

**การสังเคราะห์ตัวควบคุมพีไอดีในโหมดกระแส  
โดยใช้วงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ  
A Synthesis of Current-mode Proportional Integral  
and derivative (PID) Controllers Using CCTAs.**

**พุทธาวุฒิ ลีกุลธร และสมชาย ศรีสกุลเตีย\***

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน นครราชสีมา 30000

\*E-mail : somchaikorat2008@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ และอนุพันธ์ (PID) ที่ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้วงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (CCTA) ที่มีคุณลักษณะของการควบคุม คือทางออกของตัวควบคุมสามารถควบคุมได้อย่างอิสระด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ และสามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการปรับกระแสไบแอสในส่วนตัวควบคุม PD และ I ที่มีรายละเอียดของวงจรไม่ซับซ้อน ประกอบไปด้วยวงจขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ จำนวน 2 ตัว ทำงานร่วมกับ ตัวต้านทานที่ต่อลงกราวด์สี่ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีกสองตัว วงจรที่นำเสนอแนะนี้จะนำไปเป็นวงจรรวม เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วย PSpice โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ และไอซี AD844 กับ LM13700 ให้ผลสอดคล้องกับทางทฤษฎี มีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมแบบปิดเท่ากับ 0.998 มิลลิวัตต์ ที่แหล่งจ่าย  $\pm 1.5$  โวลต์ กับ 0.132 วัตต์ ที่แหล่งจ่าย  $\pm 5$  โวลต์ ตามลำดับ และผลการทดลองด้วยอุปกรณ์จริงบนชุดทดลอง NI ELVIS ทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ก็ให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีเช่นกัน

**คำสำคัญ :** โหมดกระแส ตัวควบคุมพีไอดี วงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ

**Abstract**

This paper presents a synthesis of current-mode PID controllers employing current conveyors transconductance amplifier (CCTAs). The features of these controllers are: the output parameters can be independently controlled by passive elements and electronically controlled via adjusting correspondents bias currents in the PD and I controllers, circuit description of the PID controller which is simply formulated. It consists of 2 CCTAs cooperating with 4 grounded resistors and 2 grounded capacitors. This proposed circuit is very suitable to be developed into an integrated circuit. The given results of the PSpice simulation of bipolar transistor structure and IC AD844 with LM13700 agree well with the theoretical anticipation. The maximum power consumption in a closed loop control system obtaining the PID controller is approximately 0.998mW at  $\pm 1.5$ V and 0.132W at  $\pm 5$ V supply voltage, respectively, and the results of experiments with real equipment on the trail NI ELVIS with LabVIEW software are consistent with the theory as well.

**Keywords :** Current-mode; PID; CCTA

## 1. บทนำ

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์ (PID Controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่นิยมใช้ในกระบวนการควบคุมในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสะดวกในการออกแบบ ง่ายในการปรับแต่งคุณลักษณะเฉพาะในแต่ละส่วนของตัวควบคุม และราคาประหยัด [1] ตัวควบคุม PID ประกอบด้วยเทอมทั้งสาม คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional: P) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral: I) และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative: D) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ต้องการปรับแต่งคุณลักษณะเฉพาะในแต่ละส่วนให้เหมาะสม ซึ่งการปรับแต่งคุณลักษณะภายใน แต่ละส่วนการควบคุมให้เกิดประสิทธิภาพได้อย่างเหมาะสมเป็นการควบคุมอัตโนมัติ การปรับแต่งสัดส่วนนั้นเป็นการปรับความเร็วของการตอบสนองของระบบ ปริพันธ์เป็นการปรับแต่งค่าผิดพลาดให้ลดลง เท่าที่จะทำได้ในสภาวะคงตัว และอนุพันธ์เป็นการปรับแต่งการตอบสนองชั่วคราวให้ดีขึ้น [2] จึงเป็นที่ยอมรับ และใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบควบคุม

จากการสำรวจบทความวิจัยที่ได้มีการเผยแพร่ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวงจรตัวควบคุม PID ด้วยอุปกรณ์แอกทีฟต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ออปแอมป์ (Operational Amplifier) [3] วงจรขยายความนำส่งผ่านกระแส (Operational Transconductance Amplifier: OTA) [4] วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor: CCII) [5-7] วงจรสายพานกระแสที่สามารถควบคุมได้ด้วยกระแส (Current-controlled Current Conveyor: CCCII) [8] วงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำที่สามารถควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifier: CCCCTA) [9] วงจรขยายกันชนจากผลต่างกระแส (Current Differential Buffer Amplifier: CDBA) [10] วงจรขยายกันชนจากผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมได้ด้วยกระแส (CCCDBA) [11] และวงจรขยายป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier: CFA) [12-13] เป็นต้น ซึ่งแม้วงจรที่กล่าวมานั้นจะสามารถควบคุมพารามิเตอร์ได้ด้วย

อุปกรณ์พาสซีฟ และด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ก็ได้แต่ยังมีข้อแม้และเงื่อนไขต่าง ๆ ให้ปรากฏเป็นข้อ ๆ ดังสรุปคุณสมบัติของตัวควบคุม PID ในงานวิจัยต่าง ๆ ใน Table 1

