

İKİ UCU SERBEST KAYIPsiz ENDÜKTANS VE R-L EMPEDANS BENZETİMLERİNİN AKTİF DEVRELER İLE GERÇEKLENMESİ

Shahram MINAEI¹

Merih YILDIZ¹

Bilgin METİN²

Oguzhan CICEKOGLU²

¹ Doğuş Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34722 Acıbadem, Kadıköy, İstanbul, TÜRKİYE. E-Mail: sminaei@dogus.edu.tr

² Boğaziçi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34342 Bebek, İstanbul, TÜRKİYE. E-Mail: cicekoglu@boun.edu.tr

Anahtar sözcükler: Endüktans Benzetimi, Akım Taşıyıcı, Eliptik Süzgeç

ABSTRACT

A new realization of floating inductance (FI) and two R-L impedance simulators are presented. The FI simulator is constructed with three positive type first-generation current conveyors (CCI+), two resistors and one capacitor while the R-L impedance simulators uses two (CCI+), two resistors and one capacitor. The FI simulator is also used to construct a third order low-pass elliptic filter. The performances of the circuits are tested using SPICE simulation program.

1. GİRİŞ

Entegre spiral endüktansların değerini fiziksel alanları belirler. Bu değerler bilgisayar programı yardımı ile %5'lik hata sınırları içinde bulunabilir ve sıcaklık değişse bile sabit kabul edilebilir. Bununla birlikte kırmık üzerindeki spiral endüktanslar kullanılabilir kalite faktörü (Q) değerini ancak GHz frekanslarda alırlar. (ör. Bazı nH değerleri için, $Q=6$ değerini 1-5GHz de alır.). Diğer taraftan parazitik kapasitelerden dolayı istenmeyen rezonans olayı meydana gelir. Bundan dolayı, özellikle kHz ve MHz frekanslarda aktif elemanlar kullanılarak endüktans gerçekleştirilmesi daha çok ilgi çekmektedir[1].

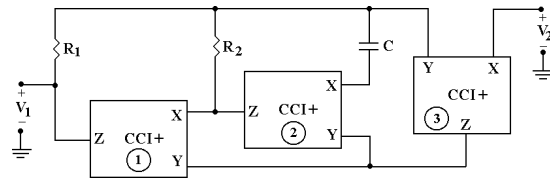
Endüktans benzetim devreleri tek ve çoklu süzgeç tasarımları için yeni tasarım imkanları sunmaktadır. Bu devreler içerdikleri aktif ve pasif eleman tip ve eleman sayısına göre çeşitlendirilirler. Bunların benzetimleri topraklanmış ya da iki ucu serbest endüktans olarak yapılır. Akım taşıyıcılar ile gerçekleştirilmiş iki ucu serbest endüktans ve R-L empedans benzetim (kayıplı endüktans) devreleri literatürde sunulmuştur [2-9]. Bu devrelerin çoğu hem pozitif hem de negatif akım taşıyıcı devreleri gerektirir [2-6, 8]. Önerilen devrelerdeki en büyük sıkıntı dört adet CCI kullanılması ve/veya elemanların uyumluluk gereksinimidir [3-6, 8-9]. Örneğin referans

[7]'de önerilen devrelerde hem CCII hem de işlemsel geçişletkenliği kuvvetlendiricisi kullanılmıştır (OTA). Bu bildiriye sadece pozitif birinci kuşak akım taşıyıcı yapıları kullanılarak kayıplı ve kayıpsız iki ucu serbest endüktans benzetim devreleri gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirme tekniği hem ekonomik olması hem de entegre devre teknolojisiyle gerçekleştirilmesinde kolaylık sağladığı için avantajlı sayılmaktadır. Aynı zamanda önerilen devrelerin gerçekleştirilmesinde elemanların uyumlu olması gerekmektedir. Önerilen devreler seri ve paralel rezonans devreleri ile test edilmiştir.

2. ÖNERİLEN DEVRELER

İdeal bir CCI yapısının karakteristik denklemleri $I_y=I_x$, $V_x=V_y$ ve $I_z=\pm I_x$ şeklinde ifade edilir. I_z akımının pozitif ya da negatif olması akım taşıyıcının pozitif akım taşıyıcı (CCI+) ya da negatif akım taşıyıcı (CCI-) olmasını belirler.

