



การสังเคราะห์ตัวควบคุม PID ในโหมดกระแสด้วย CCTA จาก AD844 ร่วมกับ LM13700

A Synthesis of Current-mode PID Controller Using CCTA via AD844 with LM13700

พุทธราวุฒิ ลีกุลธร¹ และสมชาย ศรีสกุลเดี่ยว^{1*}

Received: March, 2017; Accepted: April, 2017

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID ที่ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้วงจรรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (CCTA) จาก AD844 ร่วมกับ LM13700 ในโครงสร้างของ PI กับ PD ที่มีคุณลักษณะของการควบคุม คือ ทางออกของตัวควบคุมสามารถควบคุมได้อย่างอิสระด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ และสามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแสไบแอสในส่วนตัวควบคุม PI และ PD ที่มีรายละเอียดของวงจรไม่ซับซ้อน ประกอบไปด้วย วงจรรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ จำนวน 2 ตัว ทำงานร่วมกับตัวต้านทาน 4 ตัว และตัวเก็บประจุอีก 3 ตัวแบบต่อลงกราวด์ วงจรที่นำเสนอนี้เหมาะที่จะนำไปเป็นวงจรรวม เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วย PSpice กับไอซี AD844 ร่วมกับ LM13700 ให้ผลสอดคล้องกับทางทฤษฎี มีอัตราการใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมแบบปิดเท่ากับ 0.132 วัตต์ ที่แหล่งจ่าย ± 5 โวลต์ และผลการทดลองด้วยอุปกรณ์จริงบนชุดทดลอง NI ELVIS ทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ก็ให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีเช่นกัน

คำสำคัญ : โหมดกระแส; PID; วงจรรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

* Corresponding Author E - mail Address: somchaikorat2008@hotmail.com

Abstract

This paper presents a synthesis of current-mode PID controllers employing current conveyors transconductance amplifier (CCTAs) via AD844 and LM13700 in structure of PI and PD. The features of these controllers are that: the output parameters can be independently controlled by passive elements and electronically controlled via adjusting correspondents bias currents in the PI and PD controllers, circuit description of the PID controller is simply formulated, it consists of 2 CCTAs cooperating with 4 grounded resistors and 3 grounded capacitors. This proposed circuit is very suitable to develop into an integrated circuit. The given results of the PSpice simulation IC AD844 with LM13700 agree well with the theoretical anticipation. The maximum power consumption in a closed loop control system obtained from the PID controller is approximately 0.132 W at ± 5 V supply voltage, and the results of the experiments with real equipment on the trail NI ELVIS with LabVIEW software was consistent with the theoretically as well.

Keywords: Current-Mode; PID; CCTA

บทนำ

ตัวควบคุม PID หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์ (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

เทคโนโลยีการสื่อสารในปัจจุบัน อาจกล่าวได้ว่าเป็นตัวสะท้อนวิวัฒนาการของเครื่องใช้ไฟฟ้า ชนิดอุปกรณ์พกพาที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่ผ่านมากกว่ายี่สิบปี อาทิเช่น โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป คอมพิวเตอร์แบบพกพา และอื่น ๆ เนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคชั้นนำเทคโนโลยีเกือบสามสิบปีที่ผ่านมาที่มีการศึกษาเทคนิคในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในโหมดกระแส สรุปลได้ว่า วงจรในโหมดกระแสมีข้อได้เปรียบในด้านศักยภาพมากกว่า เช่น มีย่านการทำงานที่กว้างกว่า (Large Dynamic Range) ตอบสนองสัญญาณแบนด์วิดท์ได้สูงกว่า (Higher Signal Bandwidth) มีความเป็นเชิงเส้นสูง (Greater Linearity) การออกแบบวงจรเรียบง่าย (Simple Circuitry) และมีอัตราการใช้

สิ้นเปลืองกำลังงานน้อยกว่า (Lower Power Consumption) [3] - [4] ดังนั้นเทคนิคโหมดกระแสจึงได้รับความนิยมมากกว่าโหมดแรงดันอันเนื่องจากสามารถทำงานในสภาพแรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้

จากการสำรวจบทความวิจัยที่ได้มีการเผยแพร่ ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุม PID ด้วยอุปกรณ์แอกทิฟต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ออปแอมป์ (Operational Amplifier) [5] วงจรขยายความนำส่งผ่านกระแส (Operational Transconductance Amplifier: OTA) [6] - [7] วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor: CCII) [8] - [9] วงจรสายพานกระแสที่สามารถควบคุมได้ด้วยกระแส (Current-Controlled Current Conveyor: CCCII) [10] วงจรขยายกันชนจากผลต่างกระแส (Current Differential Buffer Amplifier: CDBA) [11] และวงจรรายจ่ายป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier: CFOA) [12] เป็นต้น ซึ่งแม้วงจรที่กล่าวมานั้นจะสามารถควบคุมพารามิเตอร์ได้ด้วยอุปกรณ์พาสซีฟและด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ก็ได้ แต่ยังมีข้อแม้และเงื่อนไขให้ปรากฏดังต่อไปนี้

