

วงจรรขยายสัญญาณเครื่องมือวัดอย่างง่ายโดยใช้ CDBA เพียงตัวเดียว

A Simple Instrumentation Amplifier Using Only Single CDBA

กังวาล พยัคฆกุล¹ ประชาธรัฐ สัตถาผล² และมนตรี ศิริปรัชญานันท์³

Kangwal Payakkakul¹ Pracharat Satthaphol² and Montree Siripruchyanun³

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹kangwal.p@gmail.com ²pracharat2012@gmail.com ³mts@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ วงจรรขยายสัญญาณเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier: IA) โดยใช้วงจร CDBA (Current Differencing Buffered Amplifier) เพียงตัวเดียว ต่อร่วมกับตัวต้านทานแบบพาสซีฟจำนวน 3 ตัว ลักษณะเด่นของวงจรที่นำเสนอคือ สามารถควบคุมอัตราขยายสัญญาณโหมดผลต่าง (Ad) ได้ด้วยการกำหนดค่าที่ตัวต้านทาน R_3 โครงสร้างวงจรที่ไม่ซับซ้อน จึงส่งผลให้วงจรที่นำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่า วงจรที่นำเสนอมีผลตอบสนองทางความถี่ของค่า CMRR เท่ากับ 72.2dB ที่ความถี่ประมาณ 47.6MHz ซึ่งสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรรขยายสัญญาณเครื่องมือวัด CDBA

Abstract

This article presents an instrumentation amplifier (IA) using only single Current Differencing Buffered Amplifier (CDBA) and 3 resistors as passive elements. The features of the proposed circuit are that; the differential-mode voltage gain can be controlled by resistor; the circuit description is very simple to further develop into an integrated circuits. The PSpice simulation results are depicted; the common-mode rejection ratio (CMRR) of the presented IA circuit is 72.2dB at 47.6MHz. The given results agree well with the theoretical anticipation.

Keywords: Instrumentation Amplifier, CDBA

1. บทนำ

วงจรรขยายสัญญาณเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier: IA) จัดเป็นวงจรรขยายสัญญาณประเภทแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดันผลต่าง (Differential Voltage Controlled Voltage Source) ซึ่งได้รับความนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งในระบบการวัดและควบคุมกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรเครื่องมือแพทย์ที่ต้องการความแม่นยำสูง ทำให้มีผู้ให้ความสนใจพัฒนาและออกแบบวงจร IA ขึ้นมากมาย [1]-[12] อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจพบว่าวงจร IA ที่ได้มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ยังมีข้อด้อยอยู่หลายประการ เช่น

- มีการใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมาก [1]-[5]
- มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการสังเคราะห์วงจรเนื่องจากมีการใช้อุปกรณ์แอคทีฟต่างชนิดกัน [6]-[7]
- ยังมีช่วงแบนด์วิธ (bandwidth) ไม่สูงมากนัก [1]-[12]

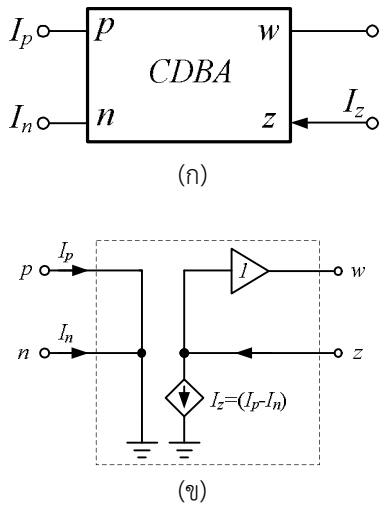
ในปี ค.ศ.1999 มีผู้นำนเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า Current Differencing Buffered Amplifier หรือวงจร CDBA [13] ที่เหมาะสมจะนำไปออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก โดยอุปกรณ์ CDBA ที่ได้นำเสนอนั้น ประกอบด้วยวงจรภายในสำคัญสองส่วน คือ วงจรผลต่างแรงดัน (Current Differencing Circuit) และวงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) โดย CDBA สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดแรงดันและโหมดกระแส มีอัตราสูงและแบนด์วิธกว้าง ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้มีผู้วิจัยนำเอาวงจร CDBA ไปพัฒนาและออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก

