

SADECE AKTİF ELEMAN KULLANARAK SÜZGEÇ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Sinem ÇİFTÇİOĞLU¹

Hakan KUNTMAN²

Nil TARIM³

Oğuzhan ÇİÇEKOĞLU⁴

^{1,2,3}Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Elektrik-Elektronik Fakültesi

Istanbul Teknik Üniversitesi, 80626, Maslak, İstanbul

⁴Boğaziçi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 80815 Bebek-İstanbul

¹e-posta: sinemciftcioglu@yahoo.com

²e-posta: kuntman@ehb.itu.edu.tr

³e-posta: tarim@ehb.itu.edu.tr

⁴e-posta: cicekoglu@boun.edu.tr

Anahtar sözcükler: Devreler ve Sistemler, Aktif Süzgeçler, Akım Modlu Devreler

ABSTRACT

This paper presents two second-order lowpass filters realized with operational amplifiers (OA) and operational transconductance amplifiers (OTA) only. The circuits do not require additional passive components, which makes them suitable for integrated circuit (IC) implementation and reduces chip area. The filter parameters can be adjusted independently. All filter parameters are tunable through the g_m of the OTAs, whereas they can be independently adjusted without any component matching constraints. Simulation results of the filters show that they are in good agreement with theory.

1. GİRİŞ

Analog ve dijital elektronik arasındaki yarış, özellikle iletişim (sayısal işaret işleme) ve otomasyon sistemlerinde, dijital elektronik tarafından kazanılmış görülmektedir. Ancak, gerçek dünya ‘analog’ olduğundan, en azından arayüzlerde analog yapıtaşlarına gereksinim vardır. Analog-dijital arayüzlerinde analog süzgeçlerin kullanımı bir zorunluluktur.

Tümüyle tümleştirilmiş aktif süzgeçler, ‘sürekli zaman’ ve ‘örneklemeli veri’ sistemleriyle elde edilebilmektedir. Her iki türün diğerine göre bazı üstünlükleri ve dezavantajları vardır. Örneğin, örneklemeli veri süzgeçleri düşük distorsiyonlu ve yüksek doğruluklu frekans yanıtı sağlayabilir ve kırmık alanını verimli kullanırlar; ancak yüksek frekanslar için uygun değildirler. Sürekli zaman süzgeçleri yüksek frekanslarda kullanılabilirler, ancak üretim süreci toleransları, sıcaklık, parazitikler, yaşlanma gibi etkilere çok bağımlı olduklarından

otomatik ayara (frekans yanıtını düzeltmek için) gereksinim duyarlar.

Anahtarlamalı kapasite süzgeçler, örneklemeli veri sistemlerinden en yaygın olanıdır. İşlemsel kuvvetlendiricinin sonlu kazanç-band genişliği, sonlu dc gerilim kazancı, anahtarların sonlu dirençleri, saat girişimi vb. yüzünden, yüksek frekanslarda bunların performansı keskin biçimde düşer.

Anahtarlamalı kapasite süzgeçlerin dezavantajları, örneklemeli veri süzgeçlerin yeterli performans gösteremediği birçok uygulama için tümüyle tümleştirilmiş yüksek performanslı sürekli zaman süzgeçlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu yüzden bu konu üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Aktif-RC süzgeçlerin gerçekleştirilmesindeki pasif dirençlerle ilgili sorun ve zorluklar, sürekli zaman süzgeçleri olarak sunulan MOSFET-C süzgeçlerle çözümlenmiştir. Bu yapılarda, klasik aktif-RC süzgeçlerdeki dirençler doğrusal bölgede çalışan ve eşdeğer direnç değeri gerilimle ayarlanabilen MOSFET’lerle değiştirilmiş, böylece hem pasif dirençlerin yarattığı sorunlardan kurtulmuş, hem de otomatik ayar olanağı sağlanmıştır. Ancak bu yapıların da bazı önemli sorunları vardır. Özellikle işlemsel kuvvetlendiricilerin band genişliği sınırlamaları, dengeli giriş-çıkışa olan gereksinim ve MOSFET dirençlerin dar ayar aralığıyla ayarın verimli bir biçimde yapılamaması en önemli sorunlardır.

