

# การสังเคราะห์วงจรเสมือนอุปกรณ์แบบต่อลงกราวนด์ด้วย CCTA

## The Realization of Grounded Simulator Based-on CCTAs

อดิเรก จันตะคุณ<sup>1</sup> และสุภาพร ปานิคม<sup>1</sup>

*Received: February, 2015; Accepted: April, 2015*

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรเสมือนอุปกรณ์แบบต่อลงกราวนด์ โดยวงจรสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานแบบลบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ขึ้นอยู่กับการเลือกอุปกรณ์พาสซีฟในวงจร โครงสร้างวงจรประกอบด้วย วงจรขยายความนำถ่ายไอออนสายพานกระแส หรือ CCTA จำนวน 2 ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟต่อลงกราวนด์อีก 3 ตัว วงจรสามารถปรับค่าของอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับกระแสไบแอสของ CCTA อีกทั้งการทำงานของวงจรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม วงจรจึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารและสร้างเป็นวงจรรวม นอกจากนี้ได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานของวงจรเสมือนอุปกรณ์ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ผลการจำลองการทำงานของวงจรเสมือนอุปกรณ์ด้วยโปรแกรม PSPICE พบว่าสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : ตัวเก็บประจุ; ตัวเหนี่ยวนำ; ตัวต้านทานแบบลบที่ขึ้นอยู่กับความถี่; วงจรขยายความนำถ่ายไอออนสายพานกระแส; CCTA

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น  
E-mail: adirek.ja@rmuti.ac.th

## Abstract

This article presents the realization of grounded simulators that can function as capacitance, inductance and frequency dependent negative resistance. The function of circuits depend on chosen passive elements. The proposed simulators are provided 2 current conveyor transconductance amplifier or CCTA and 3 grounded passive elements. Furthermore, the proposed circuits not only can be electronically controlled with bias current of CCTAs but also temperature-insensitive. Therefore, these circuits are suitable for IC architecture and are used in communication system. The low-pass filter as an application example is included. The results of PSPICE simulation are accordant with theoretical analysis as well.

**Keywords:** Capacitance; Inductance; Frequency Dependent Negative Resistance; Current Conveyor Transconductance Amplifier; CCTA

## บทนำ

การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเสมือนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน อันได้แก่ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานแบบลบที่ขึ้นอยู่กับความถี่หรือ FDNR เป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจและตีพิมพ์จำนวนมาก เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองความถี่ (Abuelma'atti, M. T. and Tasadduq, N. A., 1999; Cam, U. et al., 2001; Hou, C. L. and Wang, W. Y., 1998; Yuce, E., 2006; Yuce, E., 2007; Tangsrirat, W., 2013) วงจรกำเนิดสัญญาณชายนีได้ (Psychalinos, C. et al., 2008; Saad, R. A. and Soliman, A. M., 2010; Sagbas, M. et al., 2009; Pal, K., 2004; Yuce, E. et al., 2006) และมีข้อดีที่ว่าอุปกรณ์พาสซีฟ (Passive) ธรรมดา คือ สามารถปรับค่าอุปกรณ์ได้ง่ายและสะดวก อีกทั้งเป็นที่ทราบกันดีว่า อุปกรณ์พาสซีฟธรรมดา เช่น ตัวเหนี่ยวนำที่เป็นขดลวด มักมีน้ำหนักมาก มีขนาดใหญ่ และไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ง่าย จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานและไม่เหมาะสมในการพัฒนาวงจรผู้สร้างวงจรรวม (IC) (Abuelma'atti, M. T. and Tasadduq, N. A., 1999; Cam, U. et al., 2001; Hou, C. L. and Wang, W. Y. et al., 1998; Yuce, E., 2006; Saad, R. A. and Soliman, A. M., 2010; Yuce, E. et al., 2006; Yuce, E., 2007;) ส่วนตัวเก็บประจุนั้นเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญในวงจรรวมแอนะล็อก (Analog) และมีหลายวงจรที่ต้องการตัวเก็บประจุที่มีค่าสูง เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) วงจรเรโซแนนท์ (Resonant) วงจรสุ่มตัวอย่างข้อมูล (Sampled - data) เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะสามารถสร้างตัวเก็บประจุในวงจรรวมด้วยเทคโนโลยีซีมอส (CMOS) ได้ แต่ก็ยังมีค่าความจุที่ต่ำ และกระบวนการสร้างก็ยังซับซ้อน (Ayten, U. E. et al., 2012; Jaikla, W. and Siriprachayanun, M., 2007; Myderrizi, I. and Zeki, A., 2014) ดังนั้นวงจรเสมือนจึงเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถเพิ่มค่าหรือคูณค่าความจุ ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นได้ตามต้องการ (Abuelma'atti,

M. T. and Tasadduq, N. A., 1999; Ayten, U. E. et al., 2011; Cam, U. et al., 2000; Cam, U. et al., 2001; Cam, U. et al., 2004; Cicekoglu, O. et al., 2001; Hou, C. L. and Wang, W. Y. et al., 1998; Saad, R. A. and Soliman, A. M., 2010; Sagbas, M. et al., 2009; Yuce, E. et al., 2006;)

FDNR (Frequency Dependent Negative Resistance) หรือตัวต้านทานแบบลบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ที่มีความสนใจในการวิจัยและพัฒนา ทั้งนี้เพราะ FDNR สามารถนำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำได้ดี (Abuelma'atti, M. T. and Tasadduq, N. A., 1999; Ayten, U. E. et al., 2011; Ayten, U. E. et al., 2012; Cam, U. et al., 2004; Jaikla, W. and Siripruchayanun, M., 2007; Pal, K., 2004; Yuce, E. et al., 2006) โดยเฉพาะในวงจรกรองความถี่ ดังรูปที่ 1 (ก) ที่สามารถนำเอา FDNR มาประยุกต์ใช้ในรูปแบบที่ 1 (ข) จะเห็นได้ว่าตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) จะถูกเปลี่ยนเป็นตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และ FDNR ตามลำดับ ด้วยการคูณ  $k/s$  เข้ากับอุปกรณ์พาสซีฟ ดังแสดงในรูปที่ 2

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเสมือนอุปกรณ์พบว่า มีผู้วิจัยและนำเสนอผลงานวิจัยจำนวนมาก โดยแต่ละวงจรใช้อุปกรณ์แอคทีฟ (Active) ที่แตกต่างกันไป และยังมีพบว่หลาย ๆ งานวิจัย ยังมีข้อบกพร่องดังต่อไปนี้