มากขึ้นเป็นลำดับ ดังนั้น ในบทความวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อนำเสนอ การออกแบบวงจรขยายสัญญาณเครื่องมือวัดโดยใช้อุปกรณ์ CDBA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ วงจรที่นำเสนอมีข้อดีคือมีค่า CMRR (Common-mode Rejection Ratio) สูงและมีช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับวงจร IA ที่ได้มีการนำเสนอมาแล้วในอดีต อีกทั้งยังมีโครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อนประกอบด้วย CDBA เพียงตัวเดียว ต่อกับตัวต้านทานแบบพาสซีฟจำนวน 3 ตัว วงจรที่นำเสนอจึงเหมาะสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่า วงจรทำงานสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี

2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

2.1 หลักการทำงานของ CDBA

เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณเครื่องมือวัดที่นำเสนอใช้อุปกรณ์ CDBA เป็นอุปกรณ์หลัก ในส่วนนี้จึงขอกล่าวถึงอุปกรณ์ CDBA ซึ่งมีสัญลักษณ์และวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 1 ดังนี้

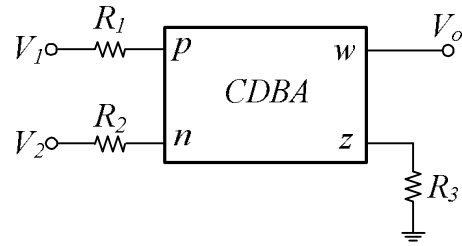


รูปที่ 1 CDBA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

ลักษณะสมบัติของวงจร CDBA โดยทั่วไปสามารถแสดงด้วยสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ I_z \\ V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ V_z \\ I_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 หลักการทำงานของวงจรที่นำเสนอ



รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณเครื่องมือวัดที่นำเสนอ

จากรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างวงจรขยายสัญญาณเครื่องมือวัดที่นำเสนอ เมื่อทำการวิเคราะห์วงจร IA โดยอาศัยลักษณะสมบัติของวงจร CDBA จากสมการที่ (1) นั้นจะได้

$$V_p - V_n = 0 \quad (2)$$

และ

$$I_z = I_p - I_n \quad (3)$$

โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะได้

$$V_w = V_z = I_z R_3 \quad (4)$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่ากระแส I_z จากสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (4) จะได้แรงดันที่เอาต์พุต ของวงจร CDBA ดังสมการที่ (5)

$$V_o = R_3 (I_p - I_n) \quad (5)$$

เมื่อกระแส $I_p = \frac{V_1}{R_1}$ และ $I_n = \frac{V_2}{R_2}$ แทนลงในสมการที่ (5) ดังนั้นแรงดันที่เอาต์พุต จะได้

$$V_o = R_3 \left(\frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (6)$$

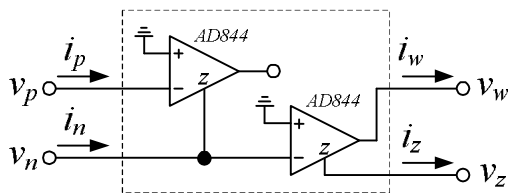
จากสมการที่ (6) เมื่อทำการกำหนดให้ $R_1 = R_2 = R$ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จะได้อัตราขยายสัญญาณโหมดผลต่าง (Differential-mode Voltage Gain: A_d) ของวงจร ดังสมการที่ (7)

$$A_d = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = \frac{R_3}{R} \quad (7)$$

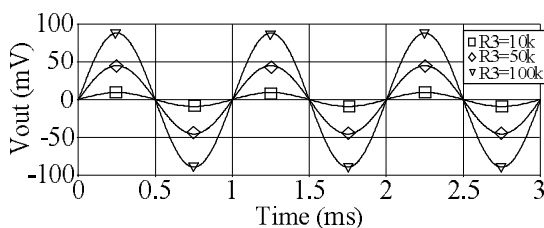
จากสมการที่ (7) จะพบว่าอัตราขยายสัญญาณ โหมดผลต่าง (A_d) ของวงจรที่นำเสนอ สามารถควบคุมได้ จากการกำหนดค่าตัวต้านทาน R_3 นั้นเอง

3. ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับโครงสร้างภายในของวงจรขยายสัญญาณเครื่องมือวัดที่ใช้ CDBA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ แสดงดังรูปที่ 1 นั้น สังเคราะห์ขึ้นมาจากวงจร CFA (Current Feedback Amplifier) เบอร์ AD844 จำนวนสองตัว ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยกำหนดให้อุปกรณ์ CDBA ทำงานที่แรงดัน $\pm 12V$ สามารถแสดงผลการทำงานได้ดังนี้



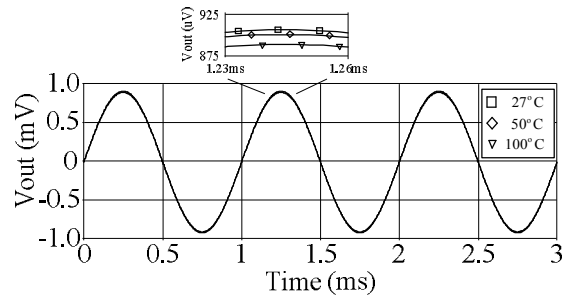
รูปที่ 3 การสังเคราะห์วงจร CDBA ที่ใช้วงจร CFA เบอร์ AD844 จำนวนสองตัว



รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางเวลาของวงจร IA เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า R_3 ไปสามค่า

รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของวงจร IA เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ขนาด 1mV ความถี่ 1kHz โดยกำหนดให้ $R=1k\Omega$ เป็นค่าคงที่ และทำการเปลี่ยนแปลงค่า R_3 เป็น 10k Ω , 50k Ω และ 100k Ω ตามลำดับ พบว่า สามารถควบคุมอัตราขยายของ

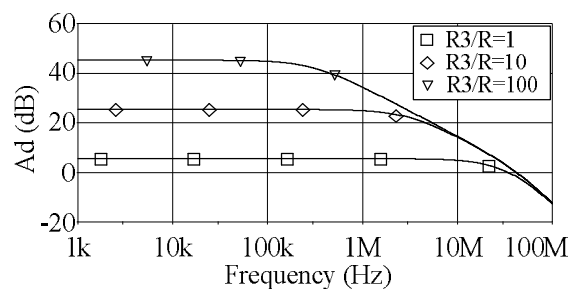
วงจรได้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน R_3 ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (7)



รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางเวลาของวงจร IA เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไป 3 ค่า

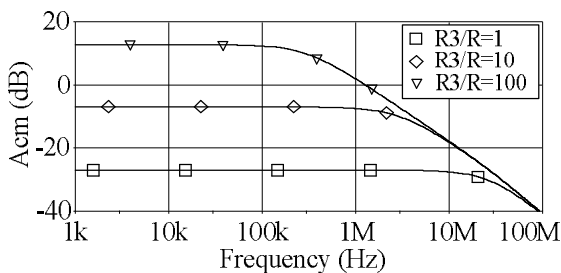
รูปที่ 5 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของวงจร IA ในรูปที่ 3 ทำการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ขนาด 1mV ความถี่ 1kHz โดยกำหนดให้ $R_3/R=1$ และทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทดสอบการทำงานไปสามค่า คือ 27 50 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราขยายสัญญาณของวงจรที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียง 0.001%/ $^{\circ}C$

รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยายสัญญาณโหมดผลต่าง (A_d) ของวงจร IA ที่นำเสนอ โดยกำหนดใช้ $R=1k\Omega$ เป็นค่าคงที่ และทำการปรับค่า R_3 เป็น 1k Ω , 10k Ω และ 100k Ω ตามลำดับ จากการกำหนดค่าอุปกรณ์ดังกล่าวทำให้ได้อัตราขยายสัญญาณโหมดผลต่าง (A_d) ในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 1, 10 และ 100 ตามลำดับ และจากผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้ในรูปที่ 4 พบว่า ที่อัตราขยาย $A_d=1$ จะมีค่าเท่ากับ 5.46dB (BW $\approx$ 50MHz) ที่อัตราขยาย $A_d=10$ มีค่าเท่ากับ 25.43dB (BW $\approx$ 10MHz) และที่อัตราขยาย $A_d=100$ มีค่าเท่ากับ 45.18dB (BW $\approx$ 2MHz) ตามลำดับ