Günümüzde ise, sadece işlemsel kuvvetlendirici (OA) ve işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) kullanılarak gerçekleştirilen aktif süzgeç yapılarına ilgi artmaktadır [1-5]. Bu ilgi, süzgeç

karakteristiklerinin doğrudan doğruya OTA'nın geçiş iletkenliği (g_m) ve/veya işlemsel kuvvetlendiricinin kompanzasyon kapasitesi ile elektronik olarak ayarlanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu süzgeç yapıları, başka hiçbir pasif elemana ihtiyaç duymazlar ve bu sebepten dolayı bipolar ve CMOS teknolojisindeki tümdevre (IC) gerçeklemeleri için daha uygun olarak düşünülmektedirler.

Bu çalışmada, sadece aktif elemanlar kullanılarak oluşturulan iki AG süzgeç yapısı önerilmiş, bu süzgeçlerin başarımı, yine bu çalışma kapsamında önerilen yüksek performanslı işlemsel kuvvetlendirici ve OTA yapıları kullanılarak SPICE benzetim programıyla gösterilmiştir.

2. ÖNERİLEN AG AKTİF SÜZGEÇ YAPILARI

Bu bölümde, sadece işlemsel kuvvetlendirici ve işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) kullanılarak gerçekleştirilen aktif süzgeç yapısına uygun olarak, iki işlemsel kuvvetlendirici ve iki OTA ile tasarlanan, gerilim modlu ikinci dereceden alçak geçiren süzgeç yapısından bahsedilecektir. Bütün süzgeç parametreleri, eleman uyumlaştırma sınırlamalarından tamamen bağımsız olarak, OTA'ların geçiş iletkenliği (g_m) aracılığı ile ayarlanabilmektedir.

Tasarlanan aktif alçak geçiren süzgeçlerin açısal kesim frekansı (ω_0) ve kalite faktörü (Q), işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancı A(s)'nin, A(s) = B/s formunda olduğu varsayılarak, B vasıtası ile bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. OTA'ların geçiş

iletkenliği (g_m) değerleri kalite faktörünü (Q), B ise kompanzasyon kapasitesi aracılığı ile açısal kesim frekansını (ω_0) ayarlamak için kullanılmaktadır. İşlemsel kuvvetlendiricilerin kazanç-band genişliği çarpımlarının eşit olduğu varsayımı altında, her iki süzgecin transfer fonksiyonu T(s) = V_O/V_i aşağıda verildiği gibidir:

$$T_{AG1}(s) = \frac{(g_{m1} + g_{m2}) \cdot B^2}{g_{m2} \cdot s^2 + (g_{m1} + g_{m2}) \cdot B \cdot s + (g_{m1} + g_{m2}) \cdot B^2} \quad (1)$$

