



VDCC Tabanlı Elektronik Olarak Kontrol Edilebilir İkinci Dereceden Filtre

VDCC Based Electronical Controllable Second Order Filter

Hasan Sözen* 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

Öz

Analog devrelerde elektronik olarak ayarlanabilirlik özelliği, genellikle kullanılan aktif devre bloğunun terminallerinden birinin akım veya geriliminin harici bir kaynak kullanılarak ayarlanabilmesi ile sağlanır. Gerilim farkı alan akım taşıyıcı (Voltage Differencing Current Conveyor), geçiş iletkenliği kazancı sayesinde kullanıldığı devreye elektronik olarak ayarlanabilirlik özelliği kazandırır. Bu çalışmada, çok girişli çok çıkışlı (Multi Input Multi Output) gerilim farkı alan akım taşıyıcı tabanlı ikinci dereceden filtre devresi önerilmiştir. Önerilen devre mümkün olan en az sayıda eleman kullanılarak tasarlanmıştır. Önerilen devrede bir direnç, iki kondansatör ve bir gerilim farkı alan akım taşıyıcı elemanı kullanılmıştır. Bu devre alçak geçiren (Low Pass), yüksek geçiren (High Pass) ve bant geçiren (Band Pass) filtre fonksiyonlarını gerçekleştirmektedir. PSPICE benzetim programında gerilim farkı alan akım taşıyıcı bloğu için TSMC 0.18 μm CMOS işlem parametreleri kullanılarak önerilen filtre devresinin çalışması incelenmiştir. Teorik analizler ve PSPICE benzetim sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen devrenin uygulanabilirliğini değerlendirmek için Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonic Distortion) analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gerilim modlu filtre, gerilim farkı alan akım taşıyıcı (VDCC), ikinci dereceden filtre.

Abstract

In analog circuits generally electronical controllability is provided by adjusting current or voltage of the terminal of used active building block through an external source. Voltage differencing current conveyor provides electronical controllability through its transconductance gain. In this study, multi-input multi-output voltage differencing current conveyor based biquadratic filter is proposed. The proposed circuit is designed by using minimum components. It uses only one capacitor and two resistors and one voltage differencing current conveyor. It realizes low-pass, high-pass and band-pass filter functions. TSMC 0.18 μm CMOS process parameters are used to realize voltage differencing current conveyor and investigate the proposed circuit in PSPICE program. It is observed that theoretical analyses and simulation results are closely to each other. Total harmonic distortion analyses are performed to assess the feasibility of the presented circuit.

Keywords: Voltage-mode filter, voltage differencing current conveyor (VDCC), second-order filter.

1. Giriş

Bilindiği gibi analog filtreler birçok alanda; osilatörler, haberleşme sistemleri vs. kullanılabilen temel devrelerden bir tanesidir. Analog filtreler, pasif ve aktif olmak üzere iki farklı yapıdadır. Aktif devre blokları kullanılarak tasarlanmış filtre devreleri aktif filtreler olarak tanımlanır. Ayrıca analog filtreler, giriş ve çıkış terminallerindeki sinyallere göre

gerilim modlu ve akım modlu olarak da sınıflandırılabilir. Literatürde farklı aktif devre elemanları kullanan birçok gerilim modlu (Abuelma'atti ve Al-Shahrani 1996, Alpaslan ve Yüce 2020, Doğan ve Yüce 2024, Hassan ve Mahmoud 2010, Horng 2012, Horng vd. 2006a-b, Lee 2010, Liu ve Lee 1997, Minaei ve İbrahim 2009, Minaei ve Yüce 2010, M. Soliman 2008, Nikoloudis ve Psychalinos 2010, Shah ve Iqbal 2005, Singh vd. 2006, Yüce 2010, Yüce vd. 2016) ve akım modlu (Jaikla vd. 2012, Kaçar vd. 2012, Li 2014, Prasad vd. 2009, Rehman Nasir ve Ahmad 2012, Sağbaşı ve Fidanboyulu 2004, Satansup ve Tangsrirat 2014, Shah vd. 2007, Siripruchyanun ve Jaikla 2010, Tangsrirat ve Prasertsom 2007) analog filtre devresi önerilmiştir.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hasan.sozen@cbu.edu.tr

Hasan Sözen  orcid.org/0000-0002-0783-5276



Bu eser "Creative Commons Atıf-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

Gerilim farkı alan akım taşıyıcı (Voltage Differencing Current Conveyor, VDCC) elemanı, Biolek ve çalışma arkadaşları tarafından 2008 yılında önerilmiştir (Biolek vd. 2008). Bu eleman bir işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (Operational Transconductance Amplifier, OTA) ve bir ikinci nesil akım taşıyıcı (Second Generation Current Conveyor, CCII) elemanının birlikte kullanılması sonucu elde edilmiştir. VDCC elemanının OTA elemanı barındırması nedeni ile elektronik olarak kontrol edilebilen geçiş iletkenliği kazancı (g_m), bu elemanın geniş kullanım alanı bulmasını neden olmuştur.

