



## MCBTA AKTİF ELEMANI KULLANILARAK AKIM MODLU DİKGİN SİNÜSOİDAL OSİLATÖR DEVRESİ TASARIMI

Umut Engin AYTEN\*

Yıldız Teknik, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Dikgen Sinüsoidal Osilatör Devresi, Değiştirilmiş Akım Geriyönlü Geçiş-iletkenliği Kuvvetlendiricisi, Aktif Devreler, Analog Tümdevreler, Akım Modlu Devreler.*

### Öz

Bu çalışmada, Değiştirilmiş Akım Geriyönlü Geçiş-iletkenliği Kuvvetlendiricisi (Modified Current Backward Transconductance Amplifier-MCBTA) aktif elemanı kullanılarak yeni bir akım modlu dikgen sinüsoidal osilatör (quadrature sinusoidal oscillator) devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen dikgen sinüsoidal osilatör devresi iki adet MCBTA, iki adet bir ucu topraklı kapasite elemanı ve bir adet bir ucu topraklı direnç elemanından oluşmaktadır. Önerilen devrenin akım çıkış uçları yüksek çıkış empedansına sahiptir ve ard arda bağlanmaya uygun yapıdadır. Osilasyon şartı bir direnç elemanı ile ve/veya MCBTA aktif elemanının geçiş iletkenliği parametresi ( $g_m$ ) ile kontrol edilebilmektedir. Önerilen devrenin doğruluğu PSPICE simülasyonları gerçekleştirilerek gösterilmiştir. MCBTA aktif elemanının CMOS gerçekleştirilmesi TSMC 0.25  $\mu$ m üretim parametreleri için gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

## CURRENT MODE QUADRATURE OSCILLATOR CIRCUIT DESIGN USING MCBTA ACTIVE COMPONENT

### Keywords

*Quadrature Sinusoidal Oscillator Circuit, Modified Current Backward Transconductance Amplifier, Active Networks, Analog Integrated Circuits, Current-Mode Circuits.*

### Abstract

In this study, a new current-mode quadrature sinusoidal oscillator circuit using modified current backward transconductance amplifier (MCBTA) are introduced. A new quadrature sinusoidal oscillator circuit employs two MCBTAs, two grounded capacitors and one grounded resistor. The current outputs of the proposed circuit provide high-frequency sinusoidal oscillation in quadrature at high impedance current output terminals of the MCBTAs. The oscillation condition of the proposed quadrature oscillator is controlled by one resistor and/or ( $g_m$ ) transconductance value of MCBTAs. The validity of the proposed circuits is verified PSPICE simulations. CMOS implementation of the MCBTA is performed for TSMC 0.25  $\mu$ m process parameters and simulation results are obtained.

### Alıntı / Cite

Ayten U. E., (2018). Current Mode Quadrature Oscillator Circuit Design Using MCBTA Active Component, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(1), 130-138.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Umut Engin AYTEN, 0000-0003-4174-1799

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	05.01.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	21.03.2018
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	25.03.2018
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	29.03.2018

### 1. Giriş

Dikgen sinüsoidal osilatör devreleri 90° faz farklı iki adet sinüsoidal çıkış fonksiyonu sağladıkları için özellikle haberleşme sistemlerinde, karıştırıcı (mixer) devrelerinde, tek yan-bant ve vektör üreteçleri

devrelerinde kullanılmaktadır (Horng, 2002). Bu devreler genelde gerilim modlu olacak şekilde tasarlanmaktadır (Abaci ve Yuçe, 2017; Yesil vd., 2017; Keskin vd., 2006; Cakir vd., 2005; Toker vd., 2001). Fakat akım modlu yapıların avantajları ile birlikte akım girişli ve akım çıkışlı devre

\* İlgili yazar / Corresponding author: ayten@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5885

yapılarının tasarımları da artmıştır ve dikgen osilatör devrelerinde de akım modlu olacak şekilde literatürde çeşitli tasarımlar sunulmuştur (Kumari ve Gupta, 2017; Maheshwari ve Agrawal, 2017; Abuelma'atti, 2017; Thitimahatthanagusol vd., 2017; Jantakun ve Jaikla, 2015; Summart vd., 2015; Jin ve Wang, 2014; Ngiamvibool ve Jantakun, 2014; Lahiri, 2012; Jin ve Wang, 2012; Abdalla vd., 2012; Biolek vd., 2011; Prasad vd., 2011; Herencsar vd., 2012; Tangsrirat ve Tanjaroen, 2010; Fabre ve Longuemard, 1990; Abuelma'atti, 1992).

Akım Taşıyıcı (Current Conveyor-CC) ve İşlemsel Geçiş-iletkenliği Kuvvetlendiricisi (Operational Transconductance Amplifier-OTA) tabanlı çeşitli aktif elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen dikgen sinüsoidal osilatör devreleri literatürde mevcuttur. Literatürdeki bu devrelerin çeşitli dezavantajları bulunmaktadır;

(i) Sadece gerilim modunda çalışanlar mevcuttur (Abaci ve Yuce, 2017; Yesil vd., 2017; Yesil vd., 2016; Sotner vd., 2015; Li, 2015; Siripruchyanun, 2015; Sotner vd., 2013; Sotner vd., 2013(2); İbrahim vd., 2012; Herencsar vd., 2013; Biolek vd., 2011, Sotner vd., 2011, Kumngern ve Dejhan, 2009; Tangsrirat ve Surakamponorn, 2009; Minhaj, 2007; Keskin vd., 2006; Cakir vd., 2005; Toker vd., 2001),

(ii) Çok sayıda aktif eleman içeren tasarımlar vardır (Abuelma'atti, 2017; Thitimahatthanagusol vd., 2017; Jantakun ve Jaikla, 2015; Summart vd., 2015; Ngiamvibool ve Jantakun, 2014; Sotner vd., 2013, Herencsar vd., 2012, Tangsrirat ve Tanjaroen, 2010; Minhaj 2007; Cakir vd., 2005),

(iii) Çok sayıda pasif eleman içeren devre yapıları mevcuttur (Satipar vd., 2017; Sotner vd., 2013; İbrahim vd., 2012; Lahiri, 2012; Abdalla vd., 2012; Biolek vd., 2011; Herencsar vd., 2012; Sotner vd., 2011; Tangsrirat ve Surakamponorn, 2009; Minhaj 2007; Keskin vd., 2006; Cakir vd., 2005; Toker vd., 2001; Fabre ve Longuemard, 1990; Abuelma'atti, 1992),