1. ใช้อุปกรณ์แอกทิฟ และพาสซีฟเป็นจำนวนมาก [5] - [12]
2. ใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลอยโดยเฉพาะตัวเก็บประจุ [5] - [8], [12]
3. ไม่สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ได้อย่างอิสระ [5] - [10]
4. ไม่สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [5], [7] - [9], [11] - [12]

ปี ค.ศ. 2005 Prokopc, R. และ Musil, V. [13] ได้คิดค้นและนำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่อีกหนึ่งชนิด คือ วงจรรายจ่ายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (Current Conveyor Transconductance Amplifier: CCTA) เป็นอุปกรณ์แอกทิฟแบบ 5 ขั้ว เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เอนกประสงค์ในการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก ที่มีการประยุกต์ใช้งานในด้านวงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรอื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดแรงดัน และโหมดกระแส [14] - [15]

จากหลักการและเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้นนี้ บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการสังเคราะห์วงจรควบคุม PID ในโหมดกระแสด้วยวงจรรายจ่ายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (CCTA) จาก AD844 ร่วมกับ LM13700 ที่มีคุณสมบัติในการปรับค่าพารามิเตอร์ภายในได้อย่างอิสระด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ และยังสามารถปรับพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย โครงสร้างภายในไม่ซับซ้อนประกอบด้วย CCTA 2 ตัว ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลงกราวด์ วงจรสามารถต่อใช้งานได้ปราศจากเงื่อนไข และอุปกรณ์สมพงษ์เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม 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

วงจรและหลักการทำงานของวงจร

1. หลักการทำงานของ CCTA

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอใช้ CCTA เป็นอุปกรณ์หลัก จึงขอกล่าวถึง CCTA พอสังเขปดังต่อไปนี้ ในทางความคิดของอุปกรณ์ CCTA มาจากการนำวงจรรายจ่ายสายพานกระแส (CCII) กับวงจรรายจ่ายความนำถ่ายโอน (OTA) มาต่อร่วมกัน ทำให้เกิดคุณสมบัติของ CCTA ที่ความสัมพันธ์ของกระแส และ

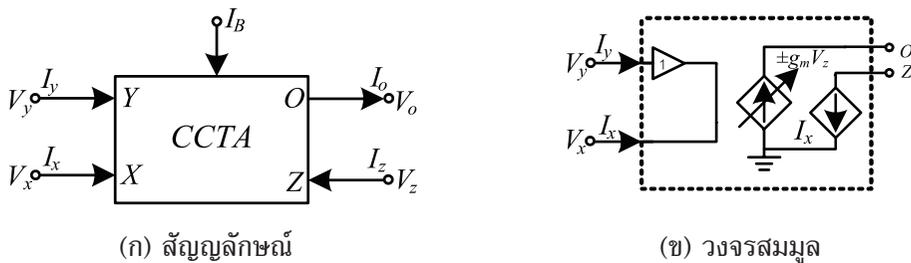
แรงดัน ดังสมการที่ (1) สัญลักษณ์และวงจรมุมของอุปกรณ์ที่นำเสนอ CCTA ที่แสดงในรูปที่ 1

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

เมื่อ g_m คือ ค่าความนำถ่ายไอออนของ CCTA จากโครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพร่า ดังนั้นอัตราขยายความนำค่า g_m สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2)

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

เมื่อ I_B และ V_T คือ กระแสสำหรับการไบแอสให้กับอุปกรณ์ และศักย์ค่าความร้อน (Thermal Voltage) ในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 26mV ที่อุณหภูมิห้องที่ 27 °C

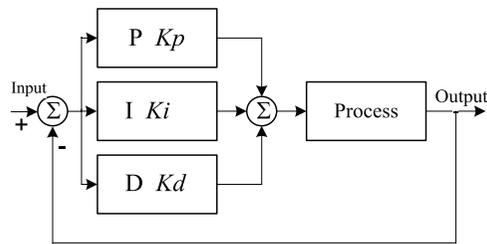


รูปที่ 1 CCTA

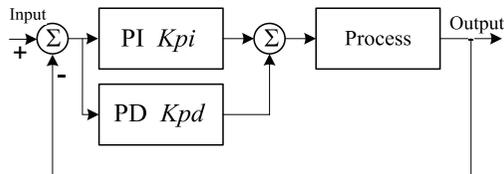
2. การสังเคราะห์ตัวควบคุมด้วย CCTA

ตัวควบคุม PID

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ และอนุพันธ์ (PID Controller) เป็นตัวควบคุมถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เป็นตัวควบคุมที่ใช้แบบป้อนกลับมากกว่า 90 % ของทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมซึ่งเกิดจากการนำค่าความผิดพลาดที่ได้จากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการ ตัวควบคุมจะพยายามลดความผิดพลาดและปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ ดังรูปที่ 2 (ก) ซึ่งเป็นผังงานของตัวควบคุม PID แบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป สามารถเขียนสมการถ่ายโอนตัวควบคุม PID ได้ดังสมการที่ (3) และ (4) [1] - [2] ในรูปที่ 2 (ข) เป็นผังการทำงานของตัวควบคุม PID ที่นำเสนอ