1. ใช้อุปกรณ์แอคทีฟหรือพาสซีฟจำนวนมาก (Abuelma'atti, M. T. and Tasadduq, N. A., 1999; Cam, U. et al., 2001; Pal, K., 2004; Yuce, E., 2006) ทำให้โครงสร้างวงจรมีขนาดใหญ่
2. ไม่สามารถปรับหรือควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Cam, U. et al., 2000; Cam, U. et al., 2001; Cicekoglu, O. et al., 2001; Hou, C. L. and Wang, W. Y. et al., 1998; Jaikla, W. and Siripruchayanun, M., 2007; Pal, K., 2004; Psychalinos C. et al., 2008; Saad, R. A. and Soliman, A.M., 2010; Yuce, E. et al., 2006; Yuce, E., 2007) ทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้งานในระบบอัตโนมัติได้
3. ใช้ตัวต้านทานและ/หรือตัวเก็บประจุแบบลอย (Cam, U. et al., 2004; Myderrizi, I. and Zeki, A., 2014; Psychalinos, C. et al., 2008; Saad, R. A. and Soliman, A. M., 2010; Yuce, E. et al., 2006;) ทำให้เมื่อนำวงจรไปสร้างเป็นวงจรรวมต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่
4. การทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (Abuelma'atti, M. T. and Tasadduq, N. A., 1999; Sagbas, M. et al., 2009; Tangsrirat, W., 2013; Yuce, E., 2006; Yuce, E. et al., 2006) หากนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารจะทำให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพ

จากเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์วงจรเสมือนอุปกรณ์แบบต่อลงกราวนด์ที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และ FDNR โดยวงจรที่นำเสนอมีข้อดีหลายประการ ได้แก่

1. สามารถเลือกการทำงานของวงจรได้จากอุปกรณ์พาสซีฟ และไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวงจร
2. โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย CCTA จำนวน 2 ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟต่อลงกราวนด์ 3 ตัว ทำให้เหมาะแก่การพัฒนาวงจรสู่วงจรรวม

3. วงจรเสมือนสามารถปรับ/ควบคุมค่าของอุปกรณ์ได้ด้วยกระแสไบแอสของ CCTA ทำให้ง่ายและสะดวกต่อการประยุกต์ใช้งาน

4. การทำงานของวงจรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม จึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกหรือในระบบสื่อสาร

การสังเคราะห์วงจรด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor) และจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE แสดงให้เห็นสมรรถนะการทำงานของวงจรได้เป็นอย่างดี

### หลักการของวงจรเสมือนอุปกรณ์

#### วงจรขยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแส

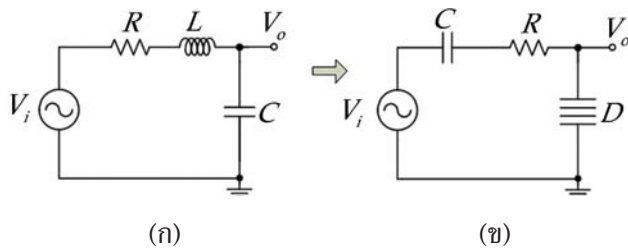
เนื่องจากอุปกรณ์แอกทิฟที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรคือ วงจรขยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแส (Current Conveyor Transconductance Amplifier) หรือ CCTA ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็คทรอนิกส์สมัยใหม่ที่วิจัยและนำเสนอโดย Prokop และ Musil (Prokop, R. and Musil, V., 2005) ในปี 2005 โดยสามารถทำงานได้ทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส และมีข้อดีหลายประการ เช่น มีอัตราสูงสูง แบนด์วิดท์กว้าง พิสัยพลวัตกว้าง มีความเป็นเชิงเส้นดี อีกทั้งกระแสเอาต์พุตสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอส จากข้อดีของ CCTA ดังที่กล่าวมา จึงเป็นเหตุผลที่เลือกใช้ CCTA ในการสังเคราะห์วงจร และสามารถแสดงสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CCTA ได้ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) ส่วนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ CCTA แสดงให้เห็นด้วยสมการเชิงเมตริกดังนี้

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

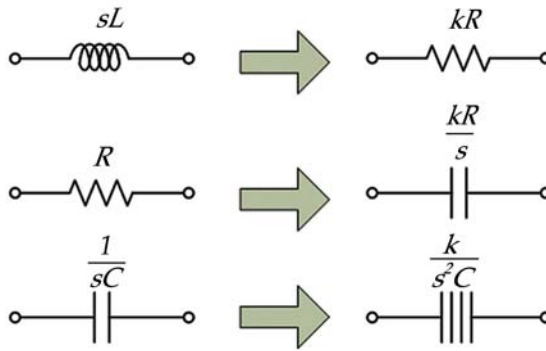
เมื่อ  $g_m$  คือ ค่าความนำถ่ายโอน (Transconductance Gain) และถ้าโครงสร้างของ CCTA สร้างด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ค่าความนำถ่ายโอนหรือ  $g_m$  จะมีค่าเท่ากับ

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (2)$$

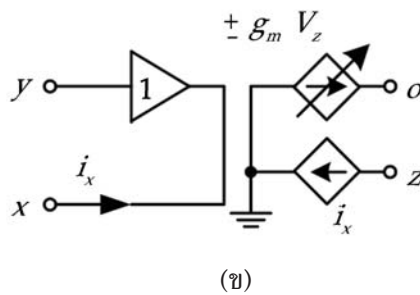
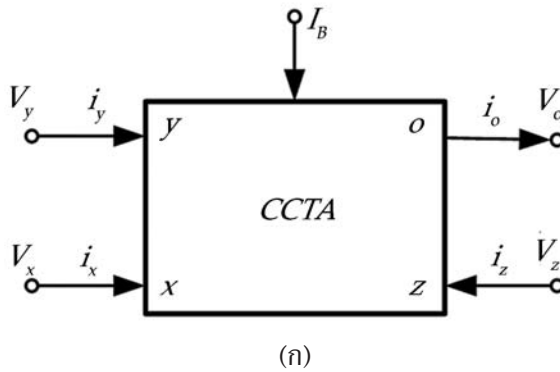
โดยที่  $V_T$  คือ ค่าศักดาความร้อน (Thermal Voltage) ปกติจะมีค่าเท่ากับ 26mV ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ส่วน  $I_B$  คือ กระแสไบแอสจากภายนอกของ CCTA ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่า  $g_m$  สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอสจากภายนอก



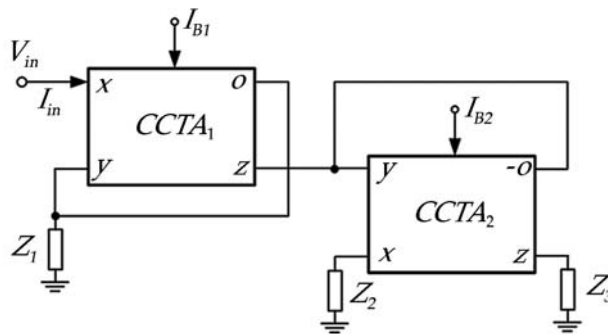
รูปที่ 1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



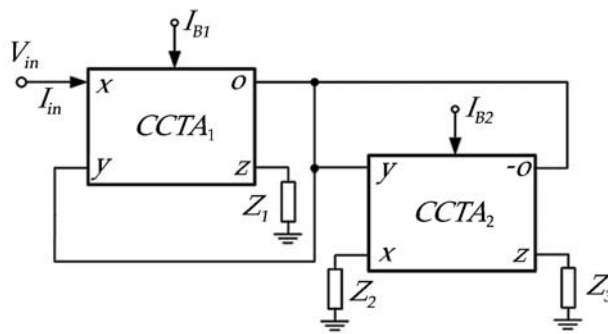
รูปที่ 2 ขั้นตอนแปลงอุปกรณ์ (Vladimir, I. P. and Michael, M. G., 1994)



รูปที่ 3 CCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 วงจรเสมือนอุปกรณ์ที่นำเสนอ

### วงจรเสมือนอุปกรณ์ที่นำเสนอ

วงจรเสมือนอุปกรณ์ที่สังเคราะห์ แสดงได้ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าโครงสร้างของวงจรประกอบด้วย CCTA จำนวน 2 ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟต่อลงกราวนด์ 3 ตัว ทั้งนี้สามารถเลือกใช้งานได้ทั้งสองวงจร เนื่องจากทั้งสองวงจรมีคุณสมบัติเดียวกัน จากคุณสมบัติของ CCTA ที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้สามารถสังเคราะห์หาสมการอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของวงจรเสมือนอุปกรณ์ทั้งสองวงจรได้คือ

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{g_{m1}}{g_{m2}} \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \quad (3)$$

ดังจะเห็นว่าวงจรเสมือนอุปกรณ์ในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) มีสมการอินพุตอิมพีแดนซ์เดียวกัน และเพื่อให้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์กระชับและเข้าใจง่ายขึ้น แทนค่า  $g_m$  จากสมการ (2) ลงในสมการ (3) จะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์ใหม่เป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \quad (4)$$

จากสมการ (4) พบว่าไม่มีเทอมของ  $V_T$  แสดงให้เห็นได้ว่า วงจรทำงานโดยไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม อีกทั้งจะเห็นได้ว่าวงจรทั้งสอง สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสไบแอสของ CCTA ( $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$ )

เมื่อพิจารณาสมการ (4) วงจรเสมือนอุปกรณ์จะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และ FDNR ขึ้นอยู่กับการเลือกอุปกรณ์พาสซีฟ  $Z_1$ ,  $Z_2$  และ  $Z_3$  โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. จากวงจรเสมือนอุปกรณ์ในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ถ้าเลือก  $Z_1 = 1/sC_1$ ,  $Z_2 = R_2$  และ  $Z_3 = R_3$  วงจรจะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ นั่นคือจะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} \frac{R_2}{sC_1R_3} = \frac{1}{sC_{eq}} \quad (5)$$

โดยมีค่าความจุ คือ  $C_{eq} = I_{B2}C_1R_3 / I_{B1}R_2$

2. จากวงจรเสมือนอุปกรณ์ในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ถ้าเลือก  $Z_1 = R_1$ ,  $Z_2 = 1/sC_2$  และ  $Z_3 = R_3$  วงจรจะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ นั่นคือจะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} \frac{R_1}{sC_2R_3} = \frac{1}{sC_{eq}} \quad (6)$$

โดยมีค่าความจุ คือ  $C_{eq} = I_{B2}C_2R_3 / I_{B1}R_1$

3. จากวงจรเสมือนอุปกรณ์ในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ถ้าเลือก  $Z_1 = R_1$ ,  $Z_2 = R_2$  และ  $Z_3 = 1/sC_3$  วงจรจะทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ นั่นคือจะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} sR_1R_2C_3 = sL_{eq} \quad (7)$$

โดยมีค่าความเหนี่ยวนำ คือ  $L_{eq} = I_{B1}C_3R_1R_2 / I_{B2}$

4. จากวงจรเสมือนอุปกรณ์ในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ถ้าเลือก  $Z_1 = 1/sC_1$ ,  $Z_2 = 1/sC_2$  และ  $Z_3 = R_3$  วงจรจะทำหน้าที่เป็น FDNR แบบต่อลงกราวด์ นั่นคือจะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} \frac{1}{s^2C_1C_2R_3} = \frac{1}{s^2D_{eq}} \quad (8)$$

โดยมีค่าความต้านทาน คือ  $D_{eq} = I_{B2}C_1C_2R_3 / I_{B1}$

### การวิเคราะห์วงจรกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติ

การวิเคราะห์วงจรในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติ โดยปกติจะวิเคราะห์ถึงความผิดพลาดของ CCTA ที่เกิดจากความผิดพลาดของการส่งผ่าน (Tracking Error) กระแสและแรงดันของ CCTA ที่เบี่ยงเบนไปจาก 1 โดยสามารถแสดงสมการคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ CCTA ในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติได้ คือ

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm \beta g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ ความผิดพลาดของการส่งผ่านแรงดันจากขั้ว y ไปยังขั้ว x ส่วน  $\alpha$  คือ ความผิดพลาดของการส่งผ่านกระแสจากขั้ว x ไปยังขั้ว z และ  $\beta$  คือ ความผิดพลาดของการส่งผ่านความนำถ่ายโอนจากขั้ว z ไปยังขั้ว o ซึ่งความผิดพลาดของการส่งผ่านที่เกิดขึ้นนี้ จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ความถี่ที่ใช้งาน และอุณหภูมิ ดังนั้นจากสมการ (9) จะทำให้สามารถสังเคราะห์ทาสสมการอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเสมือนอุปกรณ์ทั้งสองได้ใหม่เป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} \frac{\gamma_1 \alpha_1 \beta_1 Z_1 Z_2}{\gamma_2 \alpha_2 \beta_2 Z_3} \quad (10)$$

### ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวงจรเสมือนอุปกรณ์

เพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรเสมือนอุปกรณ์สามารถประยุกต์ใช้งานได้ จึงยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน FDNR ในวงจรกรองความถี่ในรูปที่ 1 (ข) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) อันดับ 2 โดยสามารถวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของวงจรกรองความถี่ในรูปที่ 1 (ข) ได้เป็น

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^2 + s \frac{1}{CR} + \frac{1}{DR}} \quad (11)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้ความถี่โพล (Pole Frequency) ( $\omega_p$ ) เป็น

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{DR}} \quad (12)$$

แทนค่า FDNR จากสมการ (8) ลงในสมการ (12) จะได้ความถี่โพล คือ

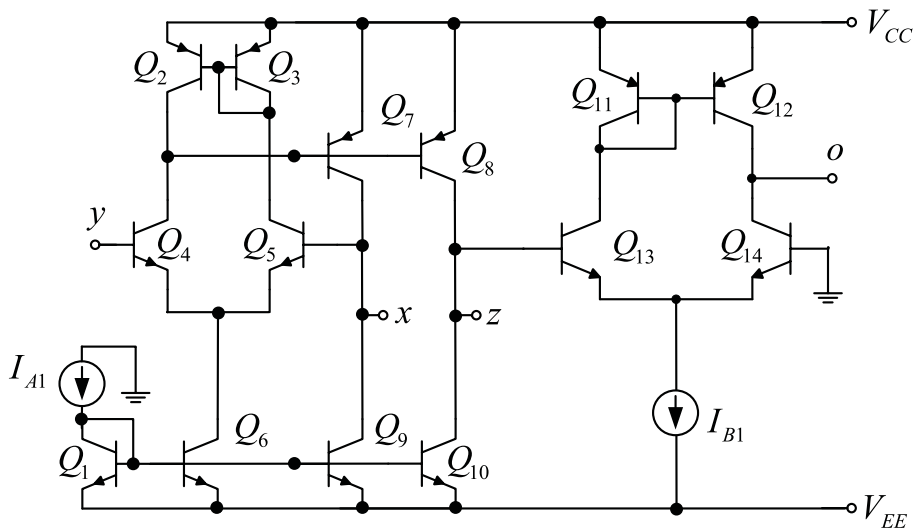


$$\omega_p = \sqrt{\frac{I_{B1}}{I_{B2}C_1C_2R_3R}} \quad (13)$$

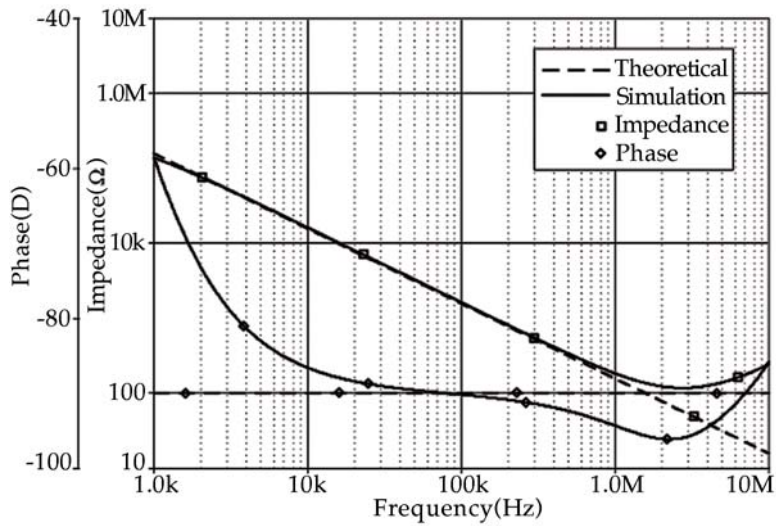
จากสมการ (13) พบว่าความถี่โพลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้น สามารถปรับความถี่ได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานของ FDNR โดยการปรับกระแสไบแอส  $I_{B1}$  และ/หรือ  $I_{B2}$  นั้นเอง

### ผลการจำลองการทำงานของวงจรเสมือนอุปกรณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

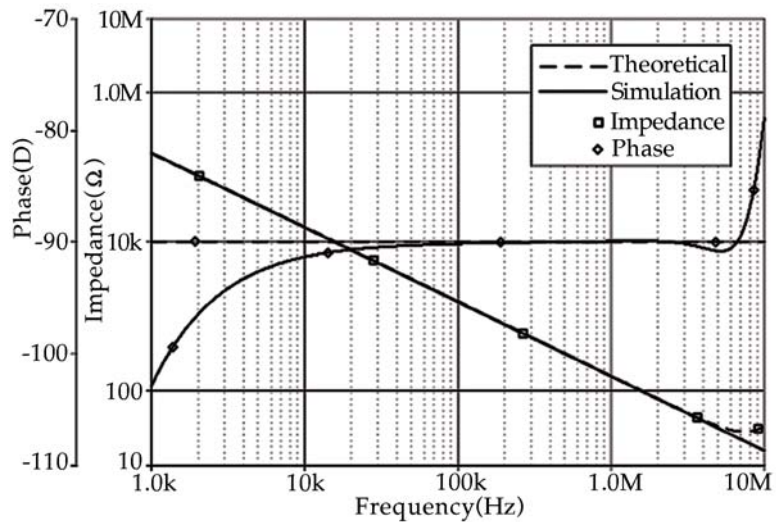
การจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอด้วยโปรแกรม PSPICE จะเป็นการยืนยันถึงทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา พร้อมทั้งเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรที่ได้นำเสนอ โดยใช้วงจรในรูปที่ 4 (ข) สาธิตการทำงานของวงจร และใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN จากเบอร์ PR200 และ NR200 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 (Srisakolteaw, S. et al, 2013) ส่วนโครงสร้างภายในของ CCTA ที่ใช้ในการจำลองการทำงานได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 และกำหนดให้ CCTA ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงขนาด  $\pm 1.5V$  และได้กำหนดกระแสไบแอสของ CCTA ให้มีค่าเท่ากันทั้งหมด คือ  $I_{A1} = I_{A2} = I_{B1} = I_{B2} = 50\mu A$