(iv) Tasarımlarda iki ucu serbest şekilde olan pasif elemanlar vardır ve bu şekildeki devre yapıları tümdevre tasarımı açısından tercih edilmeyen bir durumdur (Kumari ve Gupta, 2017; Abaci ve Yuce, 2017; Yesil vd., 2017; Yeşil vd., 2016; Jin ve Wang, 2014; Sotner vd., 2013; Sotner vd., 2013(2); Lahiri 2012; Jin ve Wang, 2012; Biolek vd., 2011; Herencsar vd., 2012; Tangsrirat ve Tanjaroen, 2010; Tangsrirat ve Surakamponorn, 2009; Jaikla vd., 2008; Minhaj 2007; Keskin vd., 2006; Cakir vd., 2005; Toker vd., 2001; Fabre ve Longuemard, 1990; Abuelma'atti, 1992),

(v) Gerilim modlu tasarımlar için düşük çıkış empedans değerine sahip olmayan dikgen sinüsoidal osilatör devre tasarımları vardır, bu devre yapılarının ard arda bağlanabilmesi için fazladan tampon devrelerinin kullanılması, bağlanacak devre yapısının giriş empedansına bağlı olarak gerekebilir (Abaci ve

Yuce, 2017; Yesil vd., 2017; Satipar vd., 2017; Chen vd., 2015; Li 2015; Siripruchyanun 2015; Sotner vd., 2013; İbrahim vd., 2012; Herencsar vd., 2013; Sotner vd., 2011; Kumngern ve Dejhan, 2009; Minhaj 2007; Cakir vd., 2005),

(vi) Akım modlu devreler için ise yüksek çıkış empedans değerine sahip olmayan tasarımlar literatürde mevcuttur (Prasad vd., 2011; Minhaj 2007; Abuelma'atti, 1992),

(vii) Osilasyon şartının veya osilasyon frekansının bir gerilim veya akım kaynağı ile elektronik olarak kontrol edilebilme özelliğine sahip olmayan tasarımlar literatürde vardır (Abaci ve Yuce, 2017; İbrahim vd., 2012; Lahiri vd., 2012; Abdalla vd., 2012; Kumngern ve Dejhan, 2009; Tangsrirat ve Surakamponorn, 2009; Minhaj 2007; Keskin vd., 2006; Cakir vd., 2005; Toker vd., 2001; Fabre ve Longuemard, 1990; Abuelma'atti, 1992).

Akım Geriyönlü Geçiş-iletkenliği Kuvvetlendiricisi (Current Backward Transconductance Amplifier-CBTA) aktif elemanı ile literatürde bulunan devre yapılarına göre avantajlı çeşitli analog devre tasarımları şimdiye kadar önerilmiştir (Ayten vd., 2010; Sağbaş vd., 2010; Herencsar vd., 2011; Ayten vd., 2012; Sağbaş vd., 2013; Ayten vd., 2014; Sağbaş vd., 2017; Herencsar vd., 2018). Akım modlu çalışmaya uygun yapıda olan CBTA elemanı ile aynı zamanda gerilim modlu devre yapıları da tasarlamak mümkündür. Değiştirilmiş Akım Geriyönlü Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (Modified Current Backward Transconductance Amplifier-MCBTA) aktif elemanı da CBTA elemanından türetilerek literature tanıtılmış ve çeşitli devre yapıları gerçekleştirilmiştir (Herencsar vd., 2011, Ayten vd., 2014).

Bu çalışmada, MCBTA aktif elemanı kullanılarak akım modlu yeni bir dikgen sinüsoidal osilatör devresi tasarımı önerilmiştir. Önerilen devrede iki adet MCBTA aktif elemanı, iki adet bir ucu topraklı kapasite elemanı ve bir adet bir ucu topraklı direnç elemanı bulunmaktadır. Doksan derecelik faz farkına sahip olan iki akım çıkışı da yüksek çıkış empedansına sahiptir ve ard arda bağlanmak için fazladan bir tampon devresine ihtiyaç duymamaktadır. Osilasyon şartı ve osilasyon frekansı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir ve MCBTA aktif elemanının geçiş-iletkenliği parametresi olan  $g_m$  değeri ile elektronik olarak kontrol edilebilir durumdadır. Makalenin ikinci bölümünde MCBTA elemanı ve tanım bağıntıları verilmiştir. Bu bölümde ayrıca MCBTA elemanının olası bir CMOS gerçekleştirilmesi verilmiştir. Üçüncü bölümde, önerilen dikgen sinüsoidal osilatör devresi tanıtılmış ve analizleri verilmiştir. Dördüncü bölümde, MCBTA'nın idealsizlik etkileri üzerinden önerilen devrenin değişimleri ve etkilerinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Beşinci bölümde, PSPICE programı ile gerçekleştirilen benzetim işlemleri tanıtılmış ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir ve sonuç bölümü ile de önerilen dikgen sinüsoidal osilatör devresinin literatürdeki devrelere

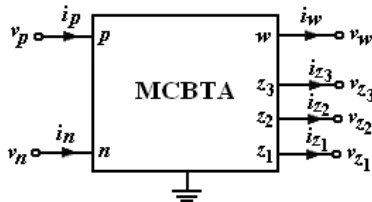
göre üstünlükleri verilmiş ve benzetim sonuçlarının başarımları özetlenmiştir.

## 2. Değiştirilmiş Akım Geriyönlü Geçiş-iletkenliği Kuvvetlendiricisi (MCBTA)

Literatüre yeni kazandırılan aktif elemanlardan bir tanesi de Akım Geriyönlü Geçiş-iletkenliği Kuvvetlendiricisi (Current Backward Transconductance Amplifier-CBTA)'dir (Ayten vd., 2010). CBTA elemanı ile gerilim ve akım modlu olacak şekilde birçok analog işaret işleme uygulamalarında kullanılabilir, literatürde sunulan devre yapılarına göre avantajlı devre yapıları önerilmiştir. Bu aktif elemanın tanım bağıntıları değiştirilerek MCBTA aktif elemanı oluşturulmuş ve literatürde bu eleman kullanılarak çeşitli devre tasarımları gerçekleştirilmiştir (Herencsar vd., 2011, Ayten vd., 2014). MCBTA elemanın devre sembolü Şekil 1'de verilmiştir. Burada  $p$  ve  $n$  terminalleri giriş,  $w$  ve  $z$  ise çıkış terminalleridir. MCBTA elemanın uçlarına ilişkin tanım bağıntıları Eşitlik(1)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ V_w \\ I_{z1} \\ I_{z2} \\ I_{z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha_p(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_n(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_w(s) & 0 & 0 \\ g_m(s) & -g_m(s) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_m(s) & -g_m(s) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_m(s) & -g_m(s) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ I_w \\ V_{z1} \\ V_{z2} \\ V_{z3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