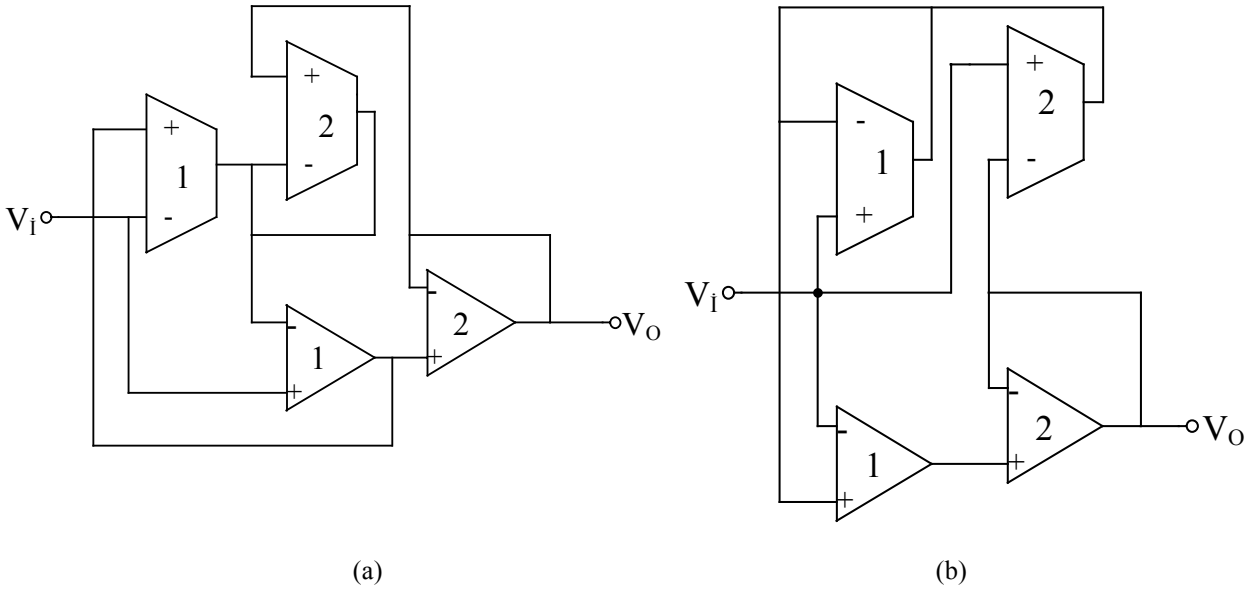
$$T_{AG2} = \frac{g_{m2} \cdot B^2}{g_{m1} \cdot s^2 + g_{m1} \cdot B \cdot s + g_{m2} \cdot B^2} \quad (2)$$

$$\omega_{OAG1} = B \cdot \sqrt{1 + \frac{g_{m1}}{g_{m2}}} \quad Q_{AG1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{g_{m1}}{g_{m2}}}} \quad (3)$$

$$H_{AG1} = 1$$

$$\omega_{OAG2} = B \cdot \sqrt{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}} \quad Q_{AG2} = \sqrt{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}} \quad (4)$$

$$H_{AG2} = 1$$



Şekil-1. Önerilen AG Süzgeç Topolojileri

Tasarlanan AG1 ve AG2 süzgeç yapılarında bir tasarım örneği olarak Butterworth süzgeç karakteristiğinin elde edilebilmesi başka bir deyişle $Q = 1/\sqrt{2}$ sağlanabilmesi için, AG1 yapısında $g_{m1} = g_{m2}$ ve AG2 yapısında $g_{m1} = 2g_{m2}$ seçilmiştir. İşlemsel kuvvetlendiricilerin, kompanzasyon kapasitesi aracılığı ile kazanç-band genişliği çarpımı değiştirilebilmekte, diğer taraftan bu değişim sayesinde tasarlanan her iki süzgeçnin de kesim frekansı ayarlanabilmektedir.