รูปที่ 5 โครงสร้างภายในของ CCTA



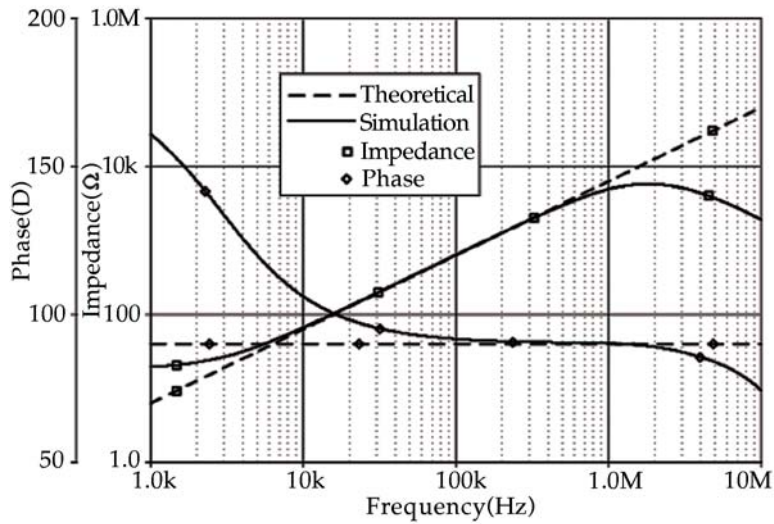
รูปที่ 6 อิมพีแดนซ์และเฟส เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ กรณีที่ 1



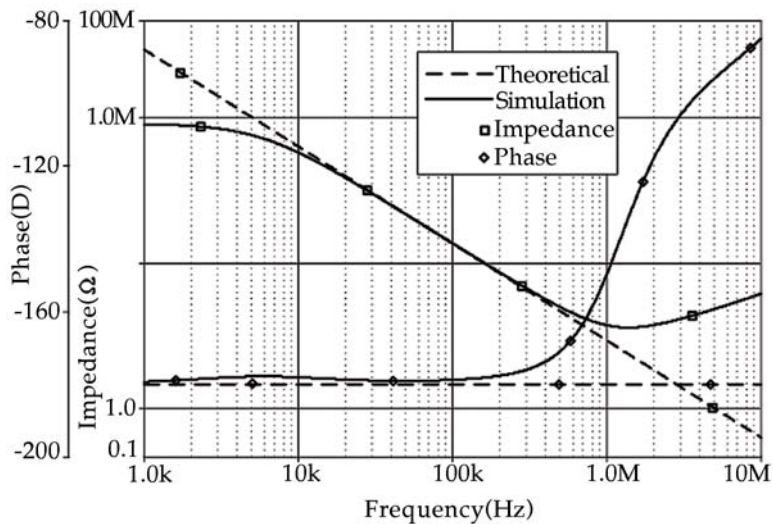
รูปที่ 7 อิมพีแดนซ์และเฟส เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ กรณีที่ 2

รูปที่ 6 แสดงอิมพีแดนซ์และเฟสจากผลการจำลองการทำงานของวงจรเสมือน เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ ในกรณีที่ 1 โดยกำหนด  $C_1 = 1nF$  และ  $R_2 = R_3 = 1k\Omega$  พบว่าผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการ (5)

ส่วนรูปที่ 7 เป็นอิมพีแดนซ์และเฟสของวงจรเสมือน เมื่อจำลองการทำงานของวงจร ในกรณีที่ 2 เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ โดยกำหนด  $R_1 = 1k\Omega$ ,  $C_2 = 1nF$  และ  $R_3 = 1k\Omega$  จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานเป็นไปตามทฤษฎีที่วิเคราะห์ไว้ในสมการ (6)



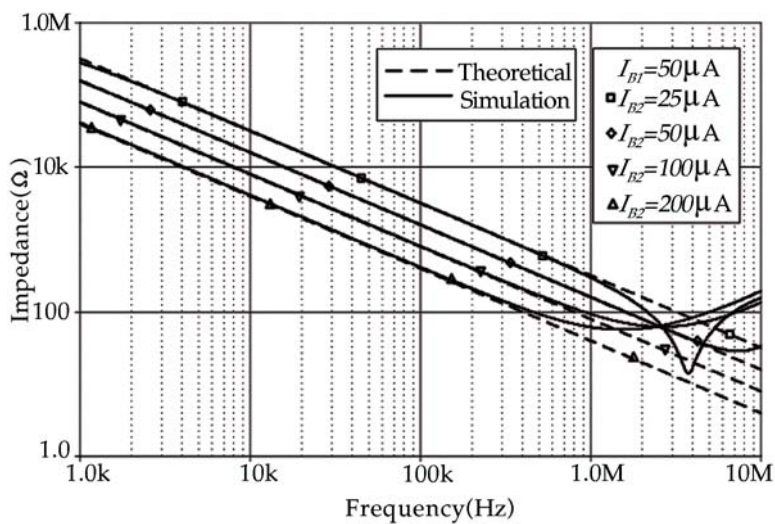
รูปที่ 8 อิมพีแดนซ์และเฟส เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ กรณีที่ 3



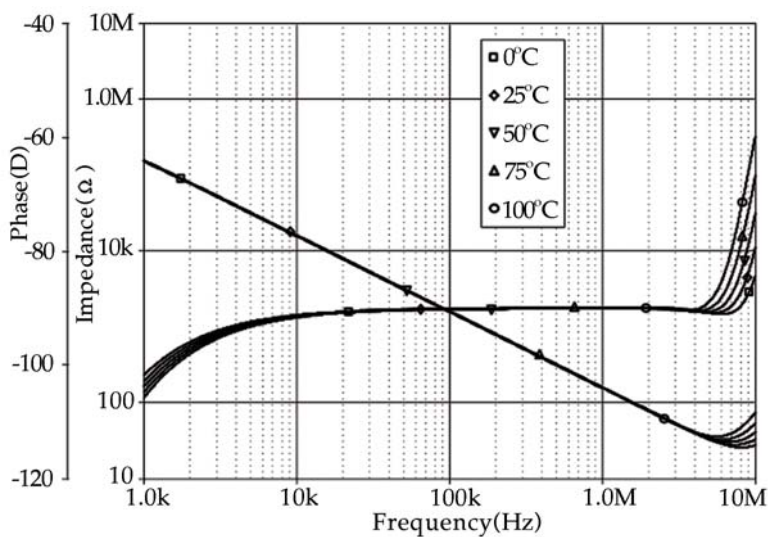
รูปที่ 9 อิมพีแดนซ์และเฟส เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็น FDNR กรณีที่ 4