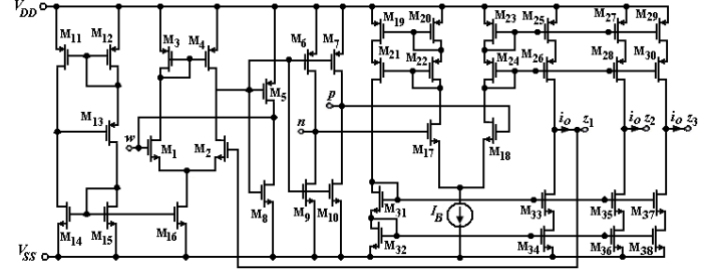
Burada,  $\alpha_p(s)$ ,  $\alpha_n(s)$  ve  $\mu_w(s)$  sırasıyla akım ve gerilim kazançlarıdır.  $g_m(s)$  ise MCBTA aktif elemanın geçiş-iletkenliği kazancıdır. Bu ifadeler frekansa ve izleme hatalarına bağlı olarak şu şekilde yazılabilir;  $\alpha_p(s) = \omega_{ap}(1 - \varepsilon_{ap}) / (s + \omega_{ap})$ ,  $\alpha_n(s) = \omega_{an}(1 - \varepsilon_{an}) / (s + \omega_{an})$ ,  $g_m(s) = g_o \omega_{gm}(1 - \varepsilon_{gm}) / (s + \omega_{gm})$  ve  $\mu_w(s) = \omega_w(1 - \varepsilon_w) / (s + \omega_w)$ . Burada,  $\varepsilon_{ap}$  ve  $\varepsilon_{an}$  akım izleme hatalarıdır,  $\varepsilon_{gm}$  gerilim izleme hatası ve  $\varepsilon_w$  ise geçiş-iletkenliği izleme hatasıdır. İzleme hatalarının değerleri  $|\varepsilon_{ap}| \ll 1$ ,  $|\varepsilon_{an}| \ll 1$ ,  $|\varepsilon_{gm}| \ll 1$ , ve  $|\varepsilon_w| \ll 1$ 'dir.  $\omega_{ap}$ ,  $\omega_{an}$ ,  $\omega_{gm}$ ,  $\omega_w$  MCBTA'nın uçlarına ait köşe frekansı değerlerini göstermektedir. Son olarak,  $g_o$  DC geçiş iletkenliği kazancıdır. İdeal şartlarda gerilim ve akım kazançlarının değeri "1" olmaktadır ( $\mu_w(s) = 1$  ve  $\alpha_p(s) = \alpha_n(s) = 1$ ).



Şekil 1. MCBTA aktif elemanın blok diyagramı

MCBTA elemanın CMOS tranzistörler ile gerçekleştirilmesi Şekil 2'de verilmiştir. Bu CMOS devre yapısı İşlemsel Geçiş-iletkenliği Kuvvetlendiricisi (Operational Transconductance Amplifier-OTA) bloğu (Kaewdang ve Surakamponorn, 2007) ve Akım Taşıyıcı (Current Conveyor-CC) bloğundan (Ferri ve

Guerrini, 2003) oluşmaktadır. OTA ve CC blokları MCBTA'nın tanım bağıntılarını sağlayacak şekilde birleştirilmiş ve MOS tranzistörlerin kanal genişlik ( $W$ ) ve uzunluk ( $L$ ) değerleri düzenlenmiştir. İstenilen lineer çalışma aralığı için belirlenen tranzistör boyutları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. MCBTA aktif elemanın CMOS tranzistörler ile gerçekleştirilmesi

Tablo 1. MCBTA elemanın CMOS tranzistör boyutları.

PMOS Tranzistörler	W(μm)/L(μm)
M3-M7	20/1
M11	1/0.25
M12, M13, M19-M24	2.5/0.25
M25-M30	10/0.25
NMOS Tranzistörler	W(μm)/L(μm)
M1, M2	10/1
M8-M10	2.5/1
M14, M15	0.5/0.25
M16	2.5/0.25
M17 ve M18	1/0.5
M31 ve M32	2.25/0.25
M33-M38	10/0.25

Şekil 2'de verilen CMOS tranzistörlerle gerçekleştirilen MCBTA devresinde,  $M_{17}$ - $M_{38}$  tranzistörleri ile geçiş-iletkenliği kısmı oluşturulmaktadır. Giriş fark gerilimi ( $v_{in} = v_p - v_n$ ) olmak üzere,  $i_o$  geçiş-iletkenliği kısmının çıkış akımıdır ve burada  $I_B$ , bu MOS devre yapısının kutuplama akımıdır. Tüm MOS tranzistörlerin doyum bölgesinde olduğu,  $M_{17}$  ve  $M_{18}$  tranzistörlerinin kanal genişliği ve uzunluklarının tam uyumlu olduğu ve akım aynası devrelerinin birim akım kazançlı olduğu kabul edilirse  $i_o$  akımının matematiksel ifadesi Eşitlik(2)'de verildiği gibi elde edilir.

$$i_o = g_m v_{in} = (\sqrt{2I_B K}) \quad (2)$$

Burada,  $K$  geçiş iletkenliği parametresidir ve ifadesi  $K = \mu C_{ox} W / 2L$ 'dir.  $\mu$  Taşıyıcıların devingenliği,  $C_{ox}$  ise birim alandaki kapı-oksit kapasitesidir. Efektif kanal genişliği  $W$  ve efektif kanal uzunluğu da  $L$  ile verilir.

## 3. MCBTA Tabanlı Dikgen Sinüsoidal Osilatör Devresi

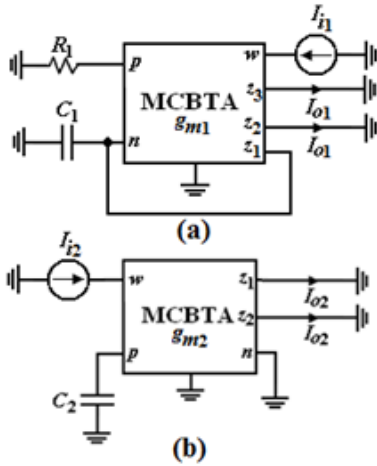
Dikgen sinüsoidal osilatör devresi tasarlamak için birinci mertebeden akım modlu tüm geçiren filtre devresi (Ayten, vd., 2014) ve yeni bir akım modlu integral alıcı devresi kullanılmıştır. Bu devre yapıları sırasıyla Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de verilmiştir. Devre analizleri gerçekleştirildiğinde elde edilen akım modlu

tüm geçiren filtre devresinin ve yeni önerilen akım modlu integral alıcı devresinin akım transfer fonksiyonları sırasıyla Eşitlik(3) ve Eşitlik(4)'de verilmiştir.

