

วงจรรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสและการประยุกต์ใช้งาน

Guidelines to develop effective management in reducing transportation cost

Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifier (CCCCTA) and Its Applications

วินัย ใจกล้า

สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: winai.ja@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้ให้ความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีชื่อว่า วงจรรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCCTA) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานได้ทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส อีกทั้งสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เมื่อนำ CCCCTA ไปออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณต่าง ๆ มีการใช้อุปกรณ์น้อยลง สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยกระแสไบอัสและสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวต้านทานในวงจรได้ ยิ่งไปกว่านั้น CCCCTA สามารถรองรับสัญญาณอินพุตและให้เอาต์พุตได้ในรูปกระแส จึงเหมาะสำหรับวงจรประมวลผลสัญญาณในโหมดกระแสที่กำลังได้รับความนิยมขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน CCCCTA ในวงจรรขยายแรงดัน วงจรรขยายกระแสและวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

คำสำคัญ : CCCII, โหมดกระแส, วงจรรขยาย, วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

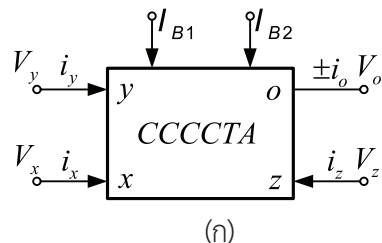
คำนำ

ในอดีตที่ผ่านมาการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์มักอยู่ในโหมดแรงดันซึ่งอุปกรณ์แอคทีฟสำเร็จรูป (Active building block) ที่ได้รับความนิยมได้แก่ ออปแอมป์ ซึ่งวงจรในโหมดแรงดันนั้นจะมีขนาดใหญ่และบริโภคกำลังงานไฟฟ้าสูง แต่ในทศวรรษที่ผ่านมา มีความพยายามที่จะลดแรงดันไฟเลี้ยง ในวงจรและระบบอิเล็กทรอนิกส์เนื่องมาจากความต้องการที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์แบบพกพา หรืออุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย ที่ต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคการทำงานในโหมดกระแส (Current-Mode) ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เมื่อเทียบกับเทคนิคการทำงานในโหมดแรงดัน ได้แก่ มีช่วงพลวัตกว้าง (Larger Dynamic Range) มีแบนด์วิธกว้าง และบริโภคกำลังงานต่ำ [1] นอกจากนี้วงจรในโหมดกระแสจะมีความซับซ้อนน้อยกว่า อีกทั้งสามารถที่จะนำสัญญาณมารวมกันได้เลยโดยไม่ต้องการรวมรวมสัญญาณ

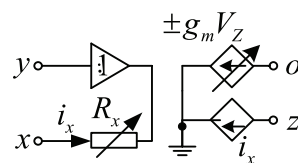
มีอุปกรณ์แอคทีฟสำเร็จรูปหลายชนิดที่สามารถทำงานในโหมดกระแสได้ เช่น วงจรขยายความนำถ่ายโอน (OTA) วงจรสายพานกระแส วงจรขยายป้อนกลับกระแส (CFA) วงจรขยายกันชนผลต่างกระแส (CDBA) วงจรขยายความนำผลต่างกระแส (CDTA) เป็นต้น ในบรรดาอุปกรณ์แอคทีฟที่ได้กล่าวมา วงจรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCCTA) [2] เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมมาก ซึ่งจะพบได้จากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการจำนวนมากที่ใช้

CCCCTA [4-7] มาออกแบบวงจร เนื่องจาก CCCCTA สามารถทำงานได้ ทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกหลายประการเช่น อัตราสูง แบนด์วิธกว้าง โครงสร้างวงจรที่ออกแบบโดย CCCCTA ไม่ซับซ้อนและสามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นการควบคุมที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะให้ความรู้เกี่ยวกับ คุณสมบัติและหลักการทำงานของ CCCCTA ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอคทีฟสมัยใหม่ที่ได้รับนิยมนิยม เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับนักออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือผู้ที่สนใจที่กำลังมองหาอุปกรณ์แอคทีฟที่มีสมรรถนะสูง นอกจากนี้แล้วยังได้นำเสนอวงจรประยุกต์ใช้งาน CCCCTA ในวงจรขยายกระแส วงจรขยายแรงดัน เพื่อเป็นตัวอย่างในการสังเคราะห์วงจรโดยใช้ CCCCTA



