

NCTEchE08-028

หน้า 121

NCTEchE08-028

# วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ซึ่งมีขีดควบคุมแรงดัน และโหมดความถี่ที่ควบคุมความถี่ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ CDTA ที่ควบคุมด้วยกระแส A Dual-Mode Sinusoidal Quadrature Oscillator with Frequency Controllability via Electronic Method Using Current Controlled CDTA's

ดร. ศิวาพันธ์ วิระพท กงหนู\* มนตรี ศิริปรัชญานันท์†  
E-mail : phanomn@mail.kmutt.ac.th, mntc@kmutt.ac.th

\*ปริญญาโทวิศวกรรมไฟฟ้า และอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
†ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีขีดควบคุมแรงดันที่สัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่ 90° ลักษณะเด่นของวงจรที่นำเสนอคือ สามารถควบคุมความถี่ได้ด้วยกระแสไบแอส มีค่าความถี่ที่เสถียรและมีโหมดความถี่สองโหมดซึ่งสามารถปรับค่าได้อย่างเป็นอิสระจากเงื่อนไขของสัญญาณ นอกจากนี้วงจรมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ประกอบด้วยเพียง CCCTA จำนวนแค่ 2 ตัว วงจรสามารถปรับค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 2 ตัว และการจำลองทางวงจรของวงจรที่นำเสนอโดยใช้ PSPICE นั้นยืนยันถึงสมรรถนะของวงจรได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: วงจรกำเนิดสัญญาณ, CCCTA

ร่วมด้วย: คณะวิทยาศาสตร์การศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิชาคณะวิทยาศาสตร์การศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## 1. บทนำ

สัญญาณรูปคลื่นไซน์ ได้รับความนิยมไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งในงานด้านการวัด ระบบเครื่องมือวัด การประมวลผลสัญญาณ ตลอดจนระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบสื่อสาร โดยทั่วไปแล้ววงจรที่สามารวจให้กำเนิดรูปคลื่นไซน์ จะมีชิ้นส่วนประกอบ 2 ส่วนหลัก คือ โครงข่ายเลือกความถี่ (Frequency-selective network) ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วประกอบไปด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ คือ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ/หรือตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งส่วนนี้อาจจะประกอบด้วยวงจรที่มีความสามารถต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้จำนวนอุปกรณ์ที่น้อยลง สามารถควบคุมค่าความถี่ (Oscillation frequency) และเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Condition) ได้โดยธรรมชาติและยังเป็นที่นิยมใช้กันทั้งงานโดยปริมาตรกำลังและแรงดันไฟฟ้าได้เช่นกัน สัญญาณที่มีความถี่คงที่ (2-5) เป็นที่นิยมใช้กัน แต่โดยทั่วไปแล้วทั้งหมดนี้ ยังมีการใช้เทคนิคทั้งทางพีซีและแอนะล็อก ซึ่งเป็นที่นิยมมาก ซึ่งส่งผลให้เมื่อมีไปสร้างเป็นวงจรรวมแล้ว วงจรที่มีความถี่คงที่มักจะไปสร้างเป็นวงจรรวมแล้ว ประกอบกับในปัจจุบันการออกแบบวงจรและลดขนาดของชิปที่เพิ่มขึ้น วงจรที่มีความถี่คงที่จึงได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการที่เหนือกว่าการควบคุมความถี่ด้วยพาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน หรือตัวเก็บประจุ มีความเสถียรกว่าไม่แปรปรวนหรือเปลี่ยนแปลงค่าได้ง่ายกว่าการควบคุมความถี่ด้วยพาสซีฟ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบควบคุม

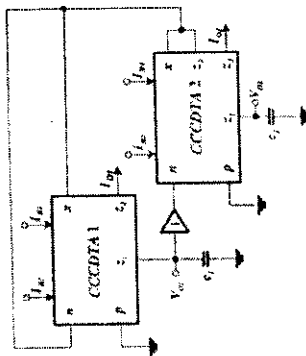
อัตโนมัติ หรือไมโครคอมพิวเตอร์ได้ใช้กว่าสิบตัวอย่าง [6-9]

ในบทความที่ตามมา มีรายละเอียดของเทคนิคการวัดที่แสดงในวงจรรวมและลดขนาดของขนาดความถี่ที่ต้องการที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์แบบพกพาหรืออุปกรณ์ที่ใช้กับคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงได้มีเทคนิคการทำงานในโหมดกระแสเมทริกซ์ ทั้งวงจรที่ใช้เทคนิคการทำงานในโหมดกระแสเมทริกซ์ ซึ่งมีข้อดีอีกหลายอย่างซึ่งพบในงานวิจัยจำนวนมาก [10-11]