- 1) มีโครงสร้างของวงจรที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- 2) ใช้อุปกรณ์แอกทีฟน้อย
- 3) ใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลงกราวด์ โดยเฉพาะตัวเก็บประจุ
- 4) ปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ง่ายและเป็นอิสระในแต่ละส่วนของตัวควบคุม
- 5) แสดงผลลัพธ์ของวงจรที่น่าเสนอได้ด้วยอุปกรณ์จริง

**Table 1** เปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวควบคุม PID จากงานวิจัยต่าง ๆ กับตัวควบคุมที่น่าเสนอ

| คุณลักษณะ     | 1) | 2) | 3) | 4) | 5) |
|---------------|----|----|----|----|----|
| PID [3]       | ✗  | ✗  | ✗  | ✓  | ✗  |
| PID [4]       | ✗  | ✗  | ✓  | ✗  | ✗  |
| PID [5]       | ✗  | ✗  | ✗  | ✓  | ✗  |
| PID [6]       | ✗  | ✗  | ✓  | ✓  | ✗  |
| PID [7]       | ✗  | ✓  | ✓  | ✗  | ✗  |
| PID [8]       | ✗  | ✓  | ✓  | ✗  | ✗  |
| PID [9]       | ✓  | ✗  | ✓  | ✓  | ✗  |
| PID [10]      | ✓  | ✗  | ✓  | ✓  | ✗  |
| PID [11]      | ✓  | ✗  | ✓  | ✓  | ✗  |
| PID [12]      | ✓  | ✗  | ✗  | ✗  | ✗  |
| PID [13]      | ✓  | ✓  | ✓  | ✗  | ✗  |
| PID ที่นำเสนอ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  |

ปี ค.ศ. 2005 R. Prokop และ V. Musil [14] ได้ดัดค้นและนำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่อีกหนึ่งชนิด คือวงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (Current Conveyor Transconductance Amplifier: CCTA) เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ แบบ 5 ขั้ว เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เอนกประสงค์ในการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกที่มีการประยุกต์ใช้งานในด้านวงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณ และวงจรอื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดแรงดัน และโหมดกระแส [15-16]

ปัจจุบันเทคนิคโหมตกระแสที่ได้รับความนิยมมากขึ้นกว่าโหมตแรงดัน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สามารถทำงานในสภาพแรงดันไฟเลี้ยงต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับอุปกรณ์แบบพกพาที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน และวงจรที่ใช้ไฟเลี้ยงต่ำ จะเริ่มจำเป็นอย่างมากยิ่งขึ้น เทคนิคของโหมตกระแสอีกปัจจัยที่เป็นเป้าหมายของการสังเคราะห์วงจรในโหมตกระแส เนื่องจากข้อได้เปรียบในด้านศักยภาพมากขึ้น เช่น มีย่านการทำงานที่กว้างกว่า (Large Dynamic Range) ตอบสนองสัญญาณแบนด์วิดท์ได้สูงกว่า (Higher Signal Bandwidth) มีความเป็นเชิงเส้นสูง (Greater Linearity) การออกแบบวงจรเรียบง่าย (Simple Circuitry) และมีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังงานน้อยกว่า (Lower Power Consumption) [17]

จากหลักการและเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้นนี้ บทความความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการสังเคราะห์วงจรควบคุม PID ในโหมตกระแสด้วยวงจรรายยสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (CCTA) ที่มีคุณสมบัติในการปรับค่าพารามิเตอร์ภายในได้อย่างอิสระด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ และยังสามารถปรับพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย โครงสร้างภายในไม่ซับซ้อนประกอบด้วย CCTA 2 ตัว ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลงกราวด์ วงจรสามารถต่อใช้งานได้ปราศจากเงื่อนไข และอุปกรณ์สมพงษ์ เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมผลการจำลองการทำงานจากโครงสร้าง CCTA ด้วยทรานซิสเตอร์ และวงจรเสมือน CCTA ด้วยโปรแกรม PSpice นอกจากนี้ยังได้ทดลองจริงจากอุปกรณ์ IC ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเบอร์ AD844 และ LM13700 มาต่อเป็น CCTA เป็นวงจรตัวควบคุม PID ทดลองบนชุด NI ELVIS II ของบริษัท National Instruments ที่มีชื่อเต็มว่า National Instruments Education Laboratory Virtual Instrumentation Suite ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW

## 2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

### 2.1 หลักการทำงานของ CCTA

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอใช้ CCTA เป็นอุปกรณ์หลัก จึงขอกล่าวถึง CCTA พอสังเขปดังต่อไปนี้

ในทางความคิดของอุปกรณ์ CCTA มาจากการนำวงจรรายยสายพานกระแส (CCII) กับวงจรรายยความนำถ่ายโอน (OTA) มาต่อร่วมกัน ทำให้เกิดคุณสมบัติของ CCTA ที่ความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดัน ดังสมการที่ (1) สัญลักษณ์และวงจรมูลของอุปกรณ์ที่นำเสนอ CCTA ที่แสดงใน Figure 1

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

เมื่อ  $g_m$  คือค่าความนำถ่ายโอนของ CCTA จากโครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพร่า ดังนั้นอัตราขยายความนำค่า  $g_m$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2)

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

เมื่อ  $I_B$  และ  $V_T$  คือกระแสสำหรับการไบแอสให้กับอุปกรณ์ และศักย์ดีดาความร้อน (Thermal Voltage) ในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 26mV ที่อุณหภูมิห้องที่ 27°C ตามลำดับ