(ก)

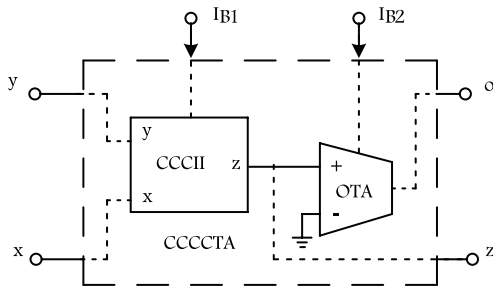


(ข)

รูปที่ 1 CCCCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

2.หลักการทำงานและโครงสร้างภายในของ CCCCTA

วงจรขยายส่งผ่านความนำสายพาน กระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifier: CCCCTA) [2] เป็น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 6 ขั้ว โดย CCCCTA ได้พัฒนามาจาก CCTA (Current Conveyor Transconductance Amplifier) ที่ได้นำเสนอ ครั้งแรกโดย Prokop ในปี ค.ศ. 2005 [3] แต่ CCCCTA จะมีคุณสมบัติพิเศษกว่า CCTA ที่ สามารถควบคุมความต้านทานแฝงที่ขั้วอินพุตได้ ด้วยกระแสไบอัสจากภายนอก ในจำนวน 6 ขั้ว ของ CCCCTA สามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่ม คือ ขั้วอินพุต 2 ขั้ว ขั้วกระแสเอาต์พุต 2 ขั้วและ ขั้วกระแสควบคุม 2 ขั้ว โดยสัญลักษณ์และวงจร สมมูลของ CCCCTA แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งการสร้าง CCCCTA เป็นการต่อ ร่วมกันระหว่าง CCCII และ OTA ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 CCCCTA สร้างมาจาก CCCII ร่วมกับ OTA

จากสัญลักษณ์ในรูปที่ 1 (ก) ขั้วอินพุต y จะมีความต้านทานสูงมาก ซึ่งเป็นขั้วที่เอาไว้อรับ อินพุตที่เป็นแรงดัน หากพิจารณาที่ขั้วอินพุต x จะมีความต้านทาน R_x ที่สามารถปรับค่าได้ โดย

ขั้ว x เหมาะที่จะป้อนอินพุตเป็นกระแส ส่วนขั้ว กระแสเอาต์พุตได้แก่ขั้ว z และขั้ว o และขั้ว กระแสควบคุมได้แก่ขั้ว I_{B1} และ I_{B2} โดยกระแสไบ อัสภายนอก I_{B1} จะใช้ควบคุมความต้านทานแฝงที่ ขั้ว x (R_x) ซึ่งสามารถดูได้ในวงจรสมมูลในรูปที่ 1 (ข) ส่วนกระแสที่ขั้ว z จะเท่ากับกระแสที่ไหลเข้า ที่ขั้ว x และกระแสที่ขั้ว o จะเป็นการส่งผ่าน ความนำถ่ายโอน (Transconductance: g_m) มาจากแรงดันที่ขั้ว z ดังนั้นที่ขั้ว z จะมีแรงดันได้ จะต้องนำโหลตจากภายนอกมาต่อ โดยค่าความ นำถ่ายโอนสามารถควบคุมได้ที่กระแสไบอัส ภายนอก I_{B2} ส่วนเครื่องหมาย $\pm$ จะเป็นตัวบอก ทิศทางของกระแสที่ขั้ว o โดยปกติจะมีทิศทาง ไหลออกจากขั้ว o ซึ่งจะแทนด้วยเครื่องหมาย บวกหรือโดยทั่วไปมักจะไม่ใช่เครื่องหมาย แต่ถ้า กระแสที่ขั้ว o มีทิศทางไหลเข้าจะแทนด้วย เครื่องหมายลบ (มักจะเขียนเครื่องหมายลบไว้ หน้าตัวอักษร o เช่น - o) และในทางอุดมคติ ความต้านทานที่ขั้ว z และขั้ว x จะมีค่าเป็น อนันต์ จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถแสดงด้วยสมการในเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_x & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