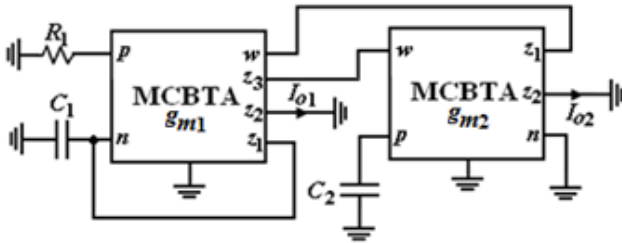
$$\frac{I_{o1}}{I_{i1}} = \frac{sg_{m1}R_1 - g_{m1}/C_1}{s + g_{m1}/C_1} \quad (3)$$

$$\frac{I_{o2}}{I_{i2}} = \frac{g_{m2}}{sC_2} \quad (4)$$

Tüm geçiren filtre devresinin çıkış akım uçlarından bir tanesi, akım modlu integral alıcı devresinin giriş ucuna uygulanmış ve integral alıcı devresinin çıkış akımı da negatif geri besleme yapılarak tüm geçiren filtre devresinin giriş ucuna bağlanmıştır. Bu bağlantı şekli ile birlikte 90°'lik faz farkına sahip iki sinüsoidal akım çıkış ucu elde edilmiş ve kullanılabilir bir dikgen sinüsoidal osilatör devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde tasarlanan dikgen sinüsoidal osilatör devresi Şekil 4'de verilmiştir. Tasarlanan devrede iki adet MCBTA aktif elemanı ve sadece üç adet bir ucu topraklı pasif eleman bulunmaktadır. Akım çıkış uçları da yüksek çıkış empedanslıdır ve ard arda bağlanmaya uygun yapıdadır.



Şekil 3. (a) Akım modlu birinci mertebeden tüm geçiren filtre devresi, (b) Akım modlu integral alıcı devresi



Şekil 4. MCBTA aktif elemanları ile tasarlanan dikgen sinüsoidal osilatör devresi

MCBTA aktif elemanının tanım bağıntıları kullanıldığında ve durum denklemleri bulunarak, Eşitlik(5)'de verilen karakteristik denklem elde edilir.

$$Q(s) = s^2 + s\left(\frac{g_{m1}}{C_1} - \frac{R_1g_{m1}g_{m2}}{C_2}\right) + \frac{R_1g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} = 0 \quad (5)$$

Genel olarak osilatör devreleri iki adet kompleks değerli kutup değerine sahiptir ve karakteristik denklemi ( $s^2 + bs + \omega_o^2 = 0$ ) şeklinde olmaktadır. Burada, osilasyon şartının sağlanması için  $b=0$  olması gerekmektedir. Sistem osilasyona başladıktan sonra da osilasyon frekansı  $\omega_o$  olmaktadır. Sırasıyla, osilasyon frekansı ve osilasyon şartı Eşitlik(6a) ve Eşitlik(6b)'de verilmiştir.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{R_1g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (6a)$$

$$R_1 = \frac{C_2}{g_{m2}C_1} \quad (6b)$$

Yukarıdaki denklemlerden görüleceği üzere osilasyon frekansı  $R_1$ ,  $C_1$  ve  $C_2$  pasif elemanları ile ayarlanabileceği gibi  $g_{m1}$  ve  $g_{m2}$  geçiş-iletkenliği parametreleri ile de ayarlanabilir. Eşitlik(2)'de verildiği gibi  $g_m$  geçiş-iletkenliği  $I_B$  kutuplama akımı ile ayarlanabilir bir parametredir. Dolayısıyla tasarlanan dikgen osilatör devresinin osilasyon frekansı devreye dışarıdan bağlanacak olan bağımsız akım kaynağı ile elektronik olarak kontrol edilebilir durumdadır. Aynı şekilde osilasyon şartı da pasif elemanlar ile ayarlanabileceği gibi elektronik olarak  $g_{m2}$  parametresi ile de kontrol edilebilir. Ayrıca, osilasyon frekansı ve osilasyon şartı bağımsız olarak ayarlanabilir durumdadır.

Tasarlanan dikgen sinüsoidal osilatör devresinin çıkış akım uçları yüksek empedans değerine sahiptir ve ard arda bağlanmaya uygun yapıdadır. MCBTA aktif elemanının z uç sayısı artırılarak kolaylıkla çok daha fazla sayıda akım çıkışı elde edilebilir veya z uçlarından bazılarının akım çıkış yönü ters olacak şekilde MOS devre yapısı geliştirilirse birbirinden 90° faz farkına sahip dört fazlı sinüsoidal osilatör devresi de elde edilebilir durumdadır.

#### 4. İdeal Olmayan Tanım Bağıntıları İle Gerçekleştirilen Analiz İşlemi

MCBTA aktif elemanının Eşitlik(1) ile verilen ideal olmayan tanım bağıntıları ele alınarak, önerilen dikgen sinüsoidal osilatör devresinin analiz işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçları bu bölümde verilmiştir.

MCBTA aktif elemanının tanım bağıntılarında  $\alpha_p(s)$ ,  $\alpha_n(s)$  ve  $\mu_w(s)$  sırasıyla akım ve gerilim kazanç fonksiyonlarıdır.  $g_m(s)$  ise geçiş-iletkenliği kazanç fonksiyonudur ve ifadeleri ikinci bölümde verilmiştir. MCBTA aktif elemanının bağımlı kaynaklar ile modellenen eşdeğer devresi Şekil 5(a)'da verilmiştir. Şekil 5(b)'de ise MCBTA'nın uçlarına ait parazitik

direnç ve kapasite elemanları ile ideal olmayan devre modeli verilmiştir. Bu devrede kullanılan direnç ve kapasite elemanları ile MCBTA aktif elemanın parazitik giriş ve çıkış empedans ifadeleri ve frekansa bağlı izleme kazanç ifadeleri modellenmektedir.  $R_p, R_n, R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}$  direnç elemanları yüksek değerde giriş ve çıkış dirençleridir.  $R_w$  ise düşük değerli çıkış direncidir.  $C_n, C_p, C_{z1}, C_{z2}, C_{z3}$  kapasite elemanları ise MCBTA'nın uçlarına ilişkin giriş ve çıkış kapasitans ifadelerini oluşturmaktadır. Şekil 2'de verilen MCBTA aktif elemanın CMOS gerçekleştirilmesine ilişkin yapılan PSPICE benzetimleri sonucunda elde edilen parazitik direnç ve kapasite eleman değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 5(b)'de verilen MCBTA aktif elemanın ideal olmayan devre modeli ile uçlara ait frekans karakteristiklerinin birinci mertebeden ifade edilmesine dayanır ve literatürde genellikle kullanılan bir yaklaşımdır. Daha detaylı incelemeler için uçlara ilişkin ikinci mertebeden olacak şekilde eşdeğer devre modelleri oluşturulabilir.

