans değerinin değişimi

Şekil 8’ de ise farklı teknoloji köşelerinde (SS, TT ve FF) endüktans benzetiminin empedans karakteristiğinin frekans ile değişimi verilmektedir. Şekil 8’ den görüldüğü gibi farklı

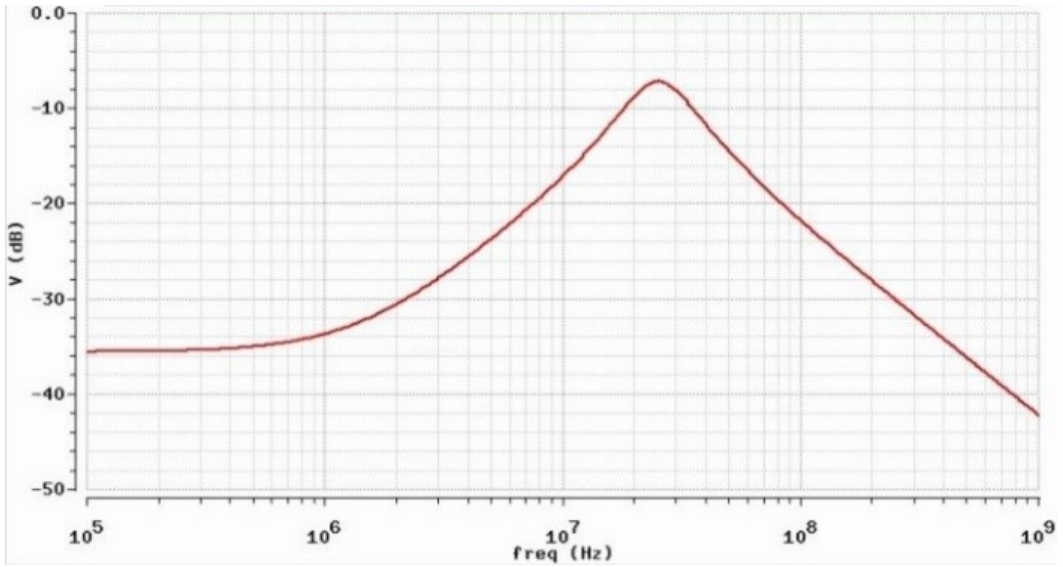
teknoloji köşelerinde empedans karakteristiğinin korunurken değeri çok az miktarda değiştiği görülmüştür.



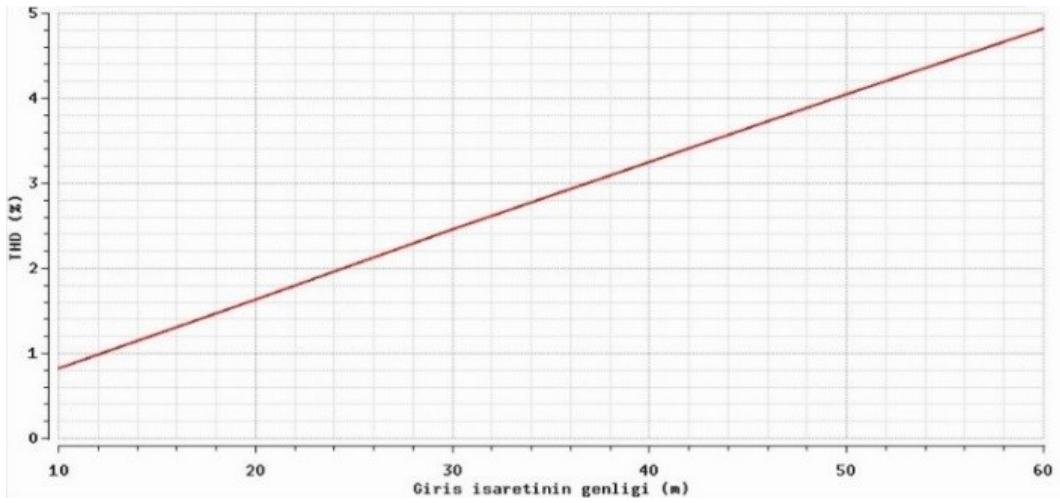
Şekil 8. Kutuplama gerilimi ile endüktans değerinin değişimi

Sunulan endüktans benzetimin performansını doğrulamak için, ikinci dereceden gerilim-modlu band-geçiren filtre devresi kullanılacaktır (Yeşil et al., 2014). Devrede kullanılan pasif elemanların değerleri sırasıyla $C_F=10\text{pF}$ ve $R_F=2\text{k}\Omega$ olarak seçilmiştir. Bu değerlerde filtrenin merkez frekans 25 MHz olarak ölçülmüştür. İkinci dereceden band-geçiren filtre devresinin kazanç-frekans grafiği Şekil 9’ de verilmektedir. İkinci dereceden gerilim-modlu band-geçiren filtrenin zaman alanını analizi