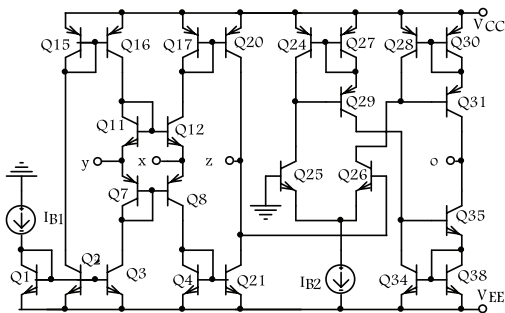
เมื่อ CCCCTA ที่มีโครงสร้างเป็น ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ (Bipolar Transistor) ความต้านทานที่ขั้ว x สามารถแสดงได้เป็น

$$R_x = \frac{V_T}{2I_{B1}} \quad (2)$$

ส่วนค่าความนำถายโอนมีค่าเท่ากับ

$$g_m = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (3)$$

เมื่อ V_T เป็นศักดาความร้อน (Thermal Voltage) ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าประมาณ 26mV จากสมการที่ (2) และ (3) พบว่าทั้งค่าความต้านทานแฝงและค่าความนำถายโอนสามารถควบคุมด้วยกระแสไบอัสหรือที่เรียกว่าการควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้แล้วเพื่อให้ CCCCTA มีความหลากหลายในการนำไปใช้งานจะพบว่ากระแสที่ขั้ว o สามารถมีหลายขั้วได้ และสามารถมีได้ทั้งสองทิศทางโครงสร้างภายในของ CCCCTA แสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างภายในของ CCCCTA

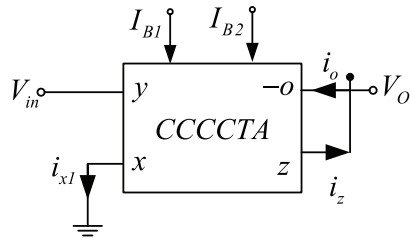
3. วงจรประยุกต์ใช้งาน CCCCTA

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของ CCCCTA ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรประยุกต์ใช้งาน CCCCTA

3.1 วงจรขยายแรงดัน

วงจรขยายแรงดันที่ใช้ CCCCTA เป็นอุปกรณ์หลักแสดงดังรูปที่ 4 ประกอบไปด้วย CCCCTA จำนวนหนึ่งตัว โดยที่ I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสไบอัสของ CCCCTA พิจารณาจากวงจรพบว่า $V_{in} = V_y$, $V_x = 0$ และทิศทางของ i_z จะไหลออกจากตัว CCCCTA เนื่องจาก V_y มีศักดีสูงกว่า V_x จึงทำให้ i_z มีทิศทางไหลออกเช่นกัน จากสมการที่ (1) จะได้

$$i_z = i_x = \frac{V_y}{R_x} = \frac{V_{in}}{R_x} \quad (4)$$



รูปที่ 4 วงจรขยายแรงดัน

พิจารณาที่โหนด V_o จะพบว่า $i_z = i_o$ แทนในสมการที่ (4) จะได้

$$i_o = \frac{V_{in}}{R_x} \quad (5)$$

จากสมการที่ (1) พบว่า $i_o = g_m V_z$ และจากวงจรในรูปที่ 4 พบว่า $V_o = V_z$ แทนลงในสมการที่ (5) จะได้

$$V_o = \frac{I}{g_m R_x} V_{in} \quad (6)$$

เมื่อ $R_x = V_T / 2I_{B1}$ และ $g_m = I_{B2} / 2V_T$ จากสมการที่ (6) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_O = \frac{4I_{B1}}{I_{B2}} V_{in} \quad (7)$$