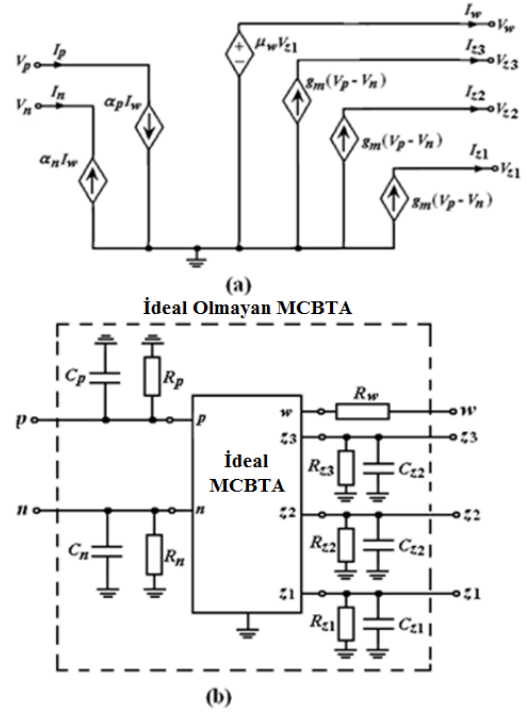
**Tablo 2.** MCBTA elemanın parazitik kapasite ve direnç değerleri

Parazitik Kapasite ve Dirençler	Değerleri
$R_p$	53 k $\Omega$
$R_n$	67 k $\Omega$
$R_{z1}, R_{z2}$ ve $R_{z3}$	403 k $\Omega$
$R_w$	19.6 $\Omega$
$C_p$	75 fF
$C_n$	990 fF
$C_{z1}, C_{z2}$ ve $C_{z3}$	430 fF

#### 4.1 İzleme Hatalarının Etkisi

MCBTA aktif elemanın uç tanım bağıntılarına ait izleme hatalarının tasarlanan dikgen sinüsoidal osilatör devresi üzerindeki etkilerini incelemek için tasarlanan devrenin analizi, ideal olmayan tanım bağıntıları ile tekrar yapıldığında Eşitlik(7) ile verilen karakteristik denklem elde edilir.

$$Q(s) = s^2 + s \left( \frac{\mu_1 g_{m1}}{C_1} - \frac{\alpha_n \mu_1 \mu_2 R_1 g_{m1} g_{m2}}{C_2} \right) + \frac{\alpha_p \mu_1 \mu_2 R_1 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} = 0 \quad (7)$$



**Şekil 5.a)** MCBTA aktif elemanın bağımlı kaynaklı eşdeğer devresi, b) MCBTA aktif elemanın ideal olmayan devre modeli.

Bu denkleme göre elde edilen osilasyon frekansı ve osilasyon şartı ifadeleri sırasıyla Eşitlik(8a) ve Eşitlik(8b)'de verilmektedir.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{\alpha_p \mu_1 \mu_2 R_1 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (8a)$$

$$R_1 = \frac{C_2}{\alpha_n \mu_2 g_{m2} C_1} \quad (8b)$$

Eşitlik(8a) ile verilen osilasyon frekansının MCBTA elemanın uç tanım bağıntılarının izleme hatalarına ve pasif eleman değerlerine bağlı olarak aktif ve pasif duyarlılıkları hesaplanmıştır ve bulunan değerler aşağıda verilmiştir. Bu değerlerden görüleceği üzere osilasyon frekansı ifadesinin tüm mutlak duyarlılık değerleri 0.5'dir ve duyarlılık değerleri açısından "1" değerinden küçük olduğu için kabul edilebilir seviyededir.

$$S_{\alpha_p}^{\omega_o} = S_{\mu_1}^{\omega_o} = S_{\mu_2}^{\omega_o} = S_{g_{m1} \cdot g_{m2}}^{\omega_o} = 0.5, S_{C_1}^{\omega_o} = S_{C_2}^{\omega_o} = -0.5 \quad (9)$$

#### 4.2 MCBTA Aktif Elemanın Parazitik Direnç ve Kapasite Değerlerinin Tasarlanan Devre Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

MCBTA aktif elemanın CMOS gerçekleştirilmesinden dolayı oluşan idealsızlık etkileri ve bu etkileri modellemek için kullanılan, uçlarına ilişkin parazitik direnç ve kapasitelere ilişkin devre modeli Şekil 5b'de

verilmiştir. Bu eşdeğer devredeki parazitik dirençler ( $R_p, R_n; R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}$ ) ve parazitik kapasite elemanları ( $C_n, C_p; C_{z1}, C_{z2}, C_{z3}$ ) ile tasarlanan dikgen sinüsoidal osilatör devresindeki pasif elemanlara etkisi incelenmiştir. Bu parazitik etkilere göre sırasıyla  $R_1, C_1$  ve  $C_2$  elemanlarının empedans fonksiyonları  $Z'_{R1}$ ,  $Z'_{C1}$  ve  $Z'_{C2}$  ile ifade edilmiştir ve denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$Z'_{R1} = R_1 // R_{p1} // \frac{1}{sC_{p1}} \quad (10a)$$

$$Z'_{C1} = \frac{1}{sC_1} // \frac{1}{sC_{z11}} // \frac{1}{sC_{n1}} // R_{z11} // R_{n1} \quad (10b)$$

$$Z'_{C2} = \frac{1}{sC_2} // \frac{1}{sC_{p2}} // R_{p2} \quad (10c)$$

Aynı şekilde, MCBTA'nın ideallsizlik etkileri göz önüne alınarak dikgen osilatör devresine ait karakteristik denklem ifadesi tekrar elde edilmiş ve Eşitlik(11)'de verilmiştir. Burada, MCBTA'nın ideallsizlik etkilerini modellemek için kullanılan parametreler MCBTA eleman sırasına göre yazılmıştır ve  $\alpha_{pi}, \alpha_{ni}, \mu_i, R_{pi}, R_{ni}; R_{z1i}, R_{z2i}, R_{z3i}, C_{ni}, C_{pi}, C_{z1i}, C_{z2i}, C_{z3i}$  ( $i=1,2$ ) şeklinde kullanılmıştır.