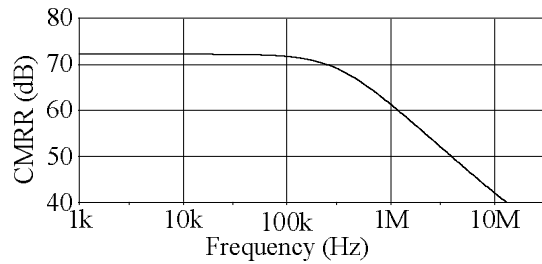


รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยาย A_d

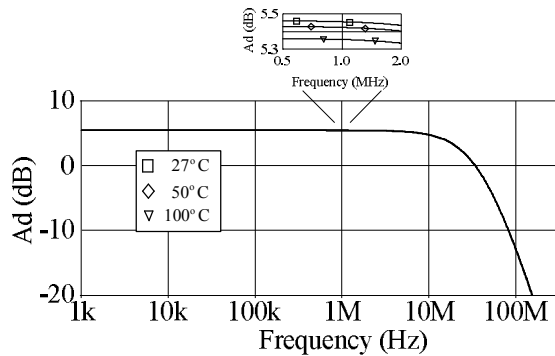
รูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยายสัญญาณโดยรวม (Acm) ของวงจร IA ที่นำเสนอ โดยกำหนดให้เลือกใช้ $R=1k\Omega$ เป็นค่าคงที่ และทำการปรับค่า R_3 เป็น $1k\Omega$, $10k\Omega$ และ $100k\Omega$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในรูปที่ 4 และจากผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้ในรูปที่ 5 พบว่า อัตราขยายสัญญาณโดยรวมของวงจรที่ 1, 10 และ 100 จะมีค่าเท่ากับ -27dB, -7dB และ 12.73dB ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยาย Acm



รูปที่ 8 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่า CMRR



รูปที่ 9 ผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยาย Ad เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไป 3 ค่า

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลการจำลองของวงจร IA ที่ผ่านมา กับวงจรที่นำเสนอ

เอกสารอ้างอิง	จำนวนอุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟที่ใช้		ค่า CMRR ของวงจร (dB)	Bandwidth (Hz)
	แอคทีฟ	พาสซีฟ		
[1]	2, 3, 4	5, 2, 6	70dB - 90dB (Ad = 1000)	100kHz
[2]	4	5	78dB - 95dB (Ad = 0-30dB)	100kHz
[3]	5	6	60dB	200kHz
[4]	2	6	76dB	185kHz
[5]	2	6	120dB	1kHz
[6]	4	2	55dB	10kHz
[7]	3	2	120dB	100kHz
[8]	2	3	40dB	2.3MHz
[9]	2	2	95dB	2kHz
[10]	3	2	70dB (Ad = 40)	100kHz
[11]	3	2	100dB (Ad = 17.8)	-
[12]	3	2	106dB (Ad = 1000)	500kHz
วงจรที่นำเสนอ	1	3	72.2dB (Ad = 100)	47.6MHz

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองผลตอบแทนทางความถี่ต่อค่า CMRR ของวงจรที่นำเสนอ จากภาพ พบว่า วงจร IA มีค่า CMRR เท่ากับ 72.2dB โดยมีค่าแบนด์วิธที่ -3dB จะได้ความถี่ประมาณ 47.6MHz

รูปที่ 9 แสดงผลตอบแทนทางความถี่ของอัตราขยายสัญญาณโหมดผลต่าง (Ad) ของวงจร IA ที่นำเสนอ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทดสอบ ไป 3 ค่า คือ 27, 50 และ 100 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ค่าอัตราขยายของวงจร มีค่า $R_3=R=1k\Omega$ พบว่า ผลตอบแทนทางความถี่ของวงจรที่นำเสนอ มีการเปลี่ยนแปลงไปเพียง 0.001%/°C