Literatürde önerilen VDCC tabanlı analog filtreler bazı olumsuz nitelikler barındırmaktadır;

Bazı çalışmalarda önerilen filtre fonksiyonlarını gerçekleştirebilmek için kullanılan devre elemanlarından bazıları arasında eşleştirme zorunluluğu gerekir (Arora vd. 2019, Gupta ve Arora 2018, Roy vd. 2021, Uttaphut 2018). Tasarlanan devrelerin parametreleri elektronik olarak kontrol edilme özelliğinden yoksundur (Kaçar vd. 2015, Lamun vd. 2015, Uttaphut 2018). Önerilen devreler birden fazla aktif devre bloğu ile gerçekleştirildiğinden alan işgali ve enerji tüketimi fazladır (Arora vd. 2019, Gupta vd. 2019, Gupta ve Arora 2018, Jain ve Kumar 2016, Kumar vd. 2018, Rana vd. 2016, Sotner vd. 2015).

Önerilen devre literatürdeki diğer bazı devrelere göre şu avantajlara sahiptir:

- 1) Tek bir aktif eleman kullandığından dolayı, birden çok aktif eleman kullanan filtre devrelerine kıyasla (Abuelma'atti ve Al-Shahrani 1996, Alpaslan ve Yüce 2020, Doğan ve Yüce 2024, Hassan ve Mahmoud 2010, Horng vd. 2006a, Horng vd. 2006b, Lee 2010, Liu ve Lee 1997, Nikoloudis ve Psychalinos 2010, Minaei ve Ibrahim 2009, Minaei ve Yüce 2010, Shah ve Iqbal 2005, Singh vd. 2006, Yüce vd. 2016, Yüce 2010) entegre devre olarak gerçekleştirildiğinde daha küçük alan kaplar.
- 2) Önerilen filtre fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde, literatürdeki bazı filtre devrelerinin aksine (Abuelma'atti ve Al-Shahrani 1996, Doğan ve Yüce 2024, Horng 2012, Liu ve Lee 1997, Nikoloudis ve Psychalinos 2010, Shah ve Iqbal 2005, Singh vd. 2006, Yüce 2016) devrede kullanılan pasif devre elemanları arasında herhangi bir eşleme olmasına gerek yoktur. Bu sayede önerilen devre hem tasarım kolaylığı, hem uygulama güvenilirliği açısından üstündür. Eleman eşleme ihtiyacının olmaması devrenin kararlı çalışabileceğinin de göstergesidir.

Bu çalışmada gerilim modlu çok girişli çok çıkışlı (Multi Input Multi Output, MIMO) VDCC tabanlı ikinci dereceden aktif filtre devresi önerilmiştir. Bu devreye ait teorik analizler kullanılan VDCC elemanının hem ideal hem de ideal olmayan kazanç etkileri dikkate alınarak elde edilmiştir. PSPICE benzetim programı ile teorik analizlerin doğruluğu ispatlanmıştır. Bu çalışmanın organizasyonu şu şekildedir: Bölüm 2 de kullanılan VDCC elemanı tanıtılmıştır. Önerilen devre yapısı Bölüm 3'te anlatılmıştır. Bölüm 4 önerilen devreye ait ideal olmayan terimlerin devre üzerindeki etkisi incelenmiştir. PSPICE benzetim sonuçları Bölüm 5'te verilmiştir. Bölüm 6'da ise çalışmaya ait sonuçlar özetlenmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. VDCC Elemanı

Biolek ve arkadaşları tarafından önerilen (Biolek vd. 2008) VDCC elemanına ait devre sembolü Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu aktif devre bloğu ikisi (P ve N) giriş, diğerleri (Z, X, W_p , W_n) ise çıkış olmak üzere altı adet terminale sahiptir. X terminali hariç, diğer tüm terminaller yüksek empedansa sahiptir. Aşağıdaki matris denkleminde VDCC elemanına ait ideal olmayan gerilim ve akım kazançlarını da içeren terminal ilişkileri verilmiştir (Kaçar vd. 2014).

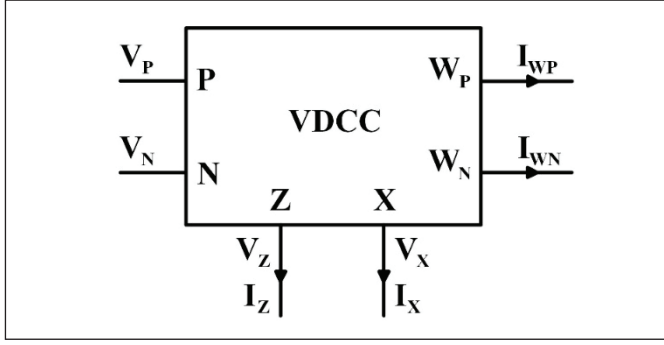
$$\begin{bmatrix} I_N \\ I_P \\ I_Z \\ V_Z \\ I_{W_p} \\ I_{W_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha g_m & -\alpha g_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{W_p} \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma_{W_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_x \\ I_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

burada α , β ve γ ideal olmayan gerilim ve akım kazançlarını temsil eder. İdeal durumda bu kazançlar 1'e eşittir. Yukarıdaki matris denklemindeki g_m ise VDCC elemanına ait geçiş iletkenliği kazancını temsil eder. Bu parametreye ilişkin denklem aşağıda verilmiştir.