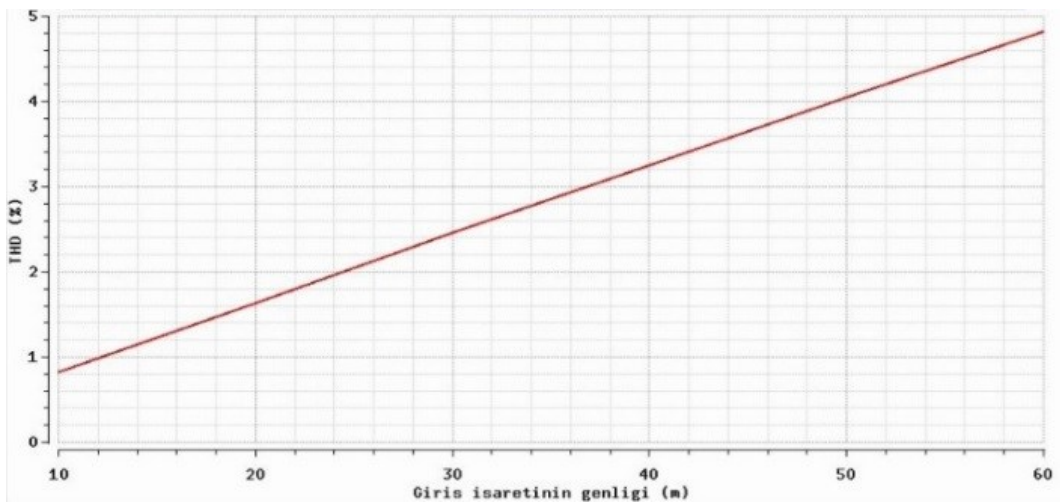
Şekil 10’ da verilmiştir. Çıkış işaretindeki zayıflatma, kazanç-frekans analizi ile doğrulanabilir. Giriş işareti olarak 25MHz de farklı genlik değerleri için sinüs işareti uygulanmıştır. Farklı giriş işaretleri için band-geçiren filtre devresinin toplam harmonik bozulması Şekil 11’ de gösterilmektedir. 60mV tepe değerine kadar THD değeri kabul edilen %5’in altında kaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 9. İkinci dereceden band-geçiren filtrenin kazanç-frekans grafiği



Şekil 10. Band-geçiren filtreye ait zaman alanı analizi



Şekil 11. Giriş değerine bağlı olarak toplam harmonik bozulması

SONUÇ

Bu çalışmada sadece MOSFET'lerden oluşan endüktans devresi sunulmuştur. Endüktans benzetim devresi ana yapı olarak iki MOSFET ve bir topraklı kapasiteden oluşmaktadır. Kutuplanmış endüktans benzetimi ise beş transistordan oluşmaktadır. Transistörlerin biri MOS-Cap olarak kullanılmış ve böylece harici kapasiteye gerek kalmaksızın yapı oluşturulmuştur. Yapıya ait endüktans değerinin elektronik olarak ayarlanabildiği gösterilmiştir. Cadence programı yardımıyla sunulan devrenin serimi çizilmiş olup, serim sonrası sonuçları çalışmaya eklenmiştir. Teorik sonuçlar ile benzetim sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmektedir. Ayrıca endüktans benzetiminin performansını göstermek amacıyla ikinci dereceden gerilim-modlu band-geçiren filtre devresi kurulmuş ve sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içinde elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Alpaslan H, Yuce E, 2011. Bandwidth expansion methods of inductance simulator circuits and voltage-mode biquads. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 20(3):557–572.

Chang CM, Wang HY, Chien CC, 1994. Realization of series impedance functions using one CCII+. *International Journal of Electronics*, 76(1):83–85.

Cicekoglu MO, 1998, Active simulation of grounded inductors with CCII+s and grounded passive elements. *International Journal of Electronics*, 85(4):455–462.

Kacar F, Yesil A, 2010. Novel grounded parallel inductance simulators realization using a minimum number of active and passive components. *Microelectronics Journal*, 41(10):632–638.

Kacar F, Yesil A, Minaei S, Kuntman H, 2014. Positive/negative lossy/lossless grounded inductance simulators employing single VDCC and only two passive elements. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 68(1):73–78.

Konal M, Kacar F, 2017. MOS Only Grounded Active Inductor Circuits and Their Filter Applications. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 26(6), 1750098.

Minaei S, Yuce E, 2012. A simple CMOS-based inductor simulator and frequency performance improvement techniques. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 66(11): 884–891.

Pathak JK, Singh AK, Senani R, 2016. New canonic lossy inductor using a single CDBA and its application. *International Journal of Electronics*, 103(1):1–13

Prasad D, Bhaskar DR, Pushkar KL, 2011. Realization of New Electronically Controllable Grounded and Floating Simulated Inductance Circuits Using Voltage Differencing Differential Input Buffered Amplifiers. *Active and Passive Electronic Components*, 1–8.

Razavi B, 2017. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. Mc Graw Hill Education (2nd ed.). Mc Graw Hill Education. Retrieved from <http://www.lavoisier.fr/notice/frLMO62SSCRRJLO>.

Saad S, Mhiri M, Hammadi A, Besbes K, 2016. A New Low-power, High- Q , Wide Tunable CMOS Active Inductor for RF Applications. *IETE Journal of Research*, 62(2):265–273.

Thanachayanont A, Payne A, 1996. VHF CMOS integrated active inductor. *Electronics Letters*, 32(11), 999.

Uyanik HU, Tarim N, 2007. Compact low voltage high-Q CMOS active inductor suitable for RF applications. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 51(3):191–194.

- Yesil A, Kacar F, 2014. New Dxcii-Based Grounded Series Inductance Simulator Topologies. Istanbul University - Journal of Electrical and Electronics Engineering, 14(2):1785–1789.
- Yesil A, Kacar F, Gurkan K, 2014. Lossless grounded inductance simulator employing single VDBA and its experimental band-pass filter application. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 68(2):143–150.
- Yuce E, 2008. Grounded Inductor Simulators With Improved Low-Frequency Performances. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57(5):1079–1084.
- Yuce E, Cicekoglul O, 2006. The Effects of Non-Idealities and Current Limitations on the Simulated Inductances Employing Current Conveyors. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 46(2):103–110.