3. CMOS İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ VE OTA YAPILARI

Tasarlanan ortak kaynak-ortak geçitli kuvvetlendirici ile işlemsel kuvvetlendirici yapısı şekil-2a'da verilmiştir. Bir çok uygulamada kat kazancının yeteri kadar büyük değerli olması, tek bir ortak-kaynak-ortak geçitli kuvvetlendirici kullanılarak sağlanabilir [6,7]. Böyle bir çözümün yararı, tek bir kat ile daha iyi bir frekans eğrisi elde edilebilmesidir. Alçak frekanslarda çalışmada, devrenin sağladığı kazanç, iki katlı işlemsel kuvvetlendiricinin sağladığı kazançla aynı olur. Ancak, yapıda çıkış düğümünün empedansı, iki katlı yapının çıkış empedansına göre g_{m,r_o} oranında yükseltilmiştir. Devrenin gerilim kazancı ise giriş tranzistorlarının eğimi ile çıkış düğümü empedansının çarpımıdır. Bu yapının sağladığı önemli bir yarar, baskın kutbun yük kapasitesi ile belirlenmesi, başka bir deyişle, bu kapasitenin aynı zamanda kompanzasyon kapasitesi işlevini yerine getirmesidir. İki kazanç katlı yapıda ise durum böyle değildir. İki katlı kuvvetlendiricide yük kapasitesinin artırılması baskın olmayan kutbu etkiler ve faz payını azaltır. Burada ele alınan tek katlı yapıda ise yük kapasitesinin artırılması faz payını iyileştirmektedir. Yapının transfer fonksiyonunda M3 ve M4 kaskod tranzistorlarının ve akım kaynağı tranzistorlarının geçit-kaynak kapasitelerinden ileri gelen baskın olmayan kutup bulunur. Bunun frekansı tranzistorların geçiş frekansı mertebesinde. Devrede M12, M13, M14, M15, Q1 ve Q2 tranzistorları ile oluşturulan çıkış katı, çıkış direncini küçültmek amacı ile yapıya eklenmiştir.

Tasarımda kullanılan simetrik CMOS kaskod OTA yapısı Şekil-2b'de verilmiştir [6-8].

4. BENZETİM SONUÇLARI

SPICE simülasyonu için kullanılan parametreler Tablo 1'de, devrede kullanılan MOS ve bipolar tranzistorların boyutları da Tablo2 ve Tablo 3'de verilmiştir. Tasarlanan işlemsel kuvvetlendirici yapısında besleme gerilimleri $V_{DD} = V_{SS} = 5V$, $V_{K1} = -3V$, $V_{K2} = 2V$, $V_{K3} = -1V$ olarak alınmıştır. Böylece kullanılan her bir MOS tranzistorun doymada çalışması garantilenmiştir. Tasarım örneği olarak, işlemsel kuvvetlendiricinin kazanç-band genişliği çarpımının $B=2\pi(648.457 \times 10^3)$ rad/s değerini sağlaması için kompanzasyon kapasitesi 200 pF olarak seçilmiştir.

AG1 yapısı içinde, $g_{m1} = g_{m2} \cong 99.54 \mu S$ elde edebilmek için $V_{con} = 1.75 V$ olarak alınmıştır.

AG2 yapısı içinde, $g_{m1} = 2.g_{m2}$ eşitliğini sağlayabilmek amacıyla, $V_{con} = 3.55 V$ değerinde $g_{m1} = 140.448 \mu S$ ve $V_{con} = 0.55 V$ değerinde ise $g_{m2} = 69.98 \mu S$ değerleri elde edilmiştir.

Elde edilen bu değerler, tasarlanan AG1 ve AG2 yapılarının kalite faktörü (Q) ve açıl kesim frekansı (ω_c) eşitliklerinde yerine konulduğunda şu sonuçlar elde edilmiştir:

$$\omega_{OAG1} = B \cdot \sqrt{1 + \frac{g_{m1}}{g_{m2}}} = 2\pi(648.457 \times 10^3) \sqrt{\frac{99.54\mu}{99.54\mu}} \\ \approx 2\pi(917.05 \times 10^3) \text{ rad/s}$$

$$\omega_{OAG2} = B \cdot \sqrt{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}} = 2\pi(648.457 \times 10^3) \sqrt{\frac{69.98\mu}{140.448\mu}} \\ \approx 2\pi(457.73 \times 10^3) \text{ rad/s}$$

$$Q_{AG1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{g_{m1}}{g_{m2}}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{99.54\mu}{99.54\mu}}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