รูปที่ 8 เป็นผลการจำลองการทำงานเทียบกับทฤษฎีในสมการ (7) เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ ในกรณีที่ 3 โดยกำหนด  $R_1 = R_2 = 1k\Omega$  และ  $C_3 = 1nF$  จะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์และเฟสมีความสอดคล้องกับทฤษฎี

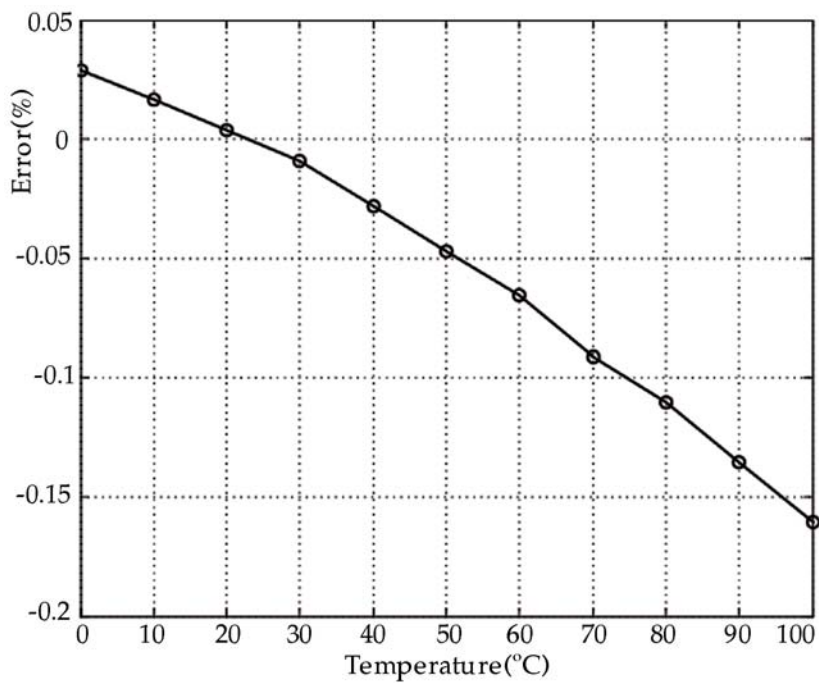
สำหรับรูปที่ 9 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรเทียบกับทฤษฎี เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็น FDNR แบบต่อลงกราวด์ในกรณีที่ 4 โดยกำหนด  $C_1 = C_2 = 1nF$  และ  $R_3 = 1k\Omega$  พบว่าอิมพีแดนซ์และเฟสสอดคล้องกับทฤษฎี



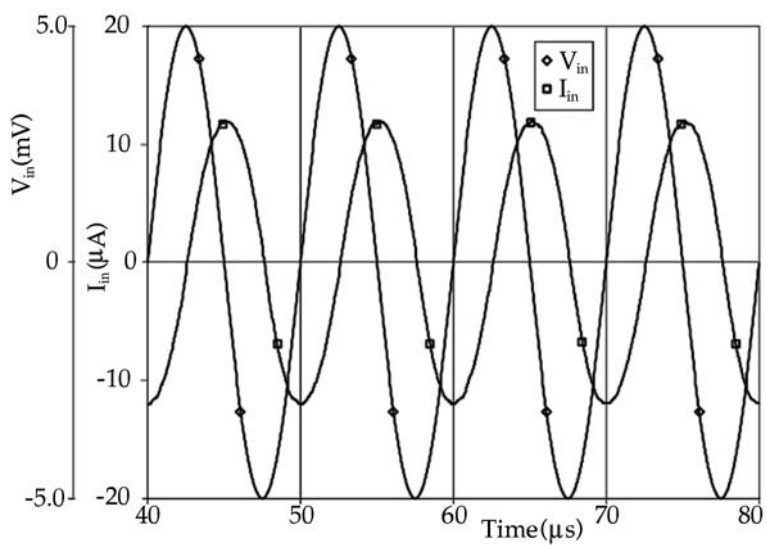
รูปที่ 10 สถิติการปรับค่าตัวเก็บประจุด้วยกระแสไบแอส  $I_{B2}$



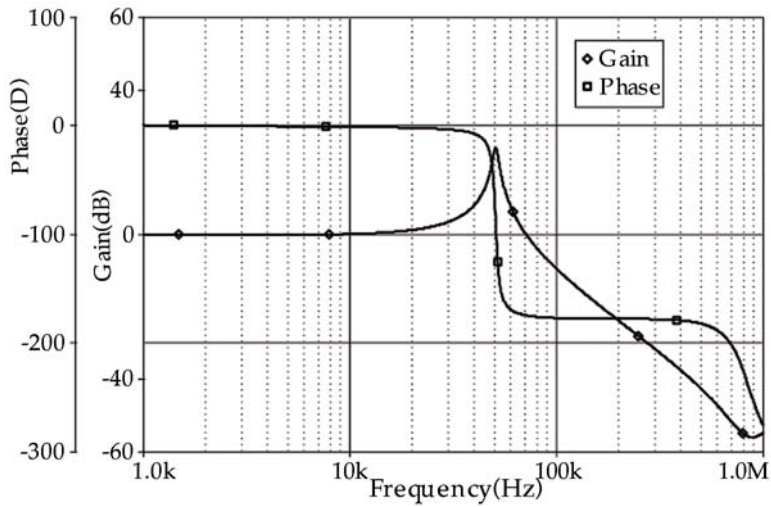
รูปที่ 11 สถิติการทำงานของวงจร เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง



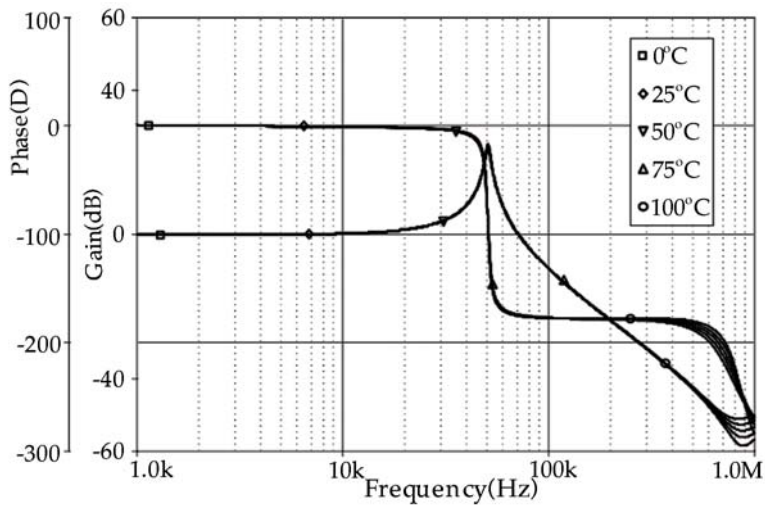
รูปที่ 12 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุปกรณ์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 13 สาคิตการทำงานในโดเมนเวลา