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเทคนิคการวัดที่เรียกว่า Current-Differencing Transconductance Amplifier (CDTA) ที่เหมาะสมนำไปออกแบบ วงจรประมวลผลสัญญาณและลดขนาด [12] โดย CDTA สามารถทำงานได้ในโหมดกระแสโดยสมบูรณ์คล้ายกับอินพุตและเอาต์พุตเป็นกระแส นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกหลายประการที่แตกต่างจาก CDTA ไม่ซับซ้อน แต่ยังคงมีข้อดีที่สามารถควบคุมความถี่ตามตนเองได้ซึ่งอินพุตได้ใช้วิธีการอิเล็กทรอนิกส์แบบกระแสที่เรียกว่า CDTA ไปออกแบบวงจรจึงไม่สามารถควบคุมการทำงานด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์แบบกระแสที่เรียกว่า CDTA จำนวนหลายตัว ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ต่อมาจึงได้มีการนำ CDTA ที่สามารถควบคุมความถี่ตามตนเองได้ทั้งหมด ด้วยกระแสไบแอส และมีข้อดีที่เรียกว่า Current Controlled Current Differencing Transconductance Amplifier (CCCTA) [13]

จากการศึกษาพบว่าสัญญาณที่ได้นั้นมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ซึ่งมีความเสถียรที่สามารถใช้งานได้ด้วยความถี่ที่กว้างกว่าที่ได้นั้นเอง โดยที่ความถี่ที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้า (14-15) จุดเด่นของวงจรมีคุณสมบัติเช่นต่อไปนี้

ร่วมด้วย: คณะวิทยาศาสตร์การศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิชาคณะวิทยาศาสตร์การศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ภาพที่ 2 โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ชนิดควอดเรตเตอร์ที่นำเสนองาน

2.2 หลักการของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ชนิดควอดเรตเตอร์ที่นำเสนอ

พิจารณาจากโครงสร้างของวงจรในภาพที่ 2 ให้อุปสรรคมีขั้วของ CCDTA เมื่อกรานซิสเตอร์ทุกตัวสมพหพันธ์กัน [16] จะได้ว่าสมการอนุพันธ์ของสมบัตินี้ดังนี้

$$s^2 + \left( \frac{1 - R_{22}g_m}{R_{22}C_2} \right) s + \frac{g_m}{R_{22}C_2} = 0 \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) วงจรที่นำเสนอจะสมบัตินำคลื่นสัญญาณรูปไซน์ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{R_{22}} = g_m \quad (5)$$

สมการที่ (5) เรียกว่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Condition) นั่นคือขั้วที่ป้อน  $4I_{B2} = I_{B2}$  และขนาดของค่าความถี่ที่กำเนิด (Oscillation Frequency) ให้นำโดยที่  $R_{22} = V_T/2I_{B2}$ ,  $g_m = I_{B2}/2V_T$  และ  $C_2 = C_1 = C$  เกี่ยวข้องการวิเคราะห์จะได้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_m}{C_1 C_2 R_{22}}} = \frac{1}{CV_T} \sqrt{V_T I_{B2}} \quad (6)$$

รูปคลื่นคือ : คณะผู้วิจัยและพัฒนาระบบการผลิตและพัฒนาระบบการผลิต  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบการผลิต

จากวงจรในภาพที่ 2 สามารถใช้สัญญาณควอดเรตเตอร์เอาต์พุตได้ทั้งในโหมดแรงดัน และกระแสในเวลาเดียวกัน

2.3 การวิเคราะห์วงจรในกรณีเป็นจุดกึ่งในกรณีที่มี CCDTA ที่ใช้ในงานเกิดความไม่เป็นอุดมคติ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$I_1 = \alpha_1 I_T - \alpha_1 I_2 \quad (7)$$

$$I_2 = \beta_2 g_m V_2 \quad (8)$$

เมื่อ  $V_0$  ของวงจรมีสมการที่ (9)

$$V_0 = \beta V_1 \quad (9)$$

เมื่อ  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัย 1 ซึ่งเกิดจากค่าที่ผิดพลาดจากการส่งผ่านกระแสของ  $I_1$  และ  $I_2$  ไปเป็น  $I_2$  ส่วน  $\beta_2$  เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัย 1 ซึ่งเกิดจากค่าที่ผิดพลาดจากการส่งผ่านความถี่แรงดันจาก  $V_2$  ไปยัง  $I_2$  และ  $\beta$  เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัย 1 ซึ่งเกิดจากค่าที่ผิดพลาดจากการส่งผ่านแรงดันจาก  $V_1$  ไปยัง  $V_0$