Önerilen kayıpsız iki ucu serbest endüktans benzetim devresi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil-1. Kayıpsız iki ucu serbest endüktans benzetimi.

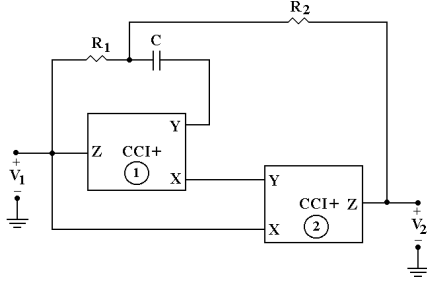
Devre üç tane (CCI+) ve üç tane pasif eleman içermektedir. Şekil 1'de verilen devrenin analizi ile kısa devre admitans matrisi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$[Y] = \frac{1}{sCR_1R_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

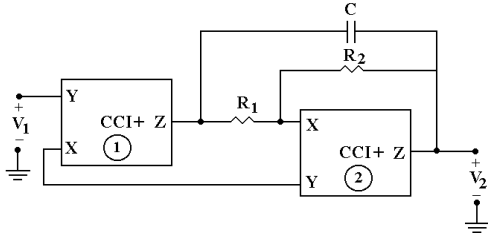
Böylece şekil 1'deki devreden endüktans değeri $L_{eq}=CR_1R_2$ olacak şekilde kayıpsız bir iki ucu serbest endüktans elde edilir. Şekil 1'deki devrenin duyarlılık analizleri aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$S_{R_1}^{L_{eq}} = S_{R_2}^{L_{eq}} = S_C^{L_{eq}} = 1$$

Aynı zamanda iki CCI+, iki direnç ve bir kapasite elemanı kullanılarak şekil 2'deki iki ucu serbest seri ve şekil 3'deki iki ucu serbest paralel R-L endüktans benzetim devreleri gerçekleştirilebilir.



Şekil-2. İki ucu serbest seri R-L empedans benzetimi



Şekil-3. İki ucu serbest paralel R-L empedans benzetimi

Şekil 2'deki devrenin analizinden aşağıdaki kısa devre admitans matrisi elde edilir.

$$[Y] = \frac{1}{R_1 + R_2 + sCR_1R_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Böylece, iki ucu serbest seri bir R-L benzetimi (kayıplı endüktans) gerçekleştirilmiş olur. Buradaki $L_{eq}=CR_1R_2$ ve $R_s=R_1+R_2$ şeklindedir. Kayıplı endüktansın ω_0 (çalışma frekansı) frekansındaki kalite faktörü (Q_L) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$Q_L = \frac{\omega_0 L_{eq}}{R_s} = \frac{\omega_0 CR_1R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

Şekil 2'deki devrenin duyarlılık analizleri aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$S_{R_1, R_2, C}^{L_{eq}} = 1, S_{R_1}^{Q_L} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, S_{R_2}^{Q_L} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Benzer şekilde şekil 3'deki devrenin analizinden aşağıdaki kısa devre admitans matrisi elde edilir.

$$[Y] = \left[\frac{1}{sCR_1R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Böylece $L_{eq}=CR_1R_2$ ve $R_p=R_1||R_2$ olacak şekilde iki ucu serbest paralel R-L benzetimi elde edilmiştir. R_p ile ilgili frekanstaki endüktans kalite faktörü Q_L arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde verilir.

$$Q_L = \frac{R_p}{\omega_0 L_{eq}} = \frac{1}{\omega_0 C(R_1 + R_2)} \quad (5)$$

Şekil 3'deki devrenin duyarlılık analizleri aşağıdaki şekildedir

$$S_{R_1, R_2, C}^{L_{eq}} = 1, S_{R_1}^{Q_L} = \frac{-R_1}{R_1 + R_2}, S_{R_2}^{Q_L} = \frac{-R_2}{R_1 + R_2}$$

Duyarlılıkların tamamının değerleri birden küçük olacak şekildedir. Son olarak, önerilen devrelerin hiçbirinde elemanlar arası uyum gerekmemektedir.