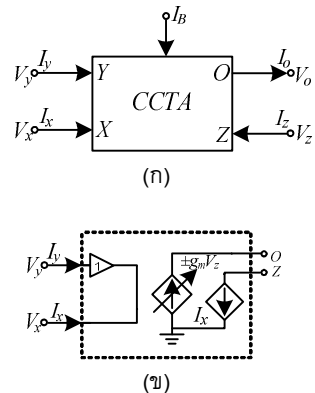


Figure 1 CCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรมูล

## 2.2 การสังเคราะห์ตัวควบคุมด้วย CCTA

### ตัวควบคุม PID

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ และอนุพันธ์ (PID Controller) เป็นตัวควบคุมถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เป็นตัวควบคุมที่แบบป้อนกลับ คาดว่ามากกว่า 90% ของทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมเกิดจากการนำค่าความผิดพลาดที่ได้จากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการ ตัวควบคุมก็พยายามลดข้อผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดจากการปรับค่าจากสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปร PID ของแต่ละส่วนตัวควบคุมก็จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ ดัง Figure 2 ซึ่งเป็นผังงานของตัวควบคุม PID แบบมาตรฐานที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป และใน Figure 3 เป็นผังการทำงานของตัวควบคุม PID ที่นำเสนอ

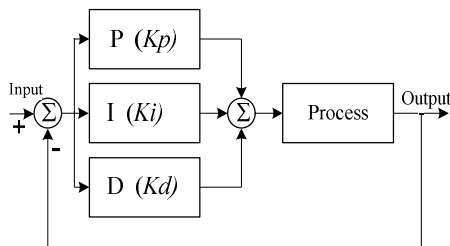


Figure 2 ผังงานของตัวควบคุม PID มาตรฐาน

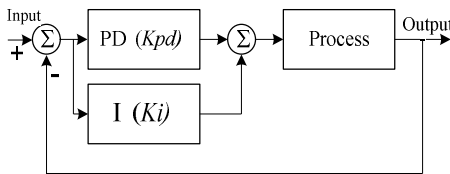


Figure 3 ผังงานของตัวควบคุม PID ที่นำเสนอ

เมื่อการปรับตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P) เป็นการปรับการตอบสนองความเร็วของระบบ หรือเรียกว่า อัตราขยายของระบบการปรับค่าผิดพลาดทั้งขนาดและผลรวมในทุกช่วงเวลาของระบบเป็นการปรับผ่านตัวควบคุมปริพันธ์ (I) และการปรับตัวควบคุมส่วนอนุพันธ์ (D) เป็นการปรับเสถียรภาพของระบบจากผังงานสามารถเขียนสมการถ่ายโอนของตัวควบคุม PID ทั่วไปได้ดังสมการที่ (3) และ (4) เมื่อให้  $u(t)$  เป็นสัญญาณเอาต์พุต

$$u(t) = \frac{I_o}{I_m} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

$$u(t) = \frac{I_o}{I_m} = K_p + \frac{1}{sT_i} + sT_d \quad (4)$$

เมื่อค่า  $K_p$  คือตัวควบคุมแบบสัดส่วน หรือ (P)  
 $T_i$  คือตัวควบคุมแบบปริพันธ์ หรือ (I)  
 $T_d$  คือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ หรือ (D)

ตัวควบคุม PID ในโหมดกระแส ที่แสดงใน Figure 3 ประกอบด้วย CCTA 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุและตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์อย่างละ 2 ตัว และ 4 ตัวตามลำดับสามารถเขียนเป็นสมการถ่ายโอนของตัวควบคุม PID ด้วย CCTA ได้ดังสมการที่ (5)

$$\frac{I_o}{I_m} = g_{m1} \frac{R_y R_z}{R_{x1}} + g_{m2} \frac{R_y}{R_{x2} s C_z} + g_{m1} R_y s C_x \quad (5)$$

เมื่อแทนค่า  $g_m$  ด้วย  $\frac{I_B}{2V_T}$  จะได้

$$\frac{I_o}{I_m} = \frac{I_{B1} R_y R_z}{2V_T R_{x1}} + \frac{I_{B2} R_y}{2V_T R_{x2} s C_z} + \frac{I_{B1} R_y s C_x}{2V_T} \quad (6)$$

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (4) และ สมการที่ (6) จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่นำเสนอใน Figure 4 ได้ดังต่อไปนี้