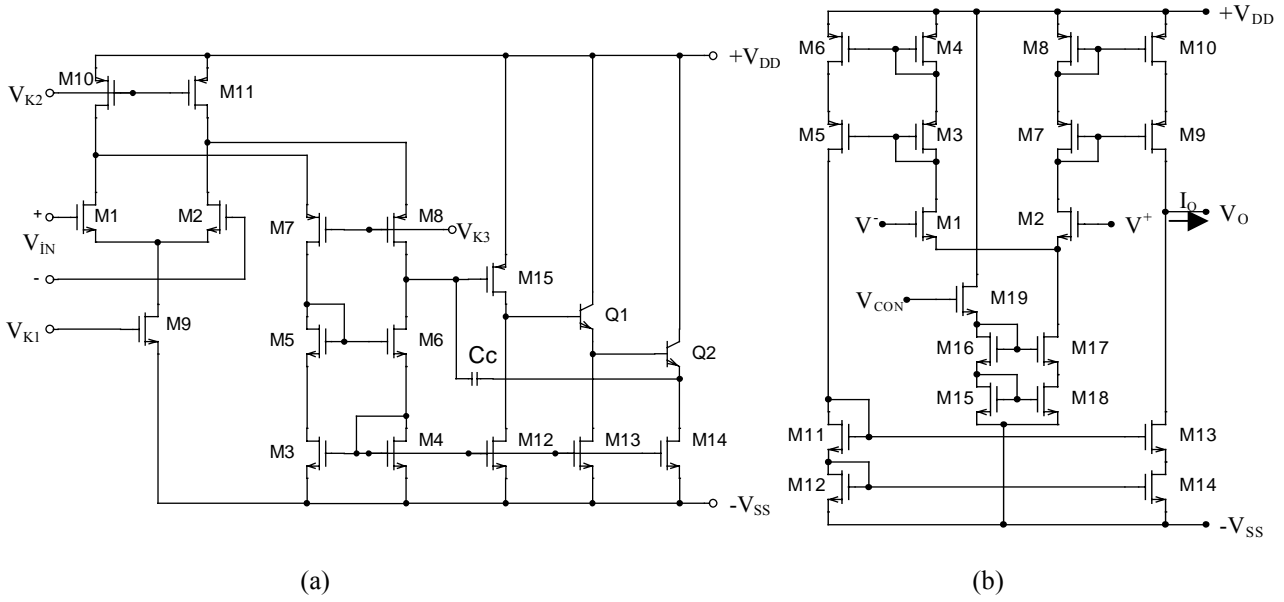
$$Q_{AG2} = \sqrt{\frac{g_{m2}}{g_{m1}}} = \sqrt{\frac{69.98\mu}{140.448\mu}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Yapılan analizler sonucunda, $\omega_{OAG1} \cong 2\pi(950 \times 10^3)$ rad/s ve $\omega_{OAG2} = 2\pi(464.159 \times 10^3)$ rad/s olarak elde edilmiştir.

Teorik olarak hesaplanan sonuçlar ile analiz sonuçları karşılaştırıldığında istenilen değerlere oldukça yaklaşıldığı görülmektedir.

Alçak geçiren süzgeçlerin ideal eşdeğerlerine ve tasarlanan OTA ve işlemsel kuvvetlendiricilerle gerçekleştirilen eşdeğerlerine ait simülasyon sonuçları Şekil-3 ve Şekil-4'de sunulmuştur. Her iki şekilden fark edilebileceği gibi, benzetim sonuçları teorik sonuçlarla iyi bir uyum içindedir.

Süzgeçlerin büyük işaret davranışlarını incelemek amacıyla, AG1 yapısında $f = 900$ kHz ve AG2 yapısında ise $f = 400$ kHz frekanslı giriş işaretleri uygulanmıştır. Çıkış işaretinde kabul edilebilir % 2'lik bir distorsiyon için giriş işaretinin alabileceği maksimum genlik değeri, AG1 yapısı için 500 mV ve AG2 yapısı için ise 100 mV olarak belirlenmiştir. Daha büyük giriş işaretleri için işlemsel kuvvetlendiricinin yükselme eğimi çıkışı sınırlanmakta ve distorsiyona neden olmaktadır. Daha büyük yükselme eğimine sahip işlemsel kuvvetlendirici kullanılarak, daha büyük çıkış gerilim değerleri elde edilebileceği açıkça görülmektedir.