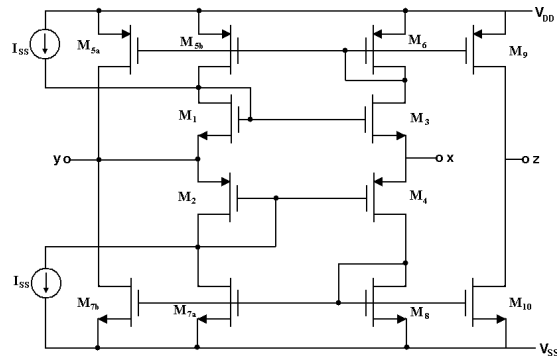
3. İDEALSİZLİK ANALİZLERİ

İdeal olmayan bir CCI yapısının uç bağıntıları $I_y = \gamma I_x$, $V_x = \beta V_y$ ve $I_z = \pm \alpha I_x$ şeklinde verilir. Burada $\alpha \approx 1$ ve $\gamma \approx 1$ olan değerler CCI'nin akım kazancını ve $\beta \approx 1$ olan değer ise CCI'nin gerilim kazancını göstermektedir. Ayrıca I_z akımının pozitif ya da negatif olması akım taşıyıcının pozitif (CC+) ya da negatif (CC-) olmasını belirler.

Kısa devre admitans matrisindeki CCI yapısını ideallsizlik etkilerinin görülmesi için, ideal olmayan CCI yapısının uç bağıntıları kullanılarak devre tekrar analiz edilmiştir. İdeal olmayan kısa devre admitans matrisi Tablo 1'de verilmiştir. Aynı kırıkk yapıyı üzerinde akım taşıyıcıların ideallsizlikleri birbirine çok yakın olduğu için, önerilen devrelerdeki tüm α ve γ lar ideal olmayan akım kazancı, β 'lar ise ideal olmayan gerilim kazancı olarak kullanılabilir.

4. BENZETİM SONUÇLARI

Teorik analizlerinin doğruluğunu göstermek amacıyla önerilen devreler SPICE benzetim programı ile test edilmiştir. Devrelerde kullanılan akım taşıyıcının şematik yapısı Şekil 4'de gösterilmiştir [10].



Şekil-4. Benzetim devrelerinde kullanılan AB sınıfı CCI+ yapısı

DC besleme gerilimleri $\pm 2V$ ve $I_{SS}=6\mu A$ şeklinde alınmıştır. Tüm transistörler doymada çalışmaktadır. Benzetimler $0.35\mu m$ TSMC CMOS proses parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ($V_{THN}=0.544V$, $V_{THP}=-0.714V$, $\mu_N=436cm^2/V\cdot s$, $\mu_P=212cm^2/V\cdot s$, $T_{OX}=7.9nm$). MOS tranzistörlerin boyutları Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 1'deki devrenin başarımının incelenmesi için, Şekil 5'deki üçüncü dereceden gerilim modlu alçak geçiren eliptik süzgeçte test edilmiştir.

Tablo 1. İdeal olmayan kısa devre admitans matrisi.