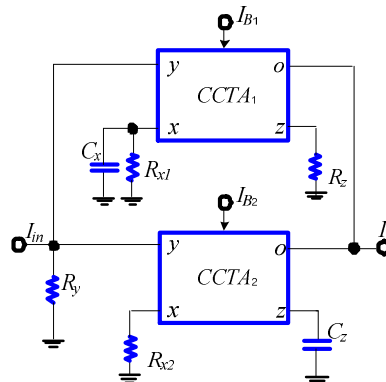


Figure 4 วงจรตัวควบคุม PID ด้วย CCTA ที่นำเสนอ

$$K_p = g_{m1} \frac{R_y R_z}{R_{x1}} \quad (7)$$

$$T_i = g_{m2} \frac{R_y}{R_{x2} C_z} \quad (8)$$

และ  $T_d = g_{m1} R_y C_x \quad (9)$

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 ผลจำลองการทำงานของตัวควบคุม PID ด้วย CCTA จากทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรถวลควบคุมที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของบริษัท AT&T [18] จาก Figure 5 แสดงโครงสร้างภายในของ CCTA โดยเงื่อนไขในการจำลองการทำงานนี้ กำหนดให้แหล่งจ่ายของวงจร คือ  $\pm 1.5V$  ความต้านทานที่เป็นโพลดวจรเท่ากับ  $1 \Omega$  ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1=1nF$ ,  $C_2=0.1nF$  ค่าความต้านทาน  $R_y=R_{x1}=R_{x2}=R_z=1k\Omega$  และ  $I_{B1} = 52\mu A$  และ  $I_{B2}=26\mu A$  ซึ่งจะทำให้ค่าพารามิเตอร์  $P=1$ ,  $I=2\mu s$  และ  $D=0.1ns$  ตามลำดับ

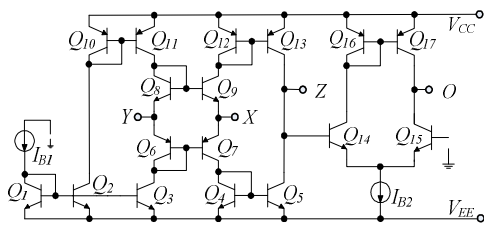


Figure 5 โครงสร้างภายในของ CCTA

เพื่อตรวจสอบการใช้งานจริงของตัวควบคุม PID ในโหมดกระแสที่นำเสนอจึงใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟดัง Figure 6 ที่สามารถเขียนสมการถ่ายโอนของวงจรได้ดังสมการที่ (10) นำมาใช้ในการตรวจสอบระบบการควบคุมแบบปิดดัง Figure 7 ให้เป็นที่ปรากฏ

$$H_{lp} = \frac{I_o}{I_m} = \frac{R_1 s C}{L C s^2 (R_1 + R_2) s C + 1} \quad (10)$$

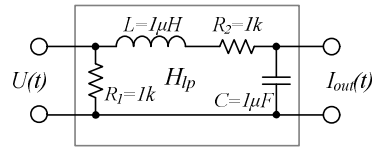


Figure 6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านด้วย RLC

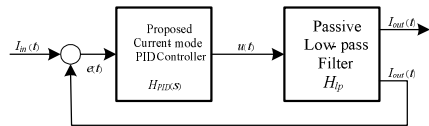


Figure 7 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบปิด

ในการทดสอบระบบควบคุมป้อนกลับแบบปิดนี้ได้กำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นรูปแบบสเตปที่มีขนาด  $20\mu A$  มีค่าเวลาสัญญาณเท่ากับ  $0.1ms$  ที่ความถี่  $1kHz$  Figure 8 แสดงให้เห็นผลการจำลองการทำงานของสัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับเอาต์พุต เมื่อระบบได้รับสัญญาณกระตุ้นเข้าไปในช่วงเวลา  $0.1ms$  ซึ่งในรูปแบบแสดงให้เห็นคาบเวลาเพียงช่วงเริ่มต้นเพียง  $40\mu s$  เท่านั้น เพื่อให้เห็นช่วงไต่ขึ้นของสัญญาณ ใน Figure 9 แสดงให้เห็นผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมในสถานะคงตัว เมื่อทำการเปรียบเทียบอินพุตกับเอาต์พุตเช่นกัน เพื่อให้เห็นรูปสัญญาณ 5 คลื่น

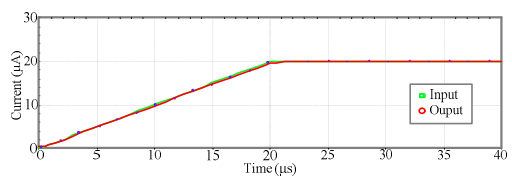


Figure 8 ผลการจำลองการทำงานของระบบ ช่วงเริ่มต้น

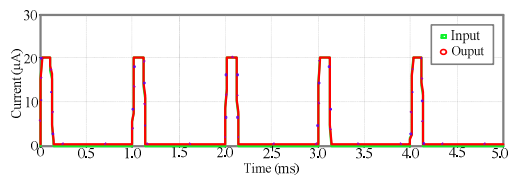


Figure 9 ผลการจำลองการทำงานของระบบ ในสถานะคงตัว

### 3.2 ผลการจำลองการทำงานด้วยวงจรเสมือน CCTA

วงจรเสมือน CCTA [19] ด้วยไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเป็นไอซีเบอร์ AD844 [20] (CCII) และ LM13700 [21] (OTA) ดัง Figure 10 มาต่อวงจรตัวควบคุม PID ที่นำเสนอได้ดังวงจร Figure 11 โดย CCII ที่ใช้เป็นเบอร์ AD844 ของบริษัท Analog Devices กับ OTA เป็นเบอร์ LM13700 ของบริษัทเท็กซัส อินสตรูเมนต์ กำหนดค่าของวงจรเช่นเดียวกับกรณีของทรานซิสเตอร์ แตกต่างเพียงแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร  $\pm 5V$  และกระแสไบแอส  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}=50\mu A$  สัญญาณอินพุตก็เป็นรูปสัญญาณแบบสเตปที่มีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 0.1ms เช่นกันป้อนให้ตัวควบคุม PID พร้อมด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำ การต่อควบคุมแบบป้อนกลับแบบปิด ใน Figure 12 เป็นผลการจำลองการทำงานของระบบป้อนกลับแบบปิด