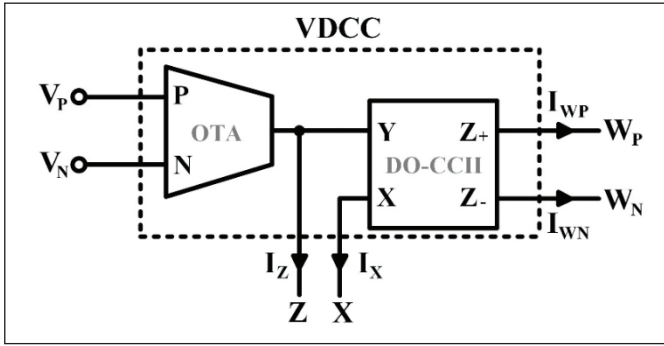
$$g_m = \sqrt{I_{Bl} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)} \quad (2)$$

burada μ_n NMOS transistörler için taşıyıcı hareketliliğini, C_{ox} birim alan başına kapı oksit kapasitansı, W kanal genişliğini, L kanal uzunluğunu ve I_{Bl} kutuplama akımını temsil eder.

Şekil 2'de açıkça görüldüğü gibi VDCC elemanı bir OTA ve bir CCII elemanından oluşmaktadır. OTA elemanının kutuplama akımına bağlı olarak değişen g_m parametresi, VDCC kullanılarak tasarlanan devrelerin parametrelerinin



Şekil 1. VDCC elemanına ait devre sembolü.



Şekil 2. VDCC elemanına ait blok diyagramı.

elektronik olarak kontrol edilebilmesine imkan sağlar. Ayrıca VDCC elemanı hem gerilim hem de akım modlu devrelerde kullanılabilir.

2.2. Önerilen İkinci Dereceden Filtre Devresi

Şekil 3'te önerilen VDCC tabanlı ikinci dereceden filtre devresi gösterilmiştir. Bu devrede pasif devre elemanı olarak bir kondansatör ve iki direnç kullanılmıştır. Açıkça görüleceği üzere önerilen devre ikinci dereceden filtre fonksiyonunu mümkün olan en az pasif devre elemanı kullanarak gerçekleştirmektedir. Ayrıca kullanılan elemanların iki tanesi topraklanmış durumdadır. Bu durum devrenin tümleşik olarak gerçekleşmesini kolaylaştırmaktadır. Önerilen devre iki giriş-iki çıkışa sahiptir. Dolayısıyla bu devre MIMO devre olarak tanımlanabilir. Bu devre, alçak geçiren (Low Pass, LP), yüksek geçiren (High Pass, HP) ve alçak geçiren (Band Pass, BP) filtre fonksiyonlarını gerçekleştirmektedir. Devredeki her bir çıkış gerilim ifadesi giriş gerilimleri cinsinden aşağıdaki gibi elde edilmiştir. İfadeler elde edilirken $G = \frac{1}{R}$ olarak alınmıştır.

$$V_{c1} = \frac{V_2 s^2 C_1 C_2 + V_1 g_m G}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_m + g_m G} \quad (3)$$

$$V_{c2} = \frac{G[V_1(g_m + sC_1) - V_2 sC_1]}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_m + g_m G} \quad (4)$$

Yukarıda elde edilen ifadelerin payda kısmından devrenin açılmal kesim frekansı (ω_0) ve kalite faktörü (Q) aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Bu devre parametrelerinin VDCC elemanına ait g_m parametresi aracılığıyla elektronik olarak kontrol edilebildiği açıktır. Bu sayede devre parametrelerinin, devrede kullanılan pasif eleman(lar)ın değerini değiştirmeden ayarlanabilmesini mümkün kılar.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_m G}{C_1 C_2}} \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{\frac{G C_1}{g_m C_2}} \quad (6)$$

Çizelge 1'de devrenin gerçekleştireceği filtre fonksiyonuna göre giriş gerilimlerinin durumu ve çıkış terminalinin seçimi ve filtrelerin genlik kazancı gösterilmiştir. Ayrıca, ω_0 ve Q parametreleriyle ilgili pasif ve aktif bağıl duyarlılıklar da elde edilmiştir.