İdeal olmayan kısa devre admitans matrisi	
Şek.1	$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{(1-sCR_2(\alpha-1))(\alpha+\alpha^2-\gamma^2)}{R_1(\alpha+sCR_2\alpha+\gamma(sCR_2(\alpha-1)-1))} & \frac{(sCR_2(\alpha-1)-1)(\alpha+\alpha^2-\gamma^2)}{\beta R_1(\alpha+sCR_2\alpha+\gamma(sCR_2(\alpha-1)-1))} \\ \frac{(sCR_2(\alpha-1)-1)\gamma}{R_1(\alpha+sCR_2\alpha+\gamma(sCR_2(\alpha-1)-1))} & \frac{(1-sCR_2(\alpha-1))\gamma}{\beta R_1(\alpha+sCR_2\alpha+\gamma(sCR_2(\alpha-1)-1))} \end{bmatrix}$
Şek.2	$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{\beta\gamma^2+sC(R_1(1-\alpha\gamma)+R_2(\beta-1)(\gamma(\alpha+\gamma)-1))}{\beta\gamma^2(R_1+R_2+sCR_1R_2)} & \frac{-\gamma^2+sCR_1(\alpha\gamma-1)}{\gamma^2(R_1+R_2+sCR_1R_2)} \\ \frac{sC\alpha(R_2(1-\beta)+R_1)-\gamma^2(sCR_1+\beta)}{\beta\gamma^2(R_1+R_2+sCR_1R_2)} & \frac{\gamma^2+sCR_1(\gamma^2-\alpha)}{\gamma^2(R_1+R_2+sCR_1R_2)} \end{bmatrix}$
Şek.3	$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{\alpha\gamma\beta^2(sC(R_1+R_2)+1)}{R_2(sCR_1+1-\alpha\gamma)} & \frac{-\alpha\gamma(sC(R_1+R_2)+1)}{R_2(sCR_1+1-\alpha\gamma)} \\ \frac{(1-\alpha(\gamma-1))\beta^2(sC(R_1+R_2)+1)}{R_2(sCR_1+1-\alpha\gamma)} & \frac{(1-\alpha(\gamma-1))(sC(R_1+R_2)+1)}{R_2(sCR_1+1-\alpha\gamma)} \end{bmatrix}$

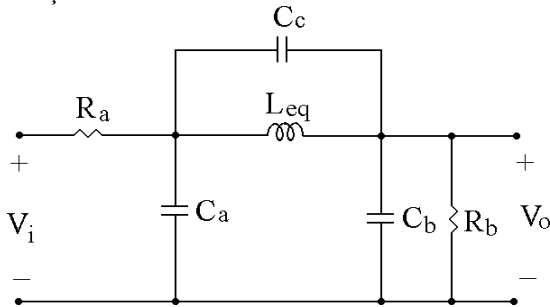
Tablo 2. Şekil 4’de gösterilen CCI yapısında kullanılan MOS transistorların boyutları.

MOSFET	W [μm]	L [μm]
M ₁ , M ₃ , M ₈ , M ₁₀	50	0.6
M ₂ , M ₄ , M ₆ , M ₉	100	0.6
M _{5a}	90	0.6
M _{7a}	45	0.6
M _{7b}	5	0.6
M _{5b}	10	0.6

Devrede $R_a=R_b=R$, $C_a=C_b=C$ seçilirse, gerilim transfer fonksiyonu

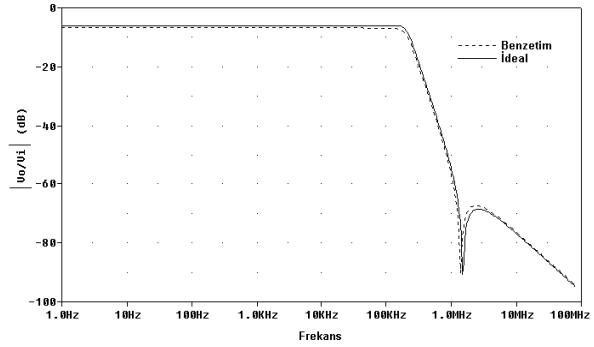
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R(1+s^2C_cL_{eq})}{(1+RCs)[RL_{eq}(C+2C_c)s^2+L_{eq}s+2R]} \quad (6)$$

olarak bulunur. Süzgeç yapısındaki eleman değerleri: $R_a=R_b=1\text{k}\Omega$, $C_a=C_b=1.0212\text{nF}$, $C_c=0.0098\text{nF}$ olarak seçilmiştir. Ayrıca şekil 1’deki devrede $R_1=2\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$ ve $C=0.567\text{nF}$ alınarak $L_{eq}=1.1355\text{mH}$ elde edilmiştir.