แสดงให้เห็นช่วงเริ่มต้นจาก 0 ถึง  $40\mu s$  ด้วยการเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุต จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีถึงเอาต์พุตจะมีออฟเซตเล็กน้อยแต่ก็ไม่เกิดโอเวอร์ชูต ใน Figure 13 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุตในช่วง 5 รอบคลื่น ซึ่งเป็นสภาวะคงตัวของการควบคุมแบบปิดของระบบ

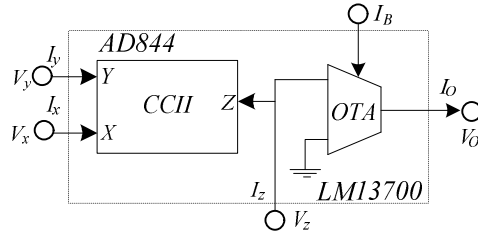


Figure 10 วงจรเสมือนวงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ

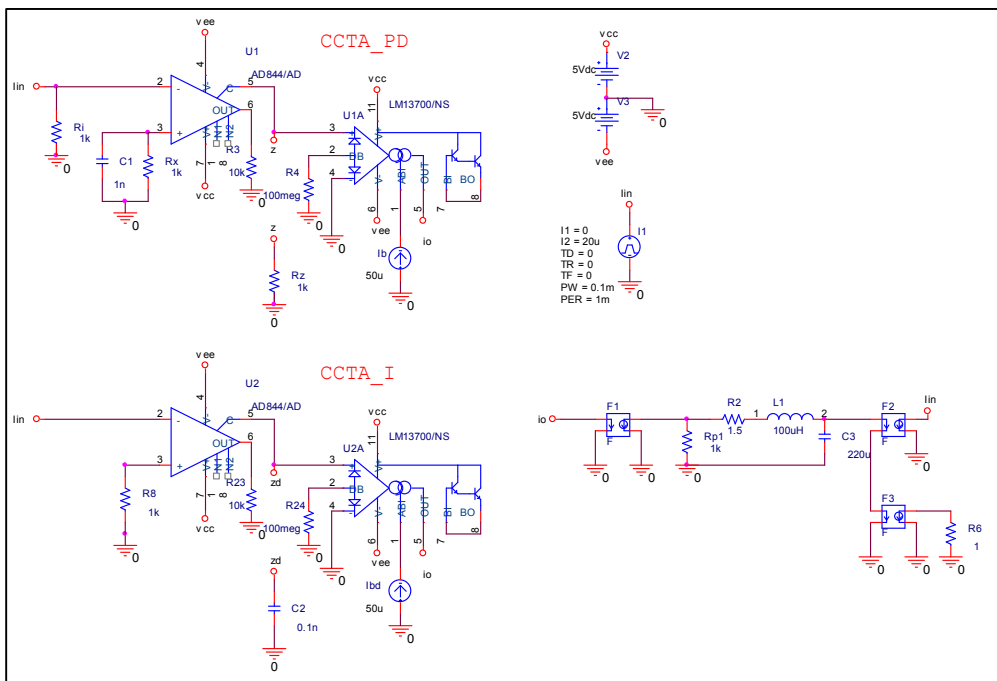


Figure 11 วงจรตัวควบคุม PID ด้วยไอซี AD844 กับ LM13700

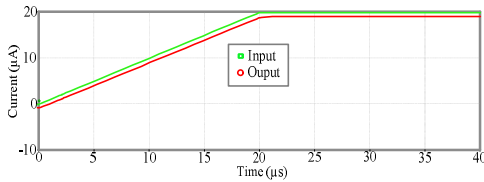


Figure 12 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะเริ่มต้น

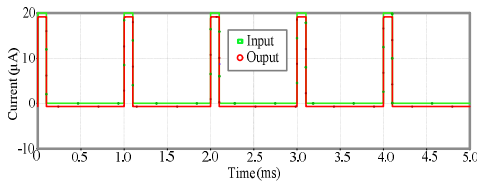


Figure 13 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัว

### 3.3 ผลการทำงานของตัวควบคุม PID ด้วยไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดบนชุดทดลอง NI ELVIS II

เพื่อเป็นยืนยันว่าการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID โหมดกระแสด้วยวงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำสามารถทำงานได้จริงจากไอซีที่มีจำหน่าย

ในท้องตลาดตั้งผลการจำลองการทำงานจากหัวข้อที่ 3.2 ที่กล่าวมาแล้วนั้น ในส่วนนี้เป็นการนำอุปกรณ์จริงมาต่อลงบนแผงทดลองของบริษัทเนชั่นแนลอินสทรูเมนต์ส NI ELVIS II [22] ดังใน Figure 14 และ Figure 15 แสดงให้เห็นวงจรตัวควบคุม PID ที่นำเสนอทำงานบนโปรแกรม LabVIEW อุปกรณ์ที่ใช้งานเหมือนกันหัวข้อที่ 3.2 ทุกประการ ยกเว้นค่ากระแสไบแอสของ LM13700 อยู่ที่ 2mA. ที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง  $\pm 5V$  อินพุตที่ป้อนให้กับระบบมีขนาดเท่ากับ 0.1mA ที่ความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 0.1ms ของสัญญาณความถี่ที่ 1kHz ดังแสดงใน Figure 16 เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของระบบในสภาวะเริ่มต้น เช่นกันที่ Figure 17 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตในสภาวะคงตัว 5 รูปคลื่น และรายละเอียดบนโปรแกรม LabVIEW แสดงให้เห็นขนาดของกระแสอินพุต เอาต์พุต กระแสไบแอส  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  แหล่งจ่ายไฟฟ้า ดัง Figure 18