จะเห็นได้ว่าอัตราขยายแรงดันจะมีค่าเท่ากับ

$$A_V = \frac{4I_{B1}}{I_{B2}} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) พบว่าอัตราขยายของวงจรสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแสไบแอส I_{B1} หรือ I_{B2} และยังพบได้ว่าอัตราขยายในสมการที่ (28) ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเนื่องจากไม่มีเทอมของ V_T หรือกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร อีกทั้งวงจรในรูปที่ 4 ไม่ต้องใช้ตัวต้านทานภายนอกจึงเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมและจะกินกำลังไฟฟ้าน้อยด้วย

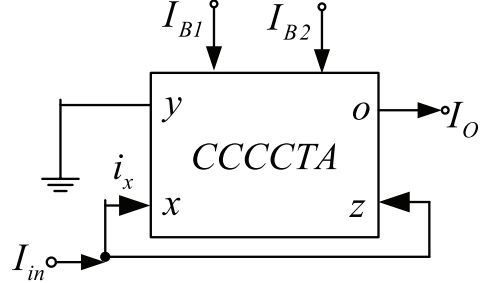
3.2 วงจรขยายกระแส

วงจรขยายแรงดันที่ใช้ CCCCTA เป็นอุปกรณ์หลักแสดงดังรูปที่ 5 ประกอบไปด้วย CCCCTA จำนวนหนึ่งตัว โดยที่ I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสไบแอสของ CCCCTA พิจารณาจากวงจรพบว่า $V_x = V_z$ ส่วน $V_y = 0$ และทิศทางของ i_x จะไหลเข้าตัว CCCCTA เนื่องจาก V_x มีศักย์สูงกว่า V_z จึงทำให้ i_x มีทิศทางไหลเข้าชนกัน จากสมการที่ (1) จะได้

$$I_O = g_m V_z = g_m V_x \quad (9)$$

ใช้ KCL เขียนสมการกระแสที่โนด V_x จะได้

$$I_{in} = i_x + i_z \quad (10)$$



รูปที่ 5 วงจรขยายกระแส

จากสมการที่ (1) พบว่า $i_z = i_o$ จะได้

$$i_x = \frac{I_{in}}{2} \quad (11)$$

ส่วนแรงดัน V_x เป็นผลคูณของ i_x กับ R_x จากสมการที่ (11) จะได้

$$V_x = \frac{R_x}{2} I_{in} \quad (12)$$

แทนสมการที่ (12) ลงในสมการที่ (9) จะได้

$$I_O = \frac{g_m R_x}{2} I_{in} \quad (13)$$

เมื่อ $R_x = V_T / 2I_{B1}$ และ $g_m = I_{B2} / 2V_T$ จากสมการที่ (13) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_O = \frac{I_{B2}}{4I_{B1}} I_{in} \quad (14)$$

จะเห็นได้ว่าอัตราขยายกระแสจะมีค่าเท่ากับ

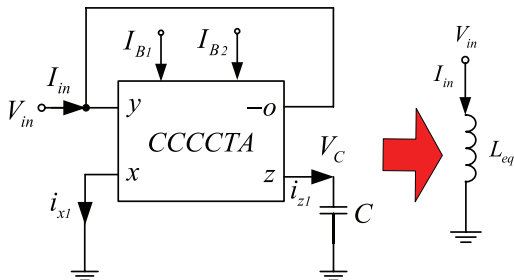
$$A_I = \frac{I_{B2}}{4I_{B1}} \quad (15)$$

จากสมการที่ (15) พบว่าอัตราขยายกระแสของวงจรสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแสไบแอส I_{B1} หรือ I_{B2} และยังพบได้ว่าอัตราขยายในสมการที่ (15) ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเนื่องจากไม่มีเทอมของ V_T หรือกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร อีกทั้งวงจรในรูปที่ 5 ไม่ต้องใช้ตัวต้านทานภายนอกจึงเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม และจะกินพลังงานไฟฟ้าต่ำด้วย