ดังนั้นจะพบว่าได้มี สมการลักษณะสมบัตินี้ของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในสมการที่ (10)

$$s^2 + \left( \frac{\beta - \beta_2 \alpha_1 R_{22} g_m}{\alpha_1 R_{22} C_1} \right) s + \frac{\beta g_m g_m}{\alpha_1 R_{22} C_1 C_2} = 0 \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) จะได้ว่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในสมการที่ (11) และเงื่อนไข  $g_m = I_{B2}/2V_T$   $R_{22} = V_T/2I_{B2}$  จึงในสมการที่ (11) จะได้ว่าสมการที่ (12) ตามลำดับ

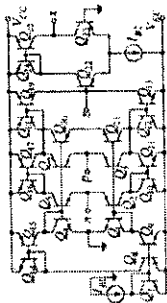
$$\beta_2 g_m = \frac{\beta}{\alpha_1 R_{22}} \quad (11)$$

$$4\beta_2 \alpha_1 I_{B2} = \beta / V_T \quad (12)$$

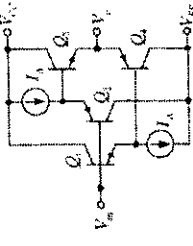
ในกรณีที่เป็นจุดกึ่ง สามารถหาความถี่ที่ดังต่อไปนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\beta g_m g_m}{\alpha_1 C_1 C_2 R_{22}}} \quad (13)$$

ในทางปฏิบัติมีพารามิเตอร์  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  เป็นผลมาจากค่าความถี่และความสัมพันธ์ในกรณีที่มี CCDTA และวงจรมีความถี่สูงซึ่งมีผลต่อการไหลของกระแสความถี่และคุณสมบัติของวงจร ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากพารามิเตอร์เหล่านี้ การที่จะออกแบบ CCDTA และวงจรมีแรงดัน ให้มีค่าใกล้เคียงจุดควอดเรตเตอร์ที่สุด



ภาพที่ 4 โครงสร้างภายในของ CCDTA



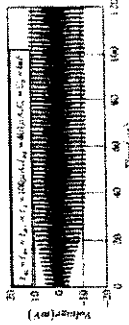
ภาพที่ 5 โครงสร้างภายในของวงจรมีแรงดัน

3. ผลการวิเคราะห์การที่นำเสนอ

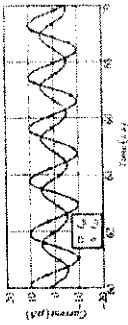
เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอได้ใช้ซอฟต์แวร์จำลองวงจรด้วยโปรแกรม SPICE สำหรับกับซิสเต็ม PSP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของวงจร ได้ใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ : คณะผู้วิจัยและพัฒนาระบบการผลิตและพัฒนาระบบการผลิต  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบการผลิต



ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์ในสถานะกำเนิดสัญญาณในโหมดแรงดัน



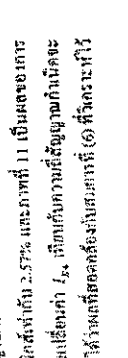
ภาพที่ 7 ผลการวิเคราะห์ในสถานะกำเนิดสัญญาณในโหมดกระแส



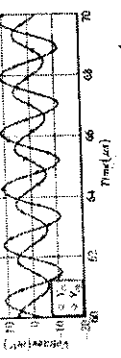
ภาพที่ 8 ผลการวิเคราะห์สถานะสัญญาณที่เฟสต่างกัน 90 องศา (กระแส)

ภาพที่ 9. ผลสัญญาณรบกวนด้านกำลังจากที่

แหล่งกำเนิด 90° ในช่วงเวลาสั้น



ภาพที่ 10. ผลสัญญาณรบกวนกำลังที่ความถี่ 50 Hz



ภาพที่ 11. ผลการวัดการรบกวนกำลัง (ต่าง)