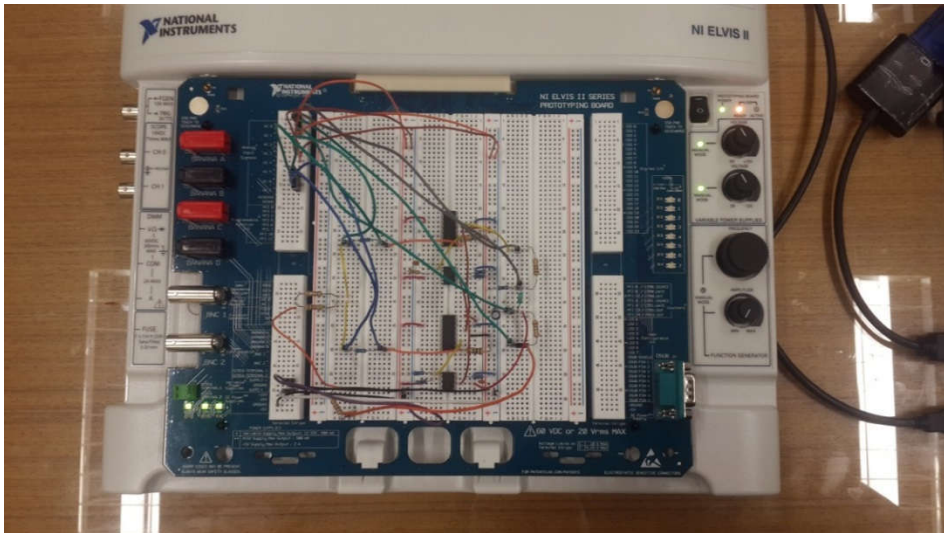


Figure 14 แผงทดลองประกอบวงจรตัวควบคุม PID โหมดกระแสที่นำเสนอ

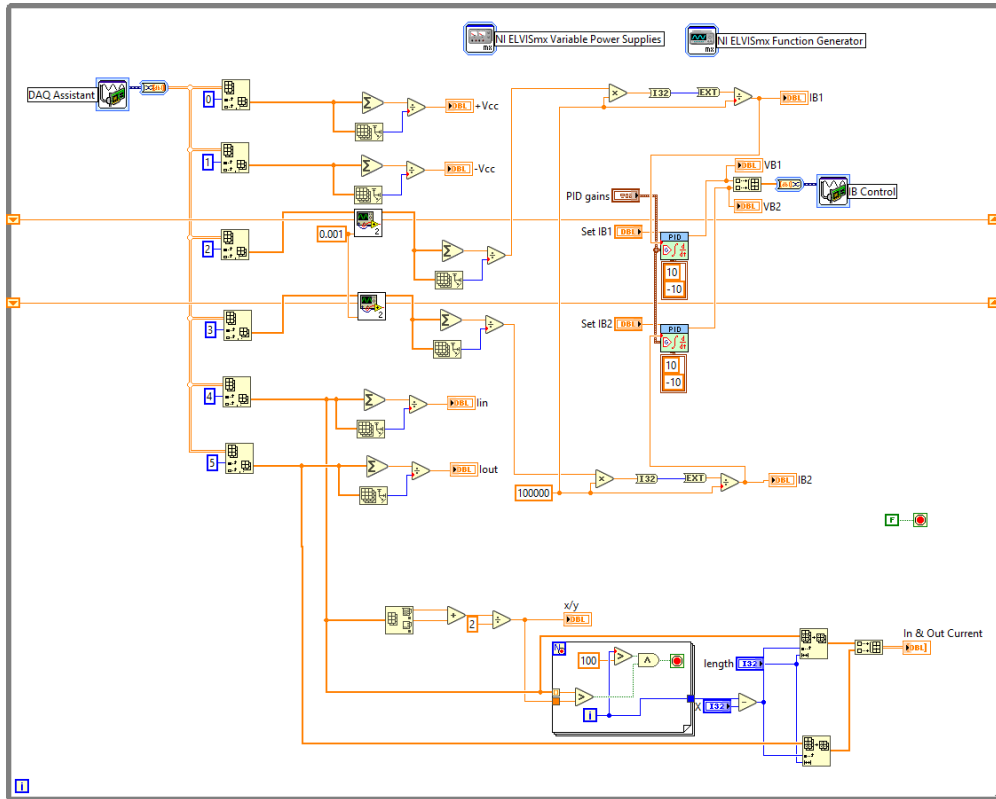


Figure 15 วงจรตัวควบคุม PID ที่นำเสนอบนโปรแกรม LabVIEW

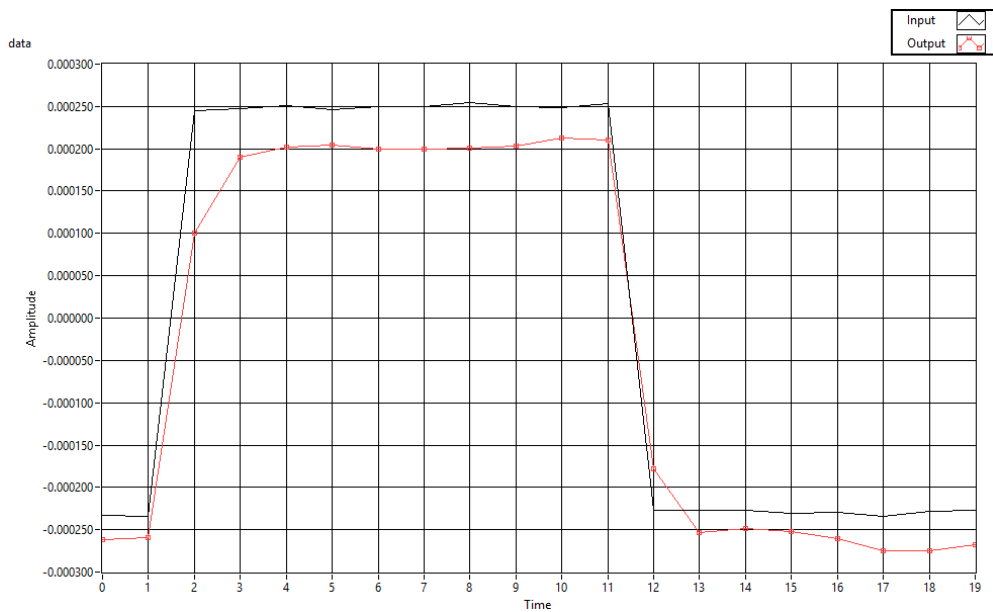


Figure 16 ผลการทำงานของตัวควบคุม PID บนโปรแกรม LabVIEW ในสภาวะเริ่มต้น



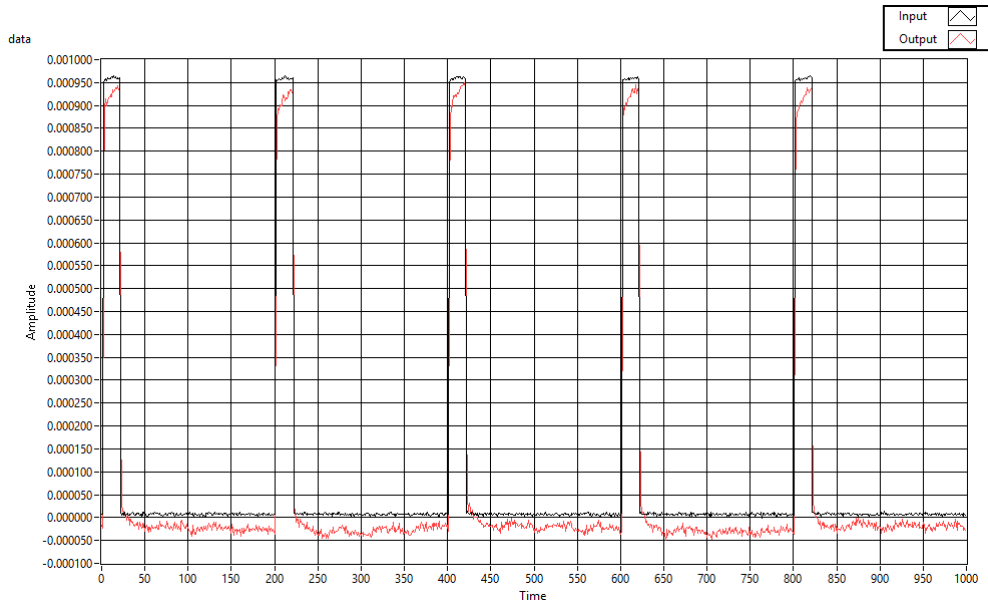


Figure 17 ผลการทำงานของวงจรถ้าควบคุมในสภาวะคงตัว

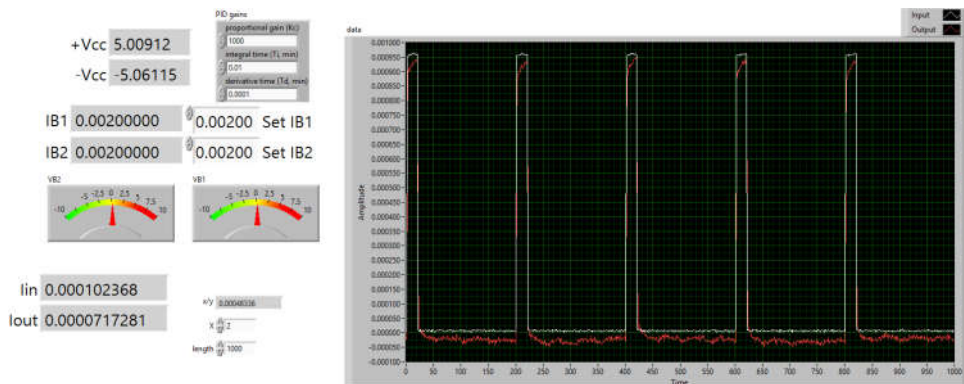


Figure 18 ผลการทำงานและรายละเอียดของอินพุต และเอาต์พุตบน LabVIEW

#### 4. สรุปและเสนอแนะ

บทความวิจัยเรื่องการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID ในโหมดกระแสด้วย CCTA วงจรถ้าควบคุมที่นำเสนอประกอบด้วย CCTA จำนวน 2 ตัว ต่อทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์อย่างละ 2 ตัว และ 4 ตัว ตามลำดับ สามารถปรับพารามิเตอร์ของแต่ละส่วนของตัวควบคุมได้อย่างอิสระจากกันด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ และยังสามารปรับพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ผลการจำลอง