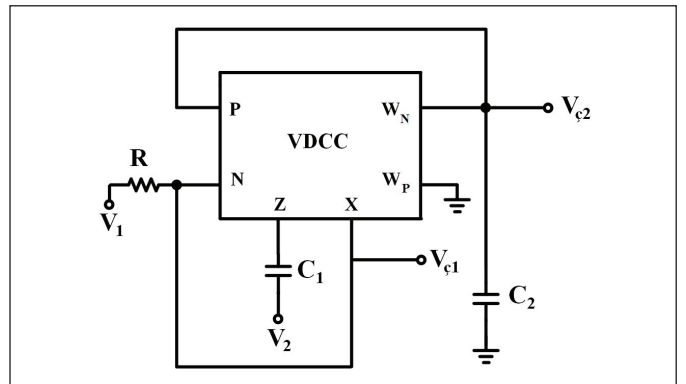
$$S_G^{\omega_0} = -S_{C_1}^{\omega_0} = -S_{C_2}^{\omega_0} = S_{g_m}^{\omega_0} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

$$S_G^Q = S_{C_1}^Q = -S_{C_2}^Q = -S_{g_m}^Q = \frac{1}{2} \quad (8)$$

Yukarıda ifadelerden açıkça görüldüğü üzere elde edilen pasif ve aktif bağıl duyarlılıkların mutlak genliği 1'den küçüktür. Pasif ve aktif bağıl duyarlılıkların 1'den düşük çıkması, önerilen filtrenin devredeki bileşen toleranslarının, sıcaklık değişiminin ve devrede kullanılan elemanların üretim farklılığının devrenin çalışmasını en az seviyede etkileyeceğini göstermektedir.

2.3. VDCC Elemanındaki İdeal Olmayan Kazançların Önerilen Devre Üzerindeki Etkisi

VDCC elemanına ait terminal ilişkilerinde ideal olmayan gerilim ve akım kazançları (α , β , γ) Denklem (1)'de gösterilmiştir. İdeal olmayan bu etkilerin devre davranışına etkisi incelenmiştir. Önerilen devrenin ω_0 ve Q parametreleri ide-



Şekil 3. VDCC tabanlı ikinci dereceden filtre devresi.

Çizelge 1. Gerçekleştirilecek filtre fonksiyonuna göre giriş gerilimi ve çıkış terminalinin durumu.

V_1	V_2	Çıkış Terminali	Filtre Fonksiyonu	Kazanç
0	$V_{giriş}$	$V_{ç1}$	HP	1
0	$V_{giriş}$	$V_{ç2}$	BP	$\left(-\frac{GC_1}{g_m C_2}\right)$
$V_{giriş}$	$V_{giriş}$	$V_{ç2}$	LP	1

al olmayan gerilim ve akım kazançları dikkate alınarak ω'_0 ve Q' olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{g_m \alpha G \gamma W_N}{C_1 C_2 \beta}} \quad (9)$$

$$Q' = \sqrt{\frac{\beta \gamma W_N C_1 G}{\alpha g_m C_2}} \quad (10)$$

VDCC elemanının ideal olmayan gerilim ve akım kazançları dikkate alındığında elde edilen ve parametrelerine ait aktif ve pasif duyarlılıklar aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Elde edilen ifadelerden açıkça görüldüğü üzere pasif ve aktif bağlı duyarlılıkların mutlak genliği 1'den küçüktür.

$$S_G^{\omega_0} = -S_{C_1}^{\omega_0} = -S_{C_2}^{\omega_0} = S_{g_m}^{\omega_0} = S_{\gamma W_N}^{\omega_0} = S_{\alpha}^{\omega_0} = -S_{\beta}^{\omega_0} = \frac{1}{2} \quad (11)$$

$$S_G^{Q'} = S_{C_1}^{Q'} = -S_{C_2}^{Q'} = -S_{g_m}^{Q'} = -S_{\gamma W_N}^{Q'} = -S_{\alpha}^{Q'} = S_{\beta}^{Q'} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