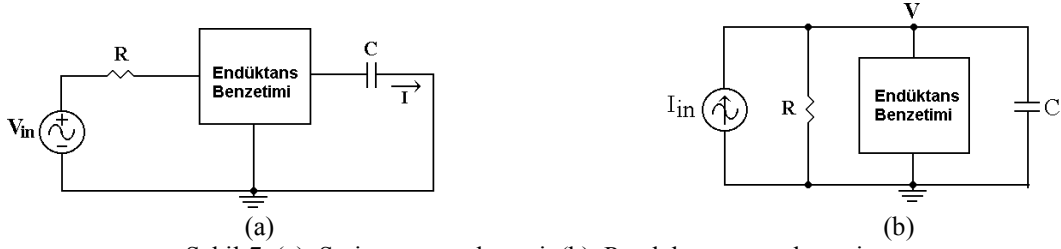
Şekil-5. Üçüncü dereceden alçak geçiren süzgeç

Süzgeç yapısının frekans cevabı Şekil 6’da verilmiştir. Benzetim sonuçları ile ideal frekans cevabının uyum içinde olduğu görülmektedir. İdeal karakteristiktan sapmalar CCI yapısının idealsizlik etkilerinden ve sınırlı band genişliğinden kaynaklanmaktadır. Devrelerin Q_L faktörünü hesaplamak için, kayıpsız ve seri R-L endüktans benzetiminde seri R-L-C rezonans devresi ve paralel R-L endüktans benzetiminde ise paralel R-L-C rezonans devresi kullanılmıştır. Seri ve

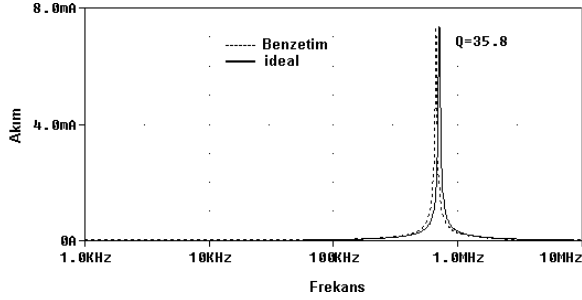


Şekil-6. Alçak geçiren eliptik süzgecin frekans cevabı

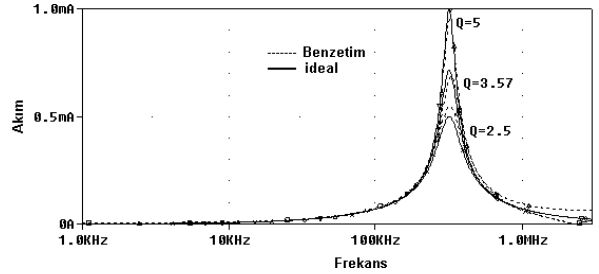
paralel rezonans devreleri sırası ile Şekil 7 (a) ve (b)’de gösterilmiştir. Şekil 1’deki kayıpsız endüktans benzetiminde $L=1\text{mH}$ elde edebilmek amacıyla $C=1\text{nF}$ ve $R_1=R_2=1\text{k}\Omega$ olarak seçilmiştir. Şekil 7(a)’da kayıpsız endüktans kullanılarak, kapasite elemanı 50pF ve direnç elemanı 125Ω iken seri R-L-C rezonans devresinin rezonans frekansı $f_o=700\text{kHz}$ ve kalite faktörü $Q=35.8$ olarak bulunmuştur. Devrenin akım karakteristiği Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 2’deki devrede pasif elemanlar $L=2.5\text{mH}$ olacak şekilde: $C=10\text{nF}$, $R_1=R_2=500\Omega$ seçilmiştir. Bu devre Şekil 7 (a)’daki seri R-L-C rezonans devresinde kullanılmıştır. Şekil 7 (a)’daki devrede kapasite elemanı 0.1nF iken rezonans frekansı $f_o=323.6\text{kHz}$ olarak elde edilmiştir. Bu devrede direnç elemanının değeri değiştirilerek farklı kalite faktörleri (Q) için benzetim sonuçları Şekil 9’da gösterilmiştir. Son olarak, Şekil 3’deki devrede pasif elemanlar $L=10\text{mH}$ olacak şekilde: $C=100\text{pF}$, $R_1=R_2=10\text{k}\Omega$ seçilmiştir. Bu devre Şekil 7 (b)’deki paralel R-L-C rezonans devresinde kullanılmıştır. Şekil 7(b)’deki devrede kapasite elemanı 8nF iken rezonans frekansı $f_o=18.2\text{kHz}$ elde edilmiştir. Bu devrede direnç elemanının değeri değiştirilerek farklı kalite faktörleri (Q) için benzetim sonuçları Şekil 10’da verilmiştir. Şekil 8’den 10’e kadar görüldüğü gibi benzetim sonuçları ile teorik hesaplamalar uyum içindedir. Şekil 1,2 ve 3’de verilen devrelerin endüktans kalite faktörü (Q_L), seri ve paralel rezonans devresi kalite faktörü (Q) Tablo 3’de verilmiştir.