$$Q'(s) = 1 + \frac{\mu_1 g_{m1}}{\frac{1}{sC_1} // \frac{1}{sC_{z11}} // \frac{1}{sC_{n1}} // R_{z11} // R_{n1}} - \frac{\alpha_n \mu_1 \mu_2 (R_1 // R_{p1} // \frac{1}{sC_{p1}}) g_{m1} g_{m2}}{\frac{1}{sC_2} // \frac{1}{sC_{p2}} // R_{p2}} + \frac{\alpha_p \mu_1 \mu_2 R_1 g_{m1} g_{m2}}{(\frac{1}{sC_1} // \frac{1}{sC_{z11}} // \frac{1}{sC_{n1}} // R_{z11} // R_{n1}) (\frac{1}{sC_2} // \frac{1}{sC_{p2}} // R_{p2})} = 0 \quad (11)$$

Dikgen sinüsoidal osilatör devresinin çıkış uçlarına ait çıkış empedans fonksiyonları da Eşitlik(12)'de verilmiştir.

$$Z_{o1} = \frac{1}{sC_{z1}} // R_{z21}, Z_{o2} = \frac{1}{sC_{z2}} // R_{z21} \quad (12)$$

MCBTA'nın CMOS gerçekleştirilmesinden kaynaklanan parazitik empedans değerlerinin etkilerini minimuma indirmek için dikgen sinüsoidal osilatör devresinde kullanılan pasif eleman değerlerinin seçimi önemlidir.

i) Dikgen osilatör devresindeki 1 no'lu MCBTA'nın  $p$  ucuna ilişkin empedans ifadesi Eşitlik(10a)'da verilmiştir. Burada, dışarıdan devreye bağlanacak olan  $R_1$  direnci;  $R_1 \ll R_{p1}$  ve  $R_1 \ll \frac{1}{\omega C_{p1}}$  olacak şekilde seçildiği takdirde  $R_1 // R_{p1} // \frac{1}{sC_{p1}} \approx R_1$  olacaktır ve parazitik direnç ve kapasitenin  $p$  ucuna etkisi

minimuma indirilecektir. MCBTA aktif elemanının parazitik  $R_p$  direnç değeri Tablo 2'de verilmiştir ve değeri  $R_{p1} = 53 \text{ k}\Omega$ 'dur.

ii) Aynı şekilde, 1 no'lu MCBTA'nın  $n$  ucuna ilişkin empedans ifadesi Eşitlik(10b)'de verilmiştir. Burada,  $\frac{1}{sC_1}$  empedans değeri  $\frac{1}{sC_{z11}}, \frac{1}{sC_{n1}}, R_{z11},$  ve  $R_{n1}$  değerlerine göre çok daha küçük seçilirse, eşdeğer empedans ifadesinin reaktansı ( $\frac{1}{\omega C_1}$ ) değerine yaklaşık olarak eşit olur. Bunu sağlamak için  $C_1$  kapasite elemanının değeri,  $C_{z11}$  ve  $C_{n1}$ 'den en az 10 kat daha büyük seçilmelidir. Tablo 2'den görüleceği üzere bu parazitik kapasite değerleri sırasıyla 990 fF ve 430 fF'dir.

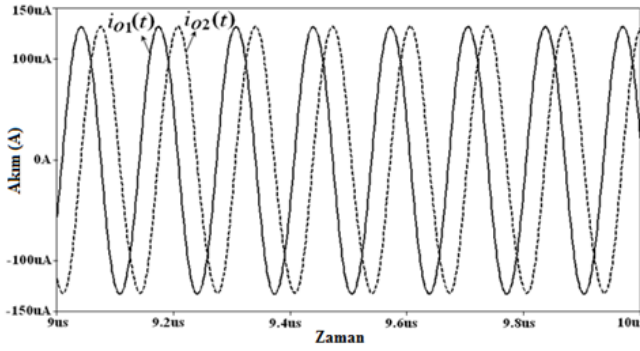
iii) Aynı şekilde, 2 no'lu MCBTA'nın  $p$  ucuna ilişkin empedans ifadesi Eşitlik(10c)'de verilmiştir. Burada da  $\frac{1}{\omega C_2} \ll R_{p2}$  ve  $\frac{1}{\omega C_2} \ll \frac{1}{\omega C_{p2}}$  seçildiği takdirde  $\frac{1}{\omega C_2} // \frac{1}{\omega C_{p2}} // R_{p2} \approx \frac{1}{\omega C_2}$  olacaktır. Böylelikle parazitik direnç ve kapasitelerin dikgen sinüsoidal osilatör devresine etkilerinin minimum seviyede olması sağlanabilir.

## 5. Benzetim Sonuçları

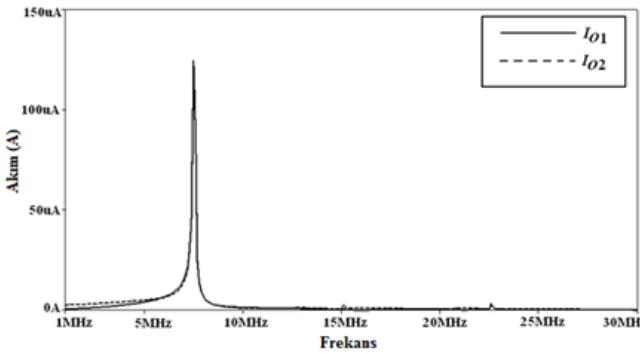
Bu çalışmada önerilen dikgen sinüsoidal osilatör devresinin benzetimleri için Şekil 2'de verilen CMOS tranzistörler ile gerçekleştirilen MCBTA aktif elemanı kullanılmıştır. MCBTA'nın besleme gerilimleri  $V_{DD} = -V_{SS} = 1.5 \text{ V}$  olarak belirlenmiştir ve  $0.25 \mu\text{m}$  seviye-7 TSMC CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak, PSPICE programı ile benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

Benzetimleri gerçekleştirilen dikgen sinüsoidal osilatör devresinde pasif eleman değerleri olarak  $C_1 = C_2 = 10 \text{ pF}$  seçilmiştir. MCBTA aktif elemanının geçiş-iletkenliği parametre değeri  $g_m = 0.5 \text{ mS}$  olacak şekilde  $I_B$  akımı ayarlanmıştır ve  $R_1$  direnç elemanının değeri değiştirilerek devre osilasyona sokulmuştur.  $R_1 = 2.1 \text{ k}\Omega$  iken dikgen osilatör devresi osilasyon durumundadır ve elde edilen çıkış akımlarının zamana göre değişimlerine ait benzetim sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Çıkış akımlarına ilişkin frekans spektrumu benzetim sonucu da Şekil 7'de verilmiştir. Bu direnç değeri için benzetimlerden elde edilen osilasyon frekansı değeri  $47.1 \text{ Mrad/s}$  ( $7.5 \text{ MHz}$ )'dir. Teorik hesaplamalara göre osilasyon frekansının  $50 \text{ Mrad/s}$  ( $7.96 \text{ MHz}$ ) olması gerekmektedir. Bu farklılık CMOS tranzistörler ile gerçekleştirilen aktif MCBTA elemanının ideallsizlik etkilerinden kaynaklanmaktadır ve değer olarak kabul edilebilir düzeydedir. Benzetim

sonuçlarından elde edilen çıkış akımlarının toplam harmonik bozulma (THD) değeri de %1'in altındadır.