รูปที่ 14 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 15 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การสาธิตการปรับค่าอุปกรณ์ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยปรับกระแสไบแอสของ CCTA ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 10 เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ในกรณีที่ 2 โดยการปรับกระแสไบแอส,  $I_{B2}=25\mu A$   $50\mu A$   $100\mu A$  และ  $200\mu A$  ทำให้ค่าความจุของวงจรเปลี่ยนเป็น 0.5nF 1nF 2nF และ 4nF ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีมาก

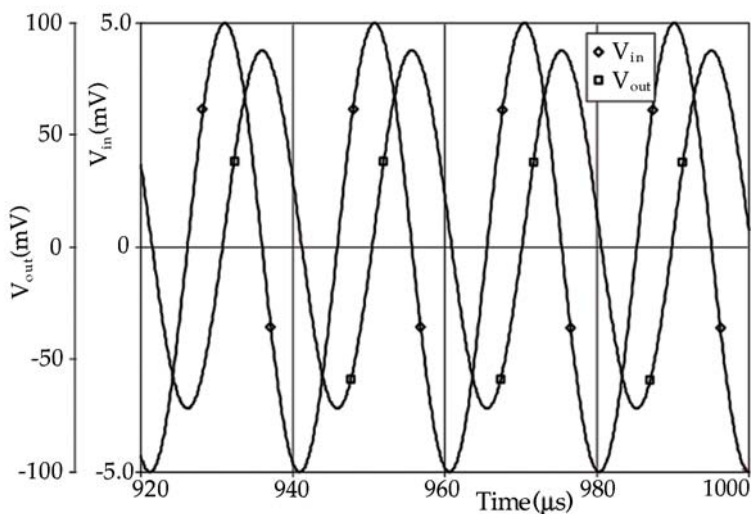
จากการสังเคราะห์สมการ (4) จะเห็นได้ว่าการทำงานของวงจรจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จึงทำการสาธิตการทำงานของวงจรที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ในกรณีที่ 2 โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมเป็น  $0^{\circ}C$   $25^{\circ}C$   $50^{\circ}C$   $75^{\circ}C$  และ  $100^{\circ}C$  ผลการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 11 พบว่าการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย

ดังนั้นจึงทำการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุปกรณ์ เมื่อวงจรทำงานในอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันตั้งแต่  $0^{\circ}\text{C}$  -  $100^{\circ}\text{C}$  แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 12 โดยพบว่าที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพียง 0.02% และที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพียง -0.16% โดยจากผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำมาก ๆ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่วิเคราะห์ไว้ดังสมการที่ (4) เป็นอย่างดี

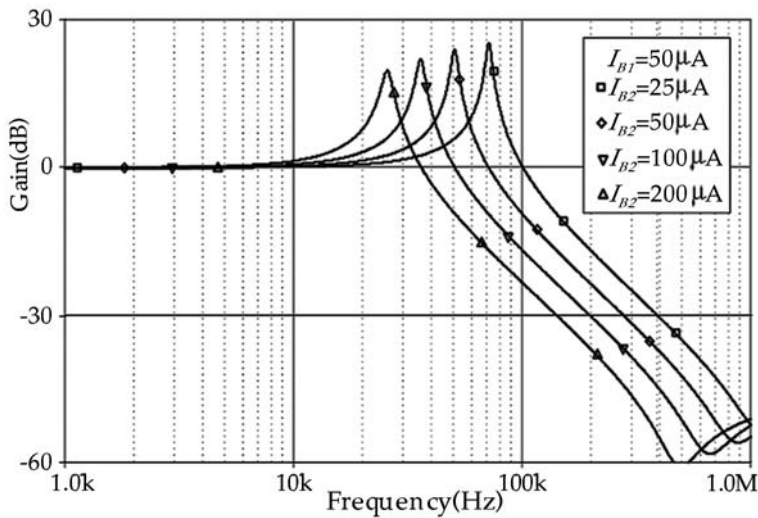
ส่วนการทำงานของวงจรในโดเมนเวลา (Time Domain) นั้น ได้ยกตัวอย่างเมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ในกรณีที่ 1 โดยปรับกระแสไบแอส  $I_{B1}=50\mu\text{A}$   $I_{B2}=200\mu\text{A}$  และป้อนสัญญาณชานน์ความถี่ 100kHz ขนาดของแอมพลิจูด (Amplitude) เท่ากับ  $10\text{mV}_{\text{pp}}$  เข้าที่วงจรเสมือน ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 13 โดยพบว่ากระแส  $I_{in}$  มีเฟสล่าช้าหลังจาก  $V_{in}$  ประมาณ  $90^{\circ}\text{C}$  ซึ่งบ่งบอกได้ว่าวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุได้จริง

ส่วนการประยุกต์ใช้งาน FNDR ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้น จากวงจรในรูปที่ 1 (ข) กำหนดให้ตัวเก็บประจุ (C) มีค่า  $10\text{nF}$  ตัวต้านทาน (R) มีค่า  $10\text{k}\Omega$  และ FNDR มีส่วนประกอบของอุปกรณ์และกระแสไบแอสตามที่กำหนดไว้ดังที่ผ่านมา สามารถแสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ในรูปที่ 14

ต่อมาหาก FNDR มีการทำงานไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแล้ว วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก็ต้องไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเช่นกัน ดังนั้นจึงจำลองการทำงานด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการทำงานเป็น  $0^{\circ}\text{C}$   $25^{\circ}\text{C}$   $50^{\circ}\text{C}$   $75^{\circ}\text{C}$  และ  $100^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ จากรูปที่ 15 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิจริง



รูปที่ 16 การทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในโดเมนเวลา



รูปที่ 17 สาคิตการปรับความถี่โพล ด้วยกระแสไบแอส

ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในโดเมนเวลา โดยป้อนสัญญาณไซน์ ความถี่ 50.75kHz ขนาดของสัญญาณ 10mV<sub>P-P</sub> เข้าที่อินพุตวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน สามารถแสดง การทำงานของวงจรได้ในรูปที่ 16