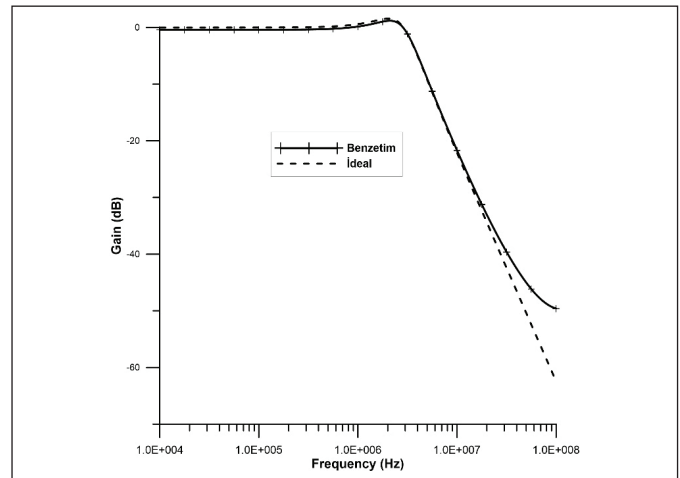
3. Bulgular ve Tartışma

Önerilen devrenin benzetim sonuçları PSPICE programı kullanılarak elde edilmiştir. VDCC elemanının CMOS gerçeklemesi kullanılmıştır (Kaçar vd. 2014). CMOS gerçeklemesindeki W/L boyutları aynı çalışmadan alınmıştır. Devrede kullanılan besleme gerilimleri $V_{DD} = -V_{SS} = 0.9$ V ve kutuplama akımları $I_{B1} = 50$ μ A, $I_{B2} = 100$ μ A olarak seçilmiştir. Seçilen kutuplama akımının değeri g_m parametresini 280 μ A/V olarak ölçmemize neden olmuştur. Devrenin girişine uygulanan gerilimlerin genliği 100 mV olarak seçilmiştir. Devrede kullanılan direnç ve kondansatör değerleri ise sırasıyla $R = 5$ K Ω , $C_1 = 17$ pF, $C_2 = 11$ pF olarak seçilmiştir. Kullanılan pasif devre elemanlarının değerleri ile yukarıda bahsedilen akım ve gerilimlerin değerleri farklı değerlerde de seçilebilir. Bu değerlerin seçimi g_m parametresini ve f_o ve Q değerlerinin teorik hesabını değiştirecektir. Yukarıdaki pasif devre elemanları ile akım değerlerinin neticesinde f_o ve Q değerleri teorik olarak 2.75 MHz ve 1.11 şeklinde hesaplanmıştır. PSPICE benzetimleri sonucunda f_o ve Q değerleri 2.81 MHz ve 1,05 şeklinde ölçülmüştür. Teorik ve benzetim sonuçları arasında f_o ve Q için sırasıyla % 2.5 ve %5 fark

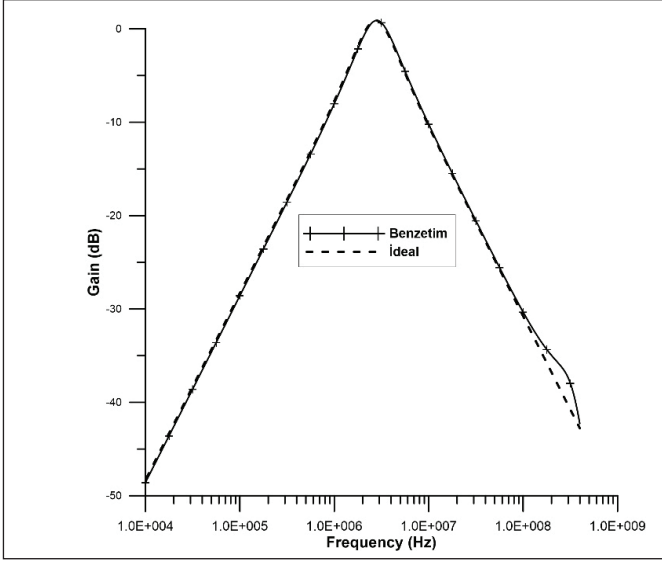
olduğu hesaplanmıştır. Bu farkın kabul edilebilir derecede olduğu görülmüştür.

Önerilen devre için LP, BP ve HP filtre fonksiyonları için frekans cevabı hem teorik hem de benzetim programı kullanılarak sırasıyla Şekil 4-6'da gösterilmiştir. Bu şekillerdeki sonuçlardan açıkça görüldüğü gibi teorik sonuçlar ve benzetim programı sonuçları oldukça yakın çıkmıştır. Bu durum önerilen devre performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Çalışmanın başında da ifade edildiği gibi aktif eleman olarak kullanılan VDCC elemanının g_m parametresi elektronik olarak değiştirilebildiği için önerilen devre parametreleri de elektronik olarak kontrol edilebilmektedir. Devre parametrelerinin elektronik olarak kontrol edilebildiğini göstermek için g_m parametresi değiştirilerek BP filtresinin frekans cevabının davranışı gözlemlenmiştir. Denklem (5) ve (6)'dan açıkça görüldüğü üzere devrenin ve parametreleri g_m ile sırasıyla doğru ve ters orantılı olarak değişmektedir. Farklı g_m parametresi için BP filtresinin benzetim sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere g_m parametresi küçüldükçe artmakta, ise azalmaktadır. Ayrıca, Çizelge 1'de de görüldüğü gibi BP filtrenin kazancı g_m ile ters orantılıdır. Bu nedenle Şekil 7'de g_m küçüldükçe filtrenin kazancı artmaktadır.