3.3 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ 6 แสดงวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำนำที่ต่อลงกราวด์ ซึ่งประกอบไปด้วย CCCCTA กับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อย่างละหนึ่งตัว โดยที่ I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสไบแอสของ CCCCTA พิจารณาจากวงจรพบว่า $V_{in} = V_y$ และ $V_C = V_z$ ทิศทางของ i_x จะไหลออกจากตัว CCCCTA จึงทำให้ i_z มีทิศทางไหลออก ส่วน i_o จะมีทิศทางไหลเข้าเนื่องจากเป็นขั้วลบ จากวงจรในรูปที่ 5 สามารถเขียนสมการกระแสที่ขั้ว z ได้เป็น

$$i_z = i_x = \frac{V_{in}}{R_x} \quad (16)$$



รูปที่ 6 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ต่อลงกราวด์

ส่วนแรงดันที่ V_C ก็คือผลคูณของกระแสที่ขั้ว z กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ นั่นคือ

$$V_C = i_z \frac{1}{sC} \quad (17)$$

แทนสมการที่ (16) ลงในสมการที่ (17) จะได้

$$V_C = \frac{V_{in}}{sCR_x} \quad (18)$$

ส่วนกระแสที่ขั้ว o เท่ากับ

$$i_o = g_m V_C \quad (19)$$

แทนสมการที่ (18) ลงในสมการที่ (19) จะได้

$$i_o = \frac{g_m V_{in}}{sCR_x} \quad (20)$$

จากวงจรในรูปที่ 6 พบว่า จากสมการที่ (20) จะได้

$$I_{in} = \frac{g_m V_{in}}{sCR_x} \quad (21)$$

จะได้ค่าอิมพีแดนซ์อินพุตเป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = s \frac{CR_x}{g_m} \quad (22)$$

จากสมการที่ (22) พบว่าเป็นเสมือนค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง ซึ่งจะได้ค่าเหนี่ยวนำเสมือน (Equivalent Inductance Value) ดังนี้

$$L_{eq} = C \frac{R_x}{g_m} \quad (20)$$

เมื่อ $R_x = V_T / 2I_{B1}$ และ $g_m = I_{B2} / 2V_T$ จากสมการที่ (20) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$L_{eq} = \frac{CV_T^2}{I_{B1}I_{B2}} \quad (21)$$

จากสมการที่ (21) วงจรในรูปที่ 6 ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ซึ่งสามารถควบคุมค่าความเหนี่ยวนำด้วยกระแสไบแอส I_{B1} และ I_{B2}

สรุป

บทความนี้นำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำไปออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส โดยอุปกรณ์ชนิดนี้ถูกเรียกว่า วงจรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส ด้วยคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมค่าความต้านทานแฝงที่ขั้วอินพุตและความนำถ่ายโอนที่เอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวต้านทานภายนอก ส่งผลให้วงจรที่ออกแบบด้วย CCCCTA ไม่ซับซ้อนซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับนักออกแบบวงจร

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Toumazou, F. J. Lidgley and D. G. Haigh. Analogue IC design: the current-mode approach, London: Peter Peregrinus, 1990.
- [2] P. Prokop, and V. Musil, “ New

modern circuit block CCTA and some its applications,” The Fourteenth International Scientific and Applied Science Conference - Electronics ET’2005, Book 5. Sofia: TU Sofia, 93-98, 2005.

- [3] M. Siripruchyanun, W. Jaikla, “Current controlled current conveyor transconductance amplifier (CCCCTA): a building block for analog signal processing,” Electrical Engineering, vol. 90, pp. 443-453, 2008.
- [4] S. V. Singh, S. Maheshwari, J. Mohan, D. S. Chauhan, “Electronically tunable current mode universal biquad filter based on the CCCCTA,” International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCOM-2009), Kottayam, kerala, India, pp. 424-429, 2009.
- [5] J. Mohan, S. Maheshwari, S. V. Singh, D. S. Chauhan, “A new TISO voltage-mode biquad filter using single CCCCTA” International conference on wireless networks & embedded systems

- (WECON-2009), pp.59-62, 2009.
- [6] S. V. Singh, S. Maheshwari, and D. S. Chauhan “Electronically tunable current/voltage mode universal biquad filter using CCCCTA,” International Journal of Recent Trends in Engineering (IJRTE), vol. 3, no. 3, pp. 71-76, 2010.
- [7] W. Jaikla, S. Siripongdee and P. Suwanjan, “MISO current-mode biquad filter with independent control of pole frequency and quality factor,” Radioengineering, vol. 21, no. 3, pp. 886-891, 2012.