การทำงานด้วยโปรแกรม PSpice จากโครงสร้างของ CCTA ด้วยทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ กับไอซี AD844 และ LM13700 ให้ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าผลการทดลองด้วยไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเบอร์ AD844 กับ LM13700 บนชุดทดลอง NI ELVIS II ร่วมกับโปรแกรม LabView ก็ให้ผลทดลองสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎีเช่นกัน

## 5. บรรณานุกรม

- [1] Bennette, S. *Development of the pid controller*. IEEE Control Systems Mag; Vol.13: pp. 58–65. 1993.
- [2] Ang, K.H.; Chong, G.C.Y. Li, Y. *PID control system analysis, design, and technology*, IEEE Trans Control Systems Tech, Vol.13. No.4, pp. 559-576, 2005.
- [3] Franco, S. *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill International Editions; 1998.
- [4] Erdal, C.; Toker, A.; A. Acar. *OTA-C based proportional-integral-derivative (PID) controller and calculating optimum parameter tolerances*, Turk. J. Elec. Engin., Vol.9, No.2, pp.189-198, 2001.
- [5] Minaei, S.; Yuce, E.; Tokat, S.; Cicekoglu, O. *Simple realization of current-mode and voltage-mode PID, PI and PD controllers*, Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electron., Croatia, 2005.
- [6] Yuce, E.; Tokat, S.; Kizilkaya, A.; Cicekoglu, O. *CCII based PID controllers employing grounded passive components*, Int. J. Electron. Commun. (AEU), Vol.60, No.5, pp. 399-403, 2006.
- [7] Yuce, E.; Tokat, S.; Minaei, S.; Cicekoglu, O. *Low component-count insensitive current-mode and voltage-mode PID, PI and PD controllers*, Frequenz, Vol.60, No.3-4, pp. 29-33, 2006.
- [8] Erdal, C.; Kuntman, H.; Kafali, S. *A current controlled conveyor based proportional-integral-derivative (PID) controller*, J. Electrical Electron. Eng., Vol.4, No.2, pp. 1243-1248, 2004.
- [9] Srisakultiew, S.; Siriphuchyanun, M. *A synthesis of current-mode PI, PD and PID controllers employing CC-CCTAs*, In The proceeding of 48<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference, pp. 28-35, 2010.
- [10] Keskin, A.U. *Design of a PID controller circuit employing CDBAs*, Int. J. Elect. Eng. Educ., Vol.43, No.1, pp. 48-56, 2006.
- [11] Srisakultiew, S. and Siripruchyanun, M. *A synthesis of electronically controllable current-mode PI, PD and PID controllers employing CCCDBAs*. Circuit and Systems, 4, pp. 287-292, 2013. Doi: 10.4236/cs.2013.43039.
- [12] Sagbas, M.; Koksai, M.; Ayten, U. E. *Design of dominantly proportional PID controller using a single commercially available active component*, Proc. Int. Conf. Telecom. Signal Process., Italy, pp. 427-430, 2013.
- [13] Srisakultiew, S.; Lawanwisut, S.; Siripruchyanun, M. *A synthesis of current-mode PI, PD and PID controllers employing CFAs*. In The proceeding of 51<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference, pp. 47-51, 2013.

- [14] Prokop, R.; Musil, V. *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, pp. 93-98, 2005.
- [15] Prokop, R.; Musil, V. *Modular approach to design of modern circuit blocks for current signal processing and new device CCTA*, Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Signal and Image Processing, Anaheim, USA, pp. 494-499, 2005.
- [16] Prokop, R.; Musil, V. *CCTA—a new modern circuit block and its internal realization*, Electronic Devices and Systems IMAPS CZ International Conference 2005, Brno, Czech Republic, pp. 89-93, 2005.
- [17] Toumazou, C.; Lidgley, F. J.; Haigh, D. G. *Analogue IC design: the current-mode approach*, London: Peter Peregrines, 1990.
- [18] Frey, D.R. *Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering*. IEE Proceeding of Circuit Devices Systems, Vol. 140, pp. 406-416, 1993.
- [19] Jaikla, W.; Silapan, P.; Chanapromma, C.; Siripruchyanun, M. *Practical Implementation of CCTA based on commercial CCI and OTA*. In International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2008). Thailand, pp. 1-4, 2008.
- [20] Analog Devices. *AD844 Monolithic Op Amp*, 2009. 20 p. [Online] Available at: <http://www.analog.com>
- [21] Texas Instruments. *LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifiers with Linearizing Diodes and Buffers*, 37 p, 2015. [Online] Available at: <http://www.ti.com>
- [22] National Instruments. *NI ELVIS II Modular Engineering Educational Laboratory Platform*, 2016, [Online] Available at: <http://www.sine.no.com>