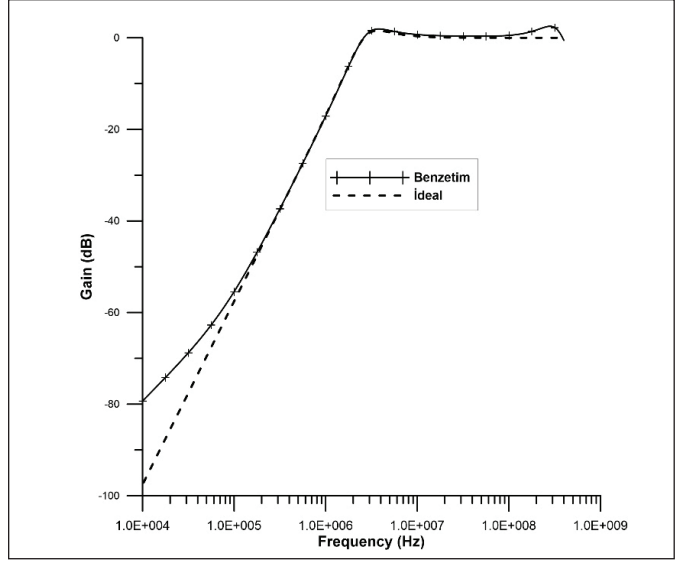
THD analizi devrelerin doğrusallığının incelenmesi için önemlidir. Önerilen bant geçiren filtre için THD analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'den de anlaşılabacağı üzere THD değerinin giriş gerilim genliğinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. THD değeri 570 mV_{tepe-tepe} giriş gerilimi değerine kadar %3'ün altında kalmaktadır. Bu değer, önerilen filtre devresinde sinyal bütünlüğünün korunduğunu, bozulmanın oldukça düşük seviyelerde olduğunu ve devrenin pra-



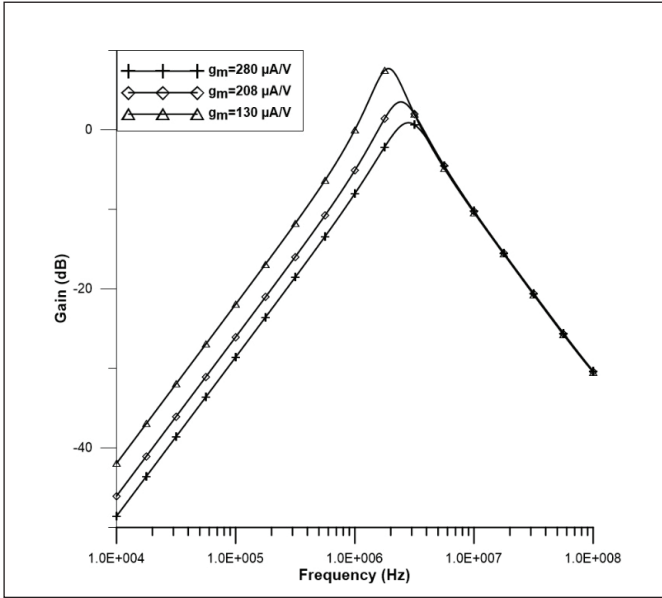
Şekil 4. Önerilen LP filtre devresinin frekans cevabına ilişkin teorik ve benzetim sonuçları.



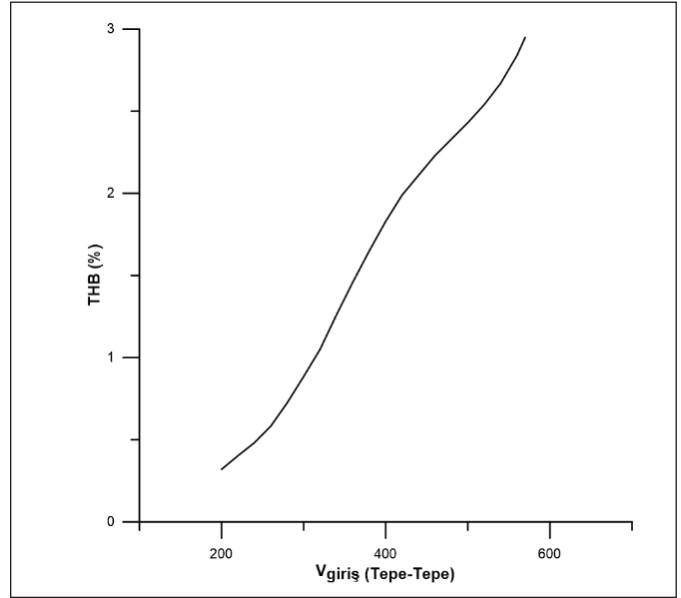
Şekil 5. Önerilen BP filtre devresinin frekans cevabına ilişkin teorik ve benzetim sonuçları.



Şekil 6. Önerilen HP filtre devresinin frekans cevabına ilişkin teorik ve benzetim sonuçları.



Şekil 7. Önerilen devrenin farklı g_m değerleri için frekans cevabına ilişkin benzetim sonuçları.