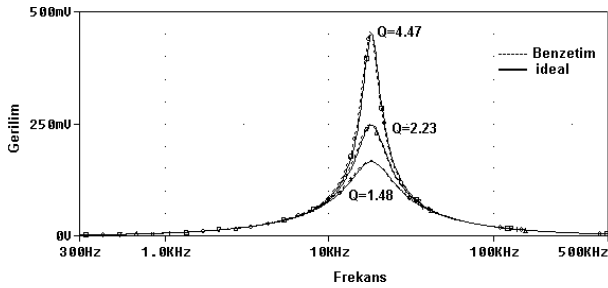
Şekil-7. (a). Seri rezonans devresi. (b). Paralel rezonans devresi.



Şekil-8. Kayıpsız endüktans benzetim devresi kullanılarak gerçekleştirilmiş seri R-L-C devrenin akım karakteristiği.



Şekil-9. Seri R-L endüktans benzetim devresi kullanılarak gerçekleştirilmiş seri R-L-C devrenin akım karakteristiği.



Şekil-10. Paralel R-L endüktans benzetim devresi kullanılarak gerçekleştirilmiş paralel R-L-C devrenin gerilim karakteristiği.

Tablo 3. Devrelerin endüktans kalite faktörü (Q_L) ve kalite faktörü (Q).

	Seri R-L empedans benzetimi	Paralel R-L empedans benzetimi	Kayıpsız endüktans benzetimi
Q	5	4.47	35.8
Q_L	5	4.52	93

5. SONUÇ

Bu bildiride, CCI yapısı kullanılarak gerçekleştirilen iki ucu serbest kayıpsız, iki ucu serbest seri R-L ve iki ucu serbest paralel R-L endüktans benzetimi önerilmiştir. Devreler minimum sayıda pasif eleman içermektedir ve eleman eşleme gerekmemektedir. Endüktans benzetim devresinin uygulama alanını göstermek amacı ile bir üçüncü dereceden eliptik süzgeç devresi gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları ideal hesaplamalar ile uyum içindedir. CCI tabanlı endüktans/empadans benzetim devrelerinin osilatör ve çok fonksiyonlu süzgeç tasarımında kullanılabilirliği de açık bir şekilde görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Sun, Y., Design of high frequency integrated analogue filters. (Published by IEE, 2002, London, United Kingdom)
- [2] Senani, R., New tunable synthetic floating inductors. *Elect. Lett.* **16**, 382–383, 1980.
- [3] Pal, K., Novel floating inductance using current conveyors. *Elect. Lett.*, **17**, 638, 1981.
- [4] Pal, K., New inductance and capacitor floatation schemes using current conveyors. *Elect. Lett.*, **17**, 807-808, 1981.

- [5] Singh, V., Active RC single-resistance-controlled lossless floating inductance simulation using single grounded capacitor. *Electronics Letters*, **17**, 920-921, 1981.
- [6] Higashimura, M., and Fukui, Y., Novel method for realising lossless floating immittance using current conveyors. *Elect. Lett.* **23**, 498–499, 1987.
- [7] Higashimura, M., and Fukui, Y., Simulation of floating inductance using two current conveyors and an operational transconductance amplifier. *Int. Journal of Electronics*, **66**, 633–638, 1989.
- [8] Hou, C.L., Chen, R.D., Wu, Y.P., and Hu, P.C., Realization of grounded and floating immittance function simulators using current conveyors, *Int. Journal of Electronics*, **74**, 917-923, 1993.
- [9] Kiranon W., and Pawarangkoon P., Floating inductance simulation based on current conveyors, *Elect. Lett.*, **33**, 1748-1749, 1997.
- [10] Bruun, E., Class AB CMOS first-generation current conveyor. *Electronics Letters*, **31**, 422-423, 1995.