Şekil-2. Benzetimlerde kullanılan a) CMOS işlemsel kuvvetlendirici , b) CMOS simetrik kaskod OTA

Tablo 1. SPICE Benzetimlerinde kullanılan NMOS, PMOS ve NPN transiztor parametreleri

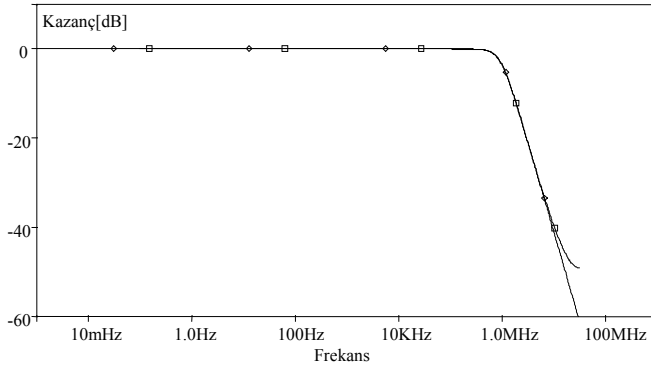
```
.model nb NMOS LEVEL=2 VTO=0.99 TOX=400E-10 NSUB=7E15 XJ=0.18U LD=0.341U
+UO=710 VMAX=1.5E5 DELTA=0.3 THETA=0.15 ETA=0.15 KAPPA=0.6 TPG=1 GAMMA=0.65
+NFS=2.4E11 CGSO=87P CGDO=87P CGBO=27.9P PB=0.6 CJ=1.78E-8 JS=8.2E-8 MJ=0.481
+CJSW=358P MJSW=0.218 LAMBDA=0.02
.model pb PMOS LEVEL=2 VTO=-0.8 TOX=400E-10 NSUB=4E15 XJ=0.21U LD=0.45U
+UO=300 VMAX=3E4 DELTA=0.75 THETA=0.4 ETA=0.15 KAPPA=1.5 TPG=-1 GAMMA=0.46
+NFS=1.68E11 CGSO=124P CGDO=0.124N CGBO=40.3P PB=0.6 CJ=1.83E-8 JS=3.46E-8
+MJ=-0.526 CJSW=229P MJSW=0.172 LAMBDA=0.01
.model n npn IS=0.524f XTI=3 EG=1.11 VAF=79.5 VAR=9.64 BF=384
+NE=1.94 NF=1.06 NR=1.005 ISE=83f IKF=0.025 XTB=1.5 BR=2.4 NC=1.22
+ISC=7.5f IKR=0.185m RC=1 CJC=0.56p MJC=0.475 VJC=0.85 FC=.5
+CJE=0.94p MJE=0.315 VJE=0.8 TR=0.3n TF=0.65n ITF=.6 VTF=1.7 XTF=3
+RB=10
```

Tablo 2. İşlemsel kuvvetlendirici yapısı için tranzistor boyutları

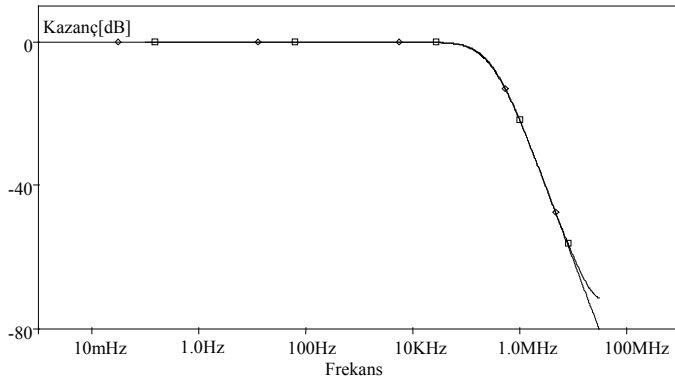
	W(μm)	L(μm)		W(μm)	L(μm)
M1	24	3	M9	100	3
M2	24	3	M10	100	3
M3	100	3	M11	100	3
M4	100	3	M12	100	3
M5	100	3	M13	100	3
M6	100	3	M14	100	3
M7	100	3	M15	220	3
M8	100	3			