Şekil 8. Önerilen BP filtresi için giriş geriliminin artışına göre THD değişimi.

tik uygulamalar için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bu değerin elde edilmesi, devredeki aktif eleman bloğu ve pasif devre eleman değerlerinin uygun seçildiğinin göstergesidir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada gerilim modlu MIMO yapıya sahip ikinci dereceden filtre devresi önerilmiştir. Bu devre; BP, LP ve HP filtre fonksiyonlarını herhangi bir eleman eşleme gereksini-

mi olmadan gerçekleştirmektedir. Ancak devrede kullanılan tüm pasif elemanlar topraklanmış değildir. Önerilen devrede besleme gerilimi olarak ± 0.9 V kullanılmıştır. Önerilen dereye ait güç tüketimi 1.75 mW olup oldukça düşüktür. Bu nedenle önerilen devrenin düşük güç tüketimi gerektiren devrelerde kullanımı uygundur. Önerilen devrenin kesim frekansı devrede kullanılan pasif devre elemanlarının değerleri sonucunda 2.75 MHz olarak belirlenmiştir. Bu devreye ait f_o ve Q parametreleri VDCC elemanının g_m parametresi

sayesinde elektronik olarak ayarlanabilmektedir. Önerilen devre için teorik analizler VDCC elemanının hem ideal hem de ideal olmayan kazanç etkileri dikkate alınarak elde edilmiştir. Her iki durumda da devredeki bağlı duyarlılıkların 1'den küçük olduğu gösterilmiştir. Devreye ait teorik analizler PSPICE benzetim programı sonuçları ile doğrulanmıştır. Ayrıca devrenin kabul edilebilir bir THD değer aralığına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5. Kaynaklar

- Abuelma'atti, MT., Al-Shahrani, SM. 1996.** New universal filter using two current-feedback amplifiers. *International Journal of Electronics*, 80(6): 753–756. Doi:10.1080/002072196137039
- Alpaslan, H., Yuce, E. 2020.** DVCC+ based multifunction and universal filters with the high input impedance features. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 103(2): 325–335. Doi:10.1007/s10470-020-01643-8
- Arora, TS., Rohil, B., Gupta, S. 2019.** Fully Integrable/Cascadable CM Universal Filter and CM Quadrature Oscillator Using VDCC and Only Grounded Passive Elements. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 28(11): 1950181. Doi:10.1142/S0218126619501810
- Biolek, D., Senani, R., Biolkova, V., Kolka, Z. 2008.** Active elements for analog signal processing: Classification, review, and new proposals. *Radioengineering*, 17(4): 15–32. Scopus.
- Doğan, M., Yuce, E. 2024.** A voltage-mode fully cascadable biquad with three CFOAs and grounded capacitors. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 185, 155430. Doi:10.1016/j.aeue.2024.155430
- Gupta, M., Arora, TS. 2018.** Realization of Current Mode Universal Filter and a Dual-Mode Single Resistance Controlled Quadrature Oscillator Employing VDCC and Only Grounded Passive Elements. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 15 (5), 833–845. Doi:10.15598/aece.v15i5.2397
- Gupta, M., Dogra, P., Arora, TS. 2019.** Novel current mode universal filter and dual-mode quadrature oscillator using VDCC and all grounded passive elements. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 16(4): 220–236. Doi:10.1080/1448837X.2019.1648134
- Hassan, TM., Mahmoud, SA. 2010.** New CMOS DVCC realization and applications to instrumentation amplifier and active-RC filters. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 64(1):47–55. Doi:10.1016/j.aeue.2008.11.002
- Horng, JW. 2012.** Voltage-mode multifunction biquadratic filter employing single DVCC. *International Journal of Electronics*, 99(2):153–162. Doi:10.1080/00207217.2011.623268
- Horng, JW., Hou, CL., Chang, CM., Chung, WY. 2006a.** Voltage-Mode Universal Biquadratic Filters with One Input and Five Outputs. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 47(1):73–83. Doi:10.1007/s10470-006-2224-2
- Horng, JW., Kaewpoonsuk, CL., Chang, CM., Chou, HP., Lin, CT. 2006b.** High Input Impedance Voltage-Mode Universal Biquadratic Filter with One Input and Five Outputs Using Current Conveyors. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 25(6):767–777. Doi:10.1007/s00034-005-1227-z
- Jaikla, W., Siripongdee, S., Suwanjan, P. 2012.** MISO Current-mode Biquad Filter with Independent Control of Pole Frequency and Quality Factor. *Radioengineering*, 21(3): 886–891. Scopus.
- Jain, R., Kumar, P. 2016.** VDCC based voltage mode Tow-Thomas biquad filter. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 1–4. Doi:10.1109/ICPEICES.2016.7853464
- Kaçar, F., Yeşil, A., Kuntman, H. 2012.** Current-Mode Biquad Filters Employing Single FDCCII. *Radioengineering*, 21(4): 1269–1278. Scopus.
- Kaçar, F., Yeşil, 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. Doi:10.1016/j.aeue.2013.08.020
- Kaçar, F., Yeşil, A., Gürkan, K. 2015.** Design and experiment of VDCC-based voltage mode universal filter. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 53(5):341–349. Scopus.
- Kumar, S., Dhingra, G., Kumar, P. 2018.** Variable Transconductance Voltage Differencing Current Conveyor and its Application in Filter Design. 2018 New Generation of CAS (NGCAS), 5–8. Doi:10.1109/NGCAS.2018.8572167
- Lamun, P., Phatsornsiri, P., Torteanchai, U. 2015.** Single VDCC-based current-mode universal biquadratic filter. 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 122–125. Doi:10.1109/ICITEE.2015.7408926
- Lee, CN. 2010.** Multiple-Mode OTA-C Universal Biquad Filters. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 29(2):263–274. Doi:10.1007/s00034-009-9145-0
- Liu, SI., Lee, JL. 1997.** Voltage-mode universal filters using two current conveyors. *International Journal of Electronics*, 82(2): 145–150. Doi:10.1080/002072197136147
- Li, YA. 2014.** Electronically tunable current-mode biquadratic filter and four-phase quadrature oscillator. *Microelectronics Journal*, 45(3):330–335. Doi:10.1016/j.mejo.2013.12.005