การสาคิตการปรับความถี่โพลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยกระแสไบแอส ดังสมการ (13) ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 17 ด้วยการปรับกระแสไบแอส  $I_{B2} = 25 \mu A$   $50 \mu A$   $100 \mu A$  และ  $200 \mu A$  ตามลำดับ นั้นคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถปรับความถี่โพลได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแส ไบแอสของ CCTA ได้จริง

### สรุปผลการดำเนินการ

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรเสมือนอุปกรณ์ด้วย CCTA จำนวน 2 วงจร โดยวงจรมีคุณสมบัติเหมือนกัน คือ มีโครงสร้างวงจรประกอบด้วย CCTA จำนวน 2 ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวด์อีก 3 ตัว วงจรสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และ FDNR ได้ ด้วยการเลือกอุปกรณ์พาสซีฟ ในวงจร อีกทั้งสามารถปรับค่าของอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแสไบแอสของ CCTA และการทำงานของวงจรมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน FDNR ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ทำให้วงจรกรองความถี่สามารถปรับความถี่โพลได้ด้วยวิธี ทางอิเล็กทรอนิกส์และการทำงานไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ผลการจำลองการทำงานของวงจรเสมือน ด้วยโปรแกรม PSPICE แสดงให้เห็นได้ว่าวงจรทำงานสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้เป็นอย่างดี และพบว่าวงจรมีอัตราบริโภคพลังงานเพียง 1.32mW นอกจากนี้แล้วผลการทดสอบการทำงานของวงจร ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยคือ 0.02% และ -0.16% ที่อุณหภูมิ 0°C และ 100°C วงจรเสมือนจึงเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ในระบบสื่อสารหรือระบบประมวลผลสัญญาณ แอนะล็อกและพัฒนาลู่การสร้างวงจรรวม



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์ ที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้ในการทำวิจัยและเทคนิคการเขียนบทความวิจัย

## References

- Abuelma'atti, M. T. and Tasadduq, N. A. (1999). Electronically tunable capacitance multiplier and frequency-dependent negative-resistance simulator using the current-controlled current conveyor. *Microelectronics Journal*. Vol. 30. pp. 689-873
- Ayten, U. E., Sagbas, M., Herencsar, N. and Koton, J. (2011). Novel floating FDNR, inductor and capacitor simulator using CBTA. *International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) 2011 34<sup>th</sup>*. Istanbul, Turkey, 18-20 Aug. pp. 312-316
- Ayten, U. E., Sagbas, M., Herencsar, N. and Koton, J. (2012). Novel floating general element simulator using CBTA. *Radioengineering*. Vol. 21. No. 1. pp. 11-19
- Cam, U., Cicekoglu, O. and Kuntman, H. (2000). Universal series and parallel immittance simulators using four terminal floating Nullors. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. Vol. 25. pp. 59-66
- Cam, U., Cicekoglu, O. and Kuntman, H. (2001). Novel lossless floating immittance simulator using only two FTFNs. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. Vol. 29. pp. 233-235
- Cam, U., Kacar, F., Cicekoglu, O., Kuntman, H. and Kuntman, A. (2004). Novel two OTRA-Based grounded parallel immittance simulator topologies. *Analog Integrated Circuit and Signal Processing*. Vol. 39. pp. 169-175
- Cicekoglu, O., Toker, A. and Kuntman, H. (2001). Universal immittance function simulator using current conveyors. *Computer and Electrical Engineering*. Vol. 27. pp. 227-238
- Hou, C. L. and Wang, W. Y. (1998). Realization of floating immittance function simulators using CCII+. *Microelectronics Journal*. Vol. 29. No. 1-2. pp. 59-63
- Jaikla, W. and Siriprachayanun, M. (2007). Realization of current conveyor-based floating simulator employing grounded passive elements. *The Proceeding of ECTI con 2007, The 3<sup>rd</sup> CCTI Annual Conference*. Chiang Rai, Thailand. pp. 89-92
- Myderrizi, I. and Zeki, A. (2014). Electronically tunable DXCCII-based grounded capacitance multiplier. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. Vol. 68. Issue. 9. pp. 899-906

- Pal, K. (2004). Floating inductance and FDNR using positive polarity current conveyor. *Active and Passive Electronic Components*. Vol. 27. No. 2. pp. 81-83
- Prokop, R. and Musil, V. (2005). New modern circuit block CCTA and some its applications. *The Fourteenth International Scientific and Applied Science Conference - Electronics ET'2005*. pp. 93-98
- Psychalinos, C., Pal, K. and Vlassis, S. (2008). A floating generalized impedance converter with current feedback amplifiers. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. Vol. 62. No. 2. pp. 81-85
- Saad, R. A. and Soliman, A. M. (2010). On the systematic synthesis of CCII-based floating simulators. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. Vol. 38. No. 9. pp. 935-967
- Sagbas, M., Ayten, U. E., Sedef, H. and Koksall, M. (2009). Floating immittance function simulator and its applications. *Circuits Systems and Signal Processing*. Vol. 28. No. 1. pp. 55-63
- Srisakolteaw, S., Lawanwisut, S., Buriphan, N. and Siriphuchayanun, M. (2013). A current-mode electronically controllable multifunction biquadratic filter using CC-CCTAs. *RMUTI Journal*. Vol 6. No 1. pp 1-10
- Tangsrirat, W. (2013). Floating simulator with a single DVCCTA. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. Vol. 20. pp. 79-86
- Vladimir, I. P. and Michael, M. G. (1994). A Current-Mode FDNR Circuit Element using Capacitive Gytrators. *1994 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. pp. 409-412
- Yuce, E. (2006). On the realization of the floating simulators using only grounded passive components. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. Vol. 49. pp. 161-166
- Yuce, E., Cicekoglu, O. and Minaei, S. (2006). CCII-Based grounded to floating immittance converter and a floating inductance simulator. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. Vol. 46. No. 3. pp. 287-291
- Yuce, E. (2007). On the implementation of the floating simulators employing a single device. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. Vol. 61. No. 7. pp. 453-458
- Yuce, E., Minaei, S. and Cicekoglu, O. (2006). Resistorless floating immittance function simulators employing current controlled conveyors and a grounded capacitor. *Electrical Engineering*. Vol. 88. pp. 519-525