Tablo 3 CMOS OTA için tranzistor boyutları

	W(μm)	L(μm)		W(μm)	L(μm)
M1	5	3	M11	5	3
M2	5	3	M12	5	3
M3	10	3	M13	5	3
M4	10	3	M14	5	3
M5	10	3	M15	5	3
M6	10	3	M16	5	3
M7	10	3	M17	5	3
M8	10	3	M18	5	3
M9	10	3	M19	5	3
M10	10	3			



Şekil-3. Şekil 1a'daki AG süzgeç için frekans eğrileri.



Şekil-4. Şekil 1b'deki AG süzgeç için frekans eğrileri.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, ortak-kaynak-ortak-geçitli kuvvetlendirici yapısı ile kurulan yüksek başarılı işlemsel kuvvetlendirici ve CMOS simetrik kaskod OTA yapılarından faydalanarak tasarlanan iki yeni aktif alçak geçiren süzgeç yapısı önerilmiştir.

Tasarlanan aktif alçak geçiren süzgeç yapılarının açılal band kesim frekansları (ω_0) ve kalite faktörleri (Q), doğrudan doğruya OTA'ların geçiş iletkenliği ve işlemsel kuvvetlendiricilerin kompanzasyon kapasitesi aracılığı ile ayarlanabilmektedir.

İşlemsel kuvvetlendiricinin birim kazanç-band genişliği kompanzasyon kapasitesi ile değiştirilebilmekte ve dolayısı ile alçak geçiren süzgeç yapılarının açılal band kesim frekansı, bu değişim aracılığı ile doğrudan ayarlanabilmektedir.

OTA'ların geçiş iletkenliği (g_m) ise dışardan bir gerilimle (tasarlanan CMOS simetrik kaskod OTA'da V_{con} gerilimi ile) değiştirilebilmekte, bu ise bütün

filtre parametrelerinin ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Tasarlanan süzgeç topolojileri, başka hiçbir pasif elemana ihtiyaç duymamaları ve daha az kırmık alanı kaplamaları bakımından bipolar ve CMOS teknolojilerindeki tümdevre gerçeklemeleri için uygundur.

Bütün bunlar dikkate alındığında, önerilen devrelerin tümdevre tasarımcısına haberleşme süzgeçlerinin gerçekleştirilmesinde yeni olanaklar sağlayacağı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Tsukutani, T., Ishida, M., Tsuiki, S., Fukui, Y., Current mode biquad without external passive elements, ELECTRONICS LETTERS, vol.32, no.3, pp.197-198, 1996.
- [2] Abuelma'atti, M. T. and Alzaher, H. A., Universal three inputs and one output current-mode filter without external passive elements, ELECTRONICS LETTERS, vol.33, no.4, pp.281-283, 1997.
- [3] Singh A. K. and Senani, R., Low-component-count active-only immittances and their application in realizing simple multifunction biquads, ELECTRONICS LETTERS, vol.34, no.8, pp.718-719, 1998.
- [4] Tarım N., Çiçekoğlu O., Kuntman, H., Active lowpass filters without external passive components realized with OTA and Op Amps, Proceedings of THE 44TH MIDWEST SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS (MWSCAS), pp.192-195, Dayton, Ohio, 2001.
- [5] Tarım N., Çiçekoğlu O., Kuntman, H., Novel voltage-mode structurely allpass filters without external passive components, JOURNAL OF COMPUTER AND ELECTRICAL ENGINEERING'e sunulmuştur, 2002.
- [6] Kuntman, H.H., Analog MOS tümdevre tekniği, İ.T.Ü Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 1997.
- [7] Kuntman, H.H., Analog tümdevre tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
- [8] Zeki, A., Novel high performance OTA structures suitable for continuous-time OTA-C filters, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.