4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอ วงจรกำเนิดสัญญาณอินทรีย์คอสโมสที่ทำงานโดยใช้สัญญาณไซน์ โมดูลเรส และ โมดูลแรงขับในเวลาดำเนินการอินทรีย์ โดยอิสระจากเงื่อนไขของทางกำลังสัญญาณ ด้วยระบบสัญญาณ CCDTA ซึ่งมีอัตราการบริโภคพลังงานเท่ากับ 2.02mW ที่แรงดันไฟเลี้ยง 3.3V ค่าผิดพลาดคาร์โมดูล (THD) เพียง 2.57% นอกเหนือจากนี้แล้ว วงจรที่ได้นามมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย CCDTA จำนวน 2 ตัวต่อร่วมกับวงจรความถี่และตัวประกอบจุดสองส่วนต่อตัว ซึ่งมีความสะดวกและง่าย ในการพัฒนาเป็นวงจรต่อเนื่องที่ใช้ที่นิยม ซึ่งมีข้อดีกว่าที่จะนำไปใช้งานระบบสื่อสารแบบไร้สาย ที่ใช้แบบจริงเป็นแหล่งจ่าย

5. เอกสารอ้างอิง

[1] R. F. Graf, "Oscillator Circuits," Neenes: Boston, MA, 1997.  
[2] J. Bayard, "Single grounded resistance tunable sinusoidal oscillator," *IEEE Proceedings-G, Circuits, Devices and Systems*, vol. 151, pp. 74-77, 2004.  
[3] M. T. Abucina, and M. A. Al-qabli, "Low component resonant-generation current conveyor based multiphase sinusoidal oscillator," *International Journal of Electronics*, vol. 84, pp. 45-52, 1998.  
[4] H. Barthelemy, S. Medeiros and E. Kusner, "CMOS sinusoidal oscillator based on current-controlled current conveyors," *Electronics Letters* vol. 38, pp. 1254-1256, 2002.

[4] C. M. Chang and T. S. Liao, "Novel sinusoidal oscillators using a single dual current output OTA," *International Journal of Electronics*, vol. 89, pp. 493-503, 2002.

[6] T. Tsukurai, Y. Kinugasa, Y. Sami, M. Higashimura and Y. Fuhui, "Novel current-mode active-only biquad with lossless and lossy integrators," *International Journal of Electronics*, vol. 90, pp. 627-633, 2003.

[7] T. Tsukurai, M. Higashimura, Y. Sami and Y. Fuhui, "Electronically tunable current-mode active-only biquadratic filter," *International Journal of Electronics*, vol. 87, pp. 307-314, 2000.

[8] M. T. Abucina, and H. A. Alzaber, "Multi-function active-only current-mode filter with three inputs and one output," *International Journal of Electronics*, vol. 85, pp. 431-435, 1998.

[9] A. K. Singh and R. Senani, "Low-component count active-only immittance and their application in realising simple multifunction biquads," *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 718-719, 1998.

[10] C. Toumazon, F. J. Lidgey, and D. G. Haigh, "Analogous K design: the current-mode approach," *Peragrams*, London, 1990.

[11] C. S. Hiras, and T. N. Lappalov, "Circuit design: a study on voltage-mode to current-mode conversion technique," *Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON '96*, Bari, Italy, May 13-16, pp. 1309-1312, 1996.

[12] D. Biolski, "OTA Building block for current-mode analog signal processing," *Proceedings of the European conference on circuit theoretical design 2003 - ECCTD'03*, 2003, Krakow, Poland, pp. 397-400.

[13] M. Sinprasachun, and W. Jitkha, "Current Controlled Current Differencing Transconductance Amplifier (CCCDTA): A New Building Block and Its Applications," *Proceedings of ECTI conference 2006*, Libon-ratchaburi, THAILAND, Pages 349-351, 10-13 May 2006.

[14] บทที่ 3 ที่ประชุมฉบับที่, "วงจรถ่ายสัญญาณ

รูปคลื่นไซน์อินทรีย์คอสโมสในโหมดกระแส ที่ใช้

เพื่ออุปกรณ์อินทรีย์ และระบบสัญญาณที่มี

ด้วยวิธีการทางอินทรีย์อินทรีย์ - ฉบับสรุปวิชาการ

ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, หน้าที่ 245-248, 11-12

พฤศจิกายน 2547.