- Minaei, S., Ibrahim, MA. 2009.** A mixed-mode KHN-biquad using DVCC and grounded passive elements suitable for direct cascading. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 37(7):793-810. Doi:10.1002/cta.493
- Minaei, S., Yuce, E. 2010.** All-Grounded Passive Elements Voltage-Mode DVCC-Based Universal Filters. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 29(2):295-309. Doi:10.1007/s00034-009-9136-1
- Nikoloudis, S., Psychalinos, C. 2010.** Multiple Input Single Output Universal Biquad Filter with Current Feedback Operational Amplifiers. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 29(6):1167-1180. Doi:10.1007/s00034-010-9194-4
- Prasad, D., Bhaskar, DR., Singh, AK. 2009.** Universal current-mode biquad filter using dual output current differencing transconductance amplifier. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 63(6):497-501. Doi:10.1016/j.aeue.2008.02.012
- Rana, S., Kumawat, AK., Kumar, P. 2016.** A universal current mode KHN biquad filter using voltage differencing current conveyor. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 1-5. Doi:10.1109/ICPEICES.2016.7853506
- Rehman Nasir, A., Ahmad, SN. 2012.** CDTAs based Current-Mode Multifunction Filter Employing Grounded Capacitors. *International Journal of Computer Applications*, 43(10):17-19. Doi:10.5120/6139-8383
- Roy, S., Paul, TK., Maiti, S., Pal, RR. 2021.** Voltage Differencing Current Conveyor Based Voltage-Mode and Current-Mode Universal Biquad Filters with Electronic Tuning Facility. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 11(2): 146-160. Doi:10.46604/ijeti.2021.6821
- Sagbaş, M., Fidanboyulu, K. 2004.** Electronically tunable current-mode second-order universal filter using minimum elements. *Electronics Letters*, 40(1):2-4. Doi:10.1049/el:20040013
- Satansup, J., Tangsrirat, W. 2014.** Compact VDTA-based current-mode electronically tunable universal filters using grounded capacitors. *Microelectronics Journal*, 45(6):613-618. Doi:10.1016/j.mejo.2014.04.008
- Shah, NA., Iqbal, SZ. 2005.** Rather, M.F.: Versatile voltage-mode CFA-based universal filter. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 59(3): 192-194. Doi:10.1016/j.aeue.2004.11.037
- Shah, NA., Quadri, M., Iqbal, SZ. 2007.** Current-mode multifunction filter using current differencing transconductance amplifier. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 45(9): 767-769.
- Singh, VK., Singh, AK., Bhaskar, DR., Senani, R. 2006.** New Universal Biquads Employing CFOAs. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 53(11): 1299-1303. Doi:10.1109/TCSII.2006.882345
- Siripruchyanun, M., Jaikla, W. 2010.** Current-mode biquadratic filter using DO-CCDDBAs. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 38(3):321-330. Doi:10.1002/cta.556
- Soliman, AM. 2008.** The inverting second generation current conveyors as universal building blocks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 62(2):114-121. Doi:10.1016/j.aeue.2007.03.006
- Sotner, R., Herencsar, N., Jerabek, J., Vrba, K., Dostal, T., Jaikla, W., Metin, B. 2015.** Novel first-order all-pass filter applications of z-copy voltage differencing current conveyor. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 53(8): 537-545.
- Tangsrirat, W., Prasertsom, D. 2007.** Electronically tunable low-component-count current-mode biquadratic filter using dual-output current followers. *Electrical Engineering*, 90(1):33-37. Doi:10.1007/s00202-006-0051-1
- Uttaphut, P. 2018.** Simple Three-Input Single-Output Current-Mode Universal Filter Using Single VDCC. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(6):4932. Doi:10.11591/ijece.v8i6.pp4932-4940
- Yüce, E. 2010.** A novel floating simulation topology composed of only grounded passive components. *International Journal of Electronics*, 97(3):249-262. Doi:10.1080/00207210903061907
- Yüce, E., Tokat, S., Yucel, F. 2016.** A new wideband electronically tunable grounded resistor employing only three MOS transistors. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24:2442-2453. Doi:10.3906/elk-1403-12