จากผลการจำลองผลตอบแทนทางความถี่ต่อค่า CMRR ของวงจรขยายสัญญาณเครื่องมือวัดโดยใช้อุปกรณ์ CDBA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่นำเสนอไปแล้วนั้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวงจรที่ได้มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ จะพบว่า ค่า CMRR ของวงจรที่นำเสนอในบทความนี้อาจจะมีค่าต่ำกว่างานวิจัยบางชิ้นงานที่ผ่านมา แต่เมื่อทำการพิจารณาในเรื่องแบนด์วิธของวงจรแล้ว จะพบว่า วงจรที่นำเสนอจะมีค่าแบนด์วิธที่สูงกว่ามาก อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อการทำงานของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย สามารถทำการสรุปเพื่อเปรียบเทียบระหว่างวงจร IA ที่ผ่านมากับวงจร IA ที่นำเสนอ ดังแสดงในตารางที่ 1

4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอ วงจรขยายสัญญาณเครื่องมือวัด โดยใช้อุปกรณ์ CDBA เพียงตัวเดียว ต่อร่วมกับตัวต้านแบบพาสซีฟจำนวน 3 ตัว จากผลการทดสอบ พบว่าค่า CMRR ของวงจรที่นำเสนอมีผลตอบแทนทางความถี่เท่ากับ 72.2dB โดยที่ค่าแบนด์วิธ -3dB จะมีความถี่ประมาณ 47.6MHz อีกทั้งยังสามารถควบคุมอัตราขยายสัญญาณโหมดผลต่าง (Ad) ได้ด้วยการกำหนดค่าที่ตัวต้านทาน R_3 ด้วยโครงสร้างวงจรที่ไม่ซับซ้อน จึงส่งผลให้วงจรที่นำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นวงจรรวมเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น ระบบเครื่องมือวัด เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Szynowski, "CMRR analysis of instrumentation amplifiers", Electron. Lett., vol.19, no.14, pp.547-549, 1983.
- [2] W. Surakamponorn, V. Riewruja, C. Surawatpunya and S.Yodladda, "Instrumentation amplifiers using operational transconductance amplifiers", Int. J. Electron., vol.71, no.3, pp.511-515, 1991.
- [3] Q. S. Zhu, F. J. Lidgey and M.A. Vere Hunt, "Improved wideband, high CMRR instrumentation amplifier", Clin. Phys. Physiol. Phys. Meas, vol.13, pp.51-55, 1992.
- [4] Y. H. Ghallab, W. Badawy, K.V.I.S. Kaler and B.J. Maundy, "A novel current-mode instrumentation amplifier based on operational floating current conveyor", IEEE Trans. Instrumen. Meas., vol. 54, no.5, pp. 1941-1949, 2005.
- [5] S. J. G. Gift, B. Maundy and F. Muddeen. "High-performance current-mode instrumentation amplifier circuit", Int. J. Electron., vol.94, no.11, pp.1015-1024, 2007.
- [6] S. Gift, "An enhanced current-mode instrumentation amplifier", IEEE Trans. Instrumen. Meas., vol.50, pp.85-88, 2001.
- [7] K. Koli and K.A.I. Halonen, "CMRR enhancement techniques for current-mode instrumentation amplifiers", IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental Theory and Applications, vol.47, no.5, pp.6220-632, 2000.
- [8] B. Wilson, "Universal conveyor instrumentation amplifier", Electron. Lett., vol.25, no.7, pp.470-471, 1989.
- [9] S. J. Azhari and H. Fazlalipoor, "A novel current mode instrumentation amplifier

- (CMIA) topology”, IEEE Trans. Instrumen. Meas., vol. 49, no.6, pp.1272-1277, 2000.
- [10] C. Galanis and I. Haritantis, “An improved current mode instrumentation amplifier”, Proc. the 3rd IEEE Int. Conf. Electronics, Circuits, and Systems, vol.1, pp.65-68, 1996.
- [11] A. A. Khan, M. A. Al-Turaigi, and M. A. Ei-Ela, “An improved current-mode instrumentation amplifier with bandwidth independent of gain”, IEEE Trans. Instrumen. Meas., vol.44, no.4, pp.887-891, 1995.
- [12] R. J. Van De Plassche, “A wide-band monolithic instrumentation amplifier”, IEEE J. Solid-State Circuits, vol.10, no.6, pp.424-431, 1975.
- [13] C. Acar and S. Ozoguz, “A new versatile building block: Current differencing buffered amplifier suitable for amplifier suitable for analog signal processing filters”, Microelectron. J., vol.30, pp.157-160, 1999.