**Şekil 6.** Dikgen sinüsoidal osilatör devresinin  $i_{o1}$  ve  $i_{o2}$  çıkış akımlarının zamana göre değişimleri



**Şekil 7.** Dikgen sinüsoidal osilatör devresinin  $i_{o1}$  ve  $i_{o2}$  çıkış akımlarına ait frekans spektrumu.

## 6. Sonuç

Bu makalede, akım modlu bir dikgen sinüsoidal osilatör devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dikgen sinüsoidal osilatör devresi iki adet aktif eleman, iki adet bir ucu topraklı kapasite elemanı ve bir adet bir ucu topraklı direnç elemanından oluşmaktadır. Tasarlanan dikgen sinüsoidal osilatör devresinin avantajları; (i) Akım modlu yapıdadır, (ii) Çıkış akım uçları yüksek empedans değerine sahiptir ve ard arda bağlanmaya uygun yapıdadır, (iii) Aynı anda 90°'lik faz farkına sahip iki sinüsoidal akım işareti elde edilebilmektedir, (iv) Osilasyon şartı ve osilasyon frekansı birbirinden bağımsız olacak şekilde kontrol edilebilir, (v) Osilasyon şartı MCBTA aktif elemanın  $g_m$  geçiş-iletkenliği parametresinin  $I_B$  kutuplama akımının değiştirilmesi ile elektronik olarak kontrol edilebilmektedir, (vi) Osilasyon frekansı geçiş-iletkenliği parametresi  $g_m$  ile elektronik olarak ayarlanabilir durumdadır, (vii) Tüm pasif elemanlar bir ucu topraklı yapıda olacak şekildedir ve bu durum tümdevre tasarımı tercih edilen bir özelliktir.

## Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar

- Abaci, A., Yuçe, E., 2017. Modified DVCC based quadrature oscillator and lossless grounded inductor simulator using grounded capacitor(s). *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, 76, 86–96.
- Abdalla, K.K., Bhaskar, D.R., Senani, R., 2012. Configuration for realising a current-mode universal filter and dual-mode quadrature single resistor controlled oscillator. *IET Circuits Devices Syst.*, 6(3), 159–167.
- Abuelma'atti, M. T., 1992. Grounded Capacitor Current-Mode Oscillator Using Single Current-Follower. *IEEE Trans. Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 39, 1018–1020.
- Abuelma'atti, M. T., 2017. Recent Developments in Current-Mode Sinusoidal Oscillators: Circuits and Active Elements. *Arab J. Sci. Eng.* 42, 2583–2614.
- Ayten, U. E., Sagbas, M., Sedef, H., 2010. Current mode leapfrog ladder filters using a new active block. *AEÜ-International Journal of Electronics and Communications*, 64-6, 503-511.
- Ayten, U.E., Sagbas, M., Herencsar, N., Koton, J., 2012. Novel Floating General Element Simulators Using CBTA. *Radioengineering*, 21-1, 11-19.
- Ayten, U.E., Sagbas, M., Minaei, S., 2014. Realization of Low-Voltage Modified CBTA and Design of Cascadable Current-Mode All-Pass Filter. *Radioengineering*, 23-1, 523-531.
- Biolek, D., Lahiri, A., Jaikla, W., Siripruchyanun, M., Bajer, J., 2011. Realization of electronically tunable voltage-mode/current-mode quadrature sinusoidal oscillator using ZC-CG-CDBA. *Microelectronics Journal*, 42, 1116–1123.
- Cakir, C., Cam, U., Cicekoglu, O., 2005. Novel Allpass Filter Configuration Employing Single OTRA. *IEEE Tran. On Circuits and Systems-II: Express Briefs*, 52-3, 122-125.
- Chen, H.P., Wang, S.F., Ku, Y.T., 2015. CCCCTA Based Resistorless Voltage and Current Mode Quadrature Oscillator. *IEICE Electronic Express*, 12(13), 1-12.
- Fabre, A., Longuemard, J.P., 1990. Sine-wave oscillator with quadrature output currents. *Int. Journal of Electronics*, 68, 399-404.
- Ferri, G., Guerrini, N.C., 2003. *Low-Voltage Low-Power CMOS Current Conveyors*. Kluwer Academic Publishers, London.
- Herencsar, N., Koton, J., Vrba, K., Lahiri, A., Ayten, U. E., Sagbas, M., 2011. A new compact CMOS realization of sinusoidal oscillator using a single modified CBTA. *21st International Conference Radioelektronika, Brno, Czech Republic*, 41-44.
- Herencsar, N., Lahiri, A., Vrba, K., Koton, J., 2012. An electronically tunable current-mode quadrature oscillator using PCAs. *International Journal of Electronics*, 99(5), 609–621.