[15] วิจัย โดต้า, "อินทรีย์คอสโมส และ บทที่ 3 ที่ประชุมฉบับที่

"วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ อินทรีย์คอสโมส

แบบใหม่ที่มีคุณสมบัติอินทรีย์อินทรีย์

อิเล็กทรอนิกส์ โดต้า (EDAs) ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยพระนครครั้งที่ 4 (PEC2005)

หน้าที่ EE-6, EE-10, 8-9 ธันวาคม 2548

[16] Alan B. Grebene, *Biquad and MDS analog integrated circuit design*, New York: John Wiley & Sons, 1984.

[17] D. R. Frey, "Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering," *IEEE Trans. Circuit Devices Syst.*, vol. 140, pp. 496-516, 1992.

งานวิจัยนี้ ได้เสนอ วงจรกำเนิดสัญญาณอินทรีย์คอสโมสที่ทำงานโดยใช้สัญญาณไซน์ โมดูลเรส และ โมดูลแรงขับในเวลาดำเนินการอินทรีย์ โดยอิสระจากเงื่อนไขของทางกำลังสัญญาณ ด้วยระบบสัญญาณ CCDTA ซึ่งมีอัตราการบริโภคพลังงานเท่ากับ 2.02mW ที่แรงดันไฟเลี้ยง 3.3V ค่าผิดพลาดคาร์โมดูล (THD) เพียง 2.57% นอกเหนือจากนี้แล้ว วงจรที่ได้นามมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย CCDTA จำนวน 2 ตัวต่อร่วมกับวงจรความถี่และตัวประกอบจุดสองส่วนต่อตัว ซึ่งมีความสะดวกและง่าย ในการพัฒนาเป็นวงจรต่อเนื่องที่ใช้ที่นิยม ซึ่งมีข้อดีกว่าที่จะนำไปใช้งานระบบสื่อสารแบบไร้สาย ที่ใช้แบบจริงเป็นแหล่งจ่าย

งานวิจัยนี้ ได้เสนอ วงจรกำเนิดสัญญาณอินทรีย์คอสโมสในโหมดกระแส ที่ใช้เพื่ออุปกรณ์อินทรีย์ และระบบสัญญาณที่มีด้วยวิธีการทางอินทรีย์อินทรีย์ - ฉบับสรุปวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, หน้าที่ 245-248, 11-12 พฤศจิกายน 2547.

วิจัย โดต้า, "อินทรีย์คอสโมส และ บทที่ 3 ที่ประชุมฉบับที่ "วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ อินทรีย์คอสโมส แบบใหม่ที่มีคุณสมบัติอินทรีย์อิเล็กทรอนิกส์ โดต้า (EDAs) ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระนครครั้งที่ 4 (PEC2005) หน้าที่ EE-6, EE-10, 8-9 ธันวาคม 2548

Alan B. Grebene, *Biquad and MDS analog integrated circuit design*, New York: John Wiley & Sons, 1984.

D. R. Frey, "Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering," *IEEE Trans. Circuit Devices Syst.*, vol. 140, pp. 496-516, 1992.

C. M. Chang and T. S. Liao, "Novel sinusoidal oscillators using a single dual current output OTA," *International Journal of Electronics*, vol. 89, pp. 493-503, 2002.

T. Tsukurai, Y. Kinugasa, Y. Sami, M. Higashimura and Y. Fuhui, "Novel current-mode active-only biquad with lossless and lossy integrators," *International Journal of Electronics*, vol. 90, pp. 627-633, 2003.

T. Tsukurai, M. Higashimura, Y. Sami and Y. Fuhui, "Electronically tunable current-mode active-only biquadratic filter," *International Journal of Electronics*, vol. 87, pp. 307-314, 2000.

M. T. Abucina, and H. A. Alzaber, "Multi-function active-only current-mode filter with three inputs and one output," *International Journal of Electronics*, vol. 85, pp. 431-435, 1998.

A. K. Singh and R. Senani, "Low-component count active-only immittance and their application in realising simple multifunction biquads," *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 718-719, 1998.

C. Toumazon, F. J. Lidgey, and D. G. Haigh, "Analogous K design: the current-mode approach," *Peragrams*, London, 1990.

C. S. Hiras, and T. N. Lappalov, "Circuit design: a study on voltage-mode to current-mode conversion technique," *Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON '96*, Bari, Italy, May 13-16, pp. 1309-1312, 1996.

D. Biolski, "OTA Building block for current-mode analog signal processing," *Proceedings of the European conference on circuit theoretical design 2003 - ECCTD'03*, 2003, Krakow, Poland, pp. 397-400.