- Herencsar, N., Sotner, R., Metin, B., Koton, J., Vrba, K., 2013. VDDDA – New ‘Voltage Differencing’ Device for Analog Signal Processing. *Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 8th International Conference on, Bursa, Turkey, 17-20.
- Herencsar, N., Koton, J., Lahiri, A., Ayten, U.E., Sagbas, M., 2018. Resistorless Current-Mode First-Order All-Pass Filter with Electronic Tuning Employing Low-Voltage CBTA and Grounded Capacitor. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 27(2), 1850031 [21 pages].
- Horng, J.W., 2002. Current differencing buffered amplifiers based single resistance controlled quadrature oscillator employing grounded capacitors. *IEICE Trans. Fundamental*, E85-A2, 1416-1419.
- Ibrahim, M.A., Minaei, S., Yuce, E., 2012. All-pass sections with rich cascability and IC realization suitability. *Int. J. Circ. Theor. Appl*, 40, 461-472.
- Jaikla, W., Siripruchyanun, M., Bajer, J., Biolek, D., 2008. A Simple Current-Mode Quadrature Oscillator Using Single CDTA. *Radioengineering*, 17, 33-40.
- Jantakun, A., Jaikla, W., 2015. Active-only current-mode first-order allpass filter and its application in quadrature oscillator. *Indian Journal of Pure Applied Physics*, 53, 557-563.
- Jin, J., Wang, C., 2012. Single CDTA-based current-mode quadrature oscillator. *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, 66, 933- 936.
- Jin, J., Wang, C., 2014. CDTA-based electronically tunable current-mode quadrature oscillator. *International Journal of Electronics*, 101(8), 1086-1095.
- Jin, J., Wang, C., 2014. Current-mode universal filter and quadrature oscillator using CDTAs. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 22, 276- 286.
- Kaewdang, K., Surakampontrorn, W., 2007. On the realization of electronically current-tunable CMOS OTA. *AEÜ-Int. J. Electron. Commun.*, 61, 300 - 306.
- Keskin, A.U., Biolek, D., 2006. Current-mode quadrature oscillator using current differencing transconductance amplifiers (CDTA). *IEE Proc. Circuits Devices Syst.*, 153-3, 2140-218.
- Keskin, A.U., Aydin, C., Hancioglu, E., Acar, C., 2006. Quadrature Oscillator Using Current Differencing Buffered Amplifiers (CDBA). *Frequenz*, 60, 21-23.
- Kumari, S., Gupta, M., 2017. Design and analysis of high Transconductance Current Follower Transconductance Amplifier (CFTA) and its applications. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.*, 93, 489-506.
- Kumngern, M., Dejhan, K., 2009. DDCC-Based Quadrature Oscillator with Grounded Capacitors and Resistors. *Active and Passive Electronic Components*, 1-4.
- Lahiri, A., 2012. Current-mode variable frequency quadrature sinusoidal oscillators using two CCs and four passive components including grounded capacitors. *Analog Integr. Circ. Si.g Process.*, 71, 303-311.
- Li, Y., 2015. Systematic Derivation for Quadrature Oscillators Using CCCCTAs. *Radioengineering*, 24(2), 535-543.
- Maheshwari, S., Agrawal, D., 2017. Cascadable and Tunable Analog Building Blocks Using EX-CCCII. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 26(6), 1750093 (16 pages).
- Minhaj, N., 2007. Current conveyor-based voltage-mode two-phase and four-phase quadrature oscillator. *Int. Journal of Electronics*, 94-7, 663-669.
- Ngiamvibool, W. S., Jantakun, A., 2014. Quadrature oscillator using CCCCTAs and grounded capacitors with amplitude controllability. *International Journal of Electronics*, 101(12), 1737-1758.
- Prasad, D., Bhaskar, D.R., Singh, A.K., 2011. Electronically Controllable Grounded Capacitor Current-Mode Quadrature Oscillator Using Single MO-CCCCTA. *Radioengineering*, 20(1), 354-359.
- Sagbas, M., Ayten, U.E., Sedef, H., 2010. Current and voltage transfer function filters using a single active device. *IET Circuits Devices and Systems*, 4-1, 78-86.
- Sagbas, M., Ayten, U.E., Herencsar, N., Minaei, S., 2013. Current and Voltage Mode Multiphase Sinusoidal Oscillators Using CBTAs. *Radioengineering*, 22(1), 24-33.
- Sagbas, M., Ayten, U.E., Sedef, H., Minaei, S., 2017. Modified Gorski-Popiel Technique and Synthetic Floating Transformer Circuit Using Minimum Components. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 26(1), 1750013 (21 pages).
- Satipar, D., Intani, P., Jaikla, W., 2017. Electronically Tunable Quadrature Sinusoidal Oscillator with Equal Output Amplitudes during Frequency Tuning Process. *Hindawi Journal of Electrical and Computer Engineering*, Article ID 8575743, 10 pages.
- Siripruchyanun, M., 2015. A CMOS Electronically Controllable Current-Mode Sinusoidal Quadrature Oscillator Using Single DDCCTA and Grounded Passive Elements. *Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 38th International Conference on, Prague, Czech Republic, 9-11.
- Sotner, R., Jerabek, J., Prokop, R., Vrba, K., 2011. Current Gain Controlled CCTA and its Application in Quadrature Oscillator and Direct Frequency Modulator. *Radioengineering*, 20-1, 317-326.



- Sotner, R., Lahiri, A., Kartci, A., Herencsar, N., Jerabek, J., Vrba, K., 2013. Design of Novel Precise Quadrature Oscillators Employing ECCIs with Electronic Control. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 13(2), 65-72.
- Sotner, R., Jerabek, J., Herencsar, N., 2013. Voltage Differencing Buffered/Inverted Amplifiers and Their Applications for Signal Generation. *Radioengineering*, 22(2), 490-504.
- Sotner, R., Jerabek, J., Langhammer, L., Polak, J., Herencsar, N., Prokop, R., Petrzela, J., Jaikla, W., 2015. Comparison of Two Solutions of Quadrature Oscillators With Linear Control of Frequency of Oscillation Employing Modern Commercially Available Devices. *Circuits Syst Signal Process*, 34, 3449–3469.
- Summart, S., Thongsopa, C., Jaikla, W., 2015. New current-controlled current-mode sinusoidal quadratureoscillators using CDTAs. *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, 69, 62–68.
- Tangsrirat, W., Surakampontrorn, W., 2009. Single-Resistance-Controlled Quadrature Oscillator and Universal Biquad Filter Using CFOAs. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 63, 1080–1086.
- Tangsrirat, W., Tanjaroen, W., 2010. Current-mode sinusoidal oscillator with independent control of oscillation frequency and condition using CDTAs. *Indian Journal of Pure Applied Physics*, 48, 363-366.
- Thitimahatthanagusol, P., Saetiaw, C., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., Summart, S., 2017. CCCIs-Based First-Order All-Pass Filter and Quadrature Oscillators. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 26(6), 1750094(18 pages).
- Toker, A., Özcan, S., Kuntman, H., Çiçekoğlu, O., 2001. Supplementary all-pass sections with reduced number of passive elements using a single current conveyor. *Int. Journal of Electronics*, 88, 969-976.
- Yesil, A., Kacar, F., Gurkan, K., 2016. Design And Experimental Evaluation Of Quadrature Oscillator Employing Single FB-VDBA. *Journal of Electrical Engineering*, 67(2), 137–142.
- Yesil, A., Konalb, M., Kacar, F., 2017. Electronically Tunable Quadrature Oscillator Employing Single Differential Difference Transconductance Amplifier. *Acta Physica Polonica A*, 132, 843-845.