(ก) ฟังก์ชันทั่วไป



(ข) ฟังก์ชันที่นำเสนอ

รูปที่ 2 ฟังก์ชันของตัวควบคุม PID

เมื่อการปรับตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P) เป็นการปรับการตอบสนองความเร็วของระบบ หรือเรียกว่าอัตราขยายของระบบการปรับค่าผิดพลาดทั้งขนาด และผลรวมในทุกช่วงเวลาของระบบเป็นการปรับผ่านตัวควบคุมปริพันธ์ (I) และการปรับตัวควบคุมส่วนอนุพันธ์ (D) เป็นการปรับเสถียรภาพของระบบ จากฟังก์ชันสามารถเขียนสมการถ่ายโอนของตัวควบคุม PID ทั่วไปได้ดังสมการที่ (3) และ (4) เมื่อให้ $u(t)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุต

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

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

- เมื่อค่า K_p คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน หรือ (P)
 T_i คือ ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ หรือ (I)
 T_d คือ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ หรือ (D)

ตัวควบคุมแบบ PI

ตัวควบคุม PI ประกอบไปด้วย วงจรขยายกระแส และวงจรรินทิเกต ในการควบคุมแบบป้อนกลับบางกรณีจะใช้เพียงตัวควบคุม PI อันเนื่องมาจากความต้องการในการปรับค่าไดนามิกในช่วงต้นซึ่งบทความนี้ได้นำเสนอตัวควบคุม PI ด้วย CCTA อันประกอบด้วย CCTA เพียง 1 ตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ก็ออกอย่างละ 2 ตัว ดังรูปที่ 3 และจากสมการถ่ายโอนของตัวควบคุม PI ในสมการที่ (5) สามารถแทนค่าจากคุณสมบัติของ CCTA ได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

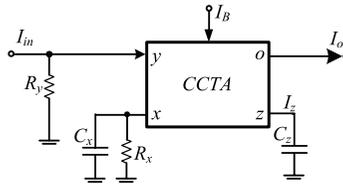
$$H_{PI}(s) = \frac{I_O}{I_{in}} = K_{PI} + \frac{1}{T_{iS}}, \quad (5)$$

และ

$$H_{PI}(s) = \frac{I_O}{I_{in}} = g_m \left(\frac{R_y C_x}{C_z} + \frac{R_x C_z}{R_y} \right). \quad (6)$$

แทนค่า $g_m = \frac{I_B}{2V_T}$ จะได้

$$H_{PI}(s) = \frac{I_O}{I_{in}} = \frac{I_B R_y C_x}{2V_T C_z} + \frac{I_B R_x C_z}{2V_T R_y}. \quad (7)$$



รูปที่ 3 ตัวควบคุม PI

ตัวควบคุมแบบ PD

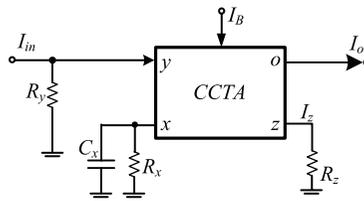
ตัวควบคุม PD ประกอบด้วยวงจรถยายกระแส และวงจรถิฟเฟอร์เรนเชียลเช่นกัน ในการควบคุมบางกรณีก็ต้องการเพียงตัวควบคุมแบบ PD เพื่อหวังผลตอบสนองในช่วงสภาวะเริ่มต้นกับลดผลที่ผิดพลาดให้เกิดสไลปในระบบ รูปที่ 4 เป็นตัวควบคุม PD ที่ประกอบด้วย CCTA ตัวเดียวต่อร่วมกับตัวต้านทาน 3 ตัว และตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวแบบต่อลงกราวด์ จากวงจรสามารถเขียนสมการถ่ายโอนของตัวควบคุม PD จากคุณสมบัติของ CCTA ได้ดังสมการที่ (9) และ (10)

$$H_{PD}(s) = \frac{I_O}{I_{in}} = K_P + T_D s \quad (8)$$

$$H_{PD}(s) = \frac{I_O}{I_{in}} = g_m \left(\frac{R_y R_z}{R_x} + R_y C_x \right) \quad (9)$$

แทนค่า $g_m = \frac{I_B}{2V_T}$ ลงในสมการที่ (9) จะได้

$$H_{PD}(s) = \frac{I_O}{I_{in}} = \frac{I_B R_y R_z}{2V_T R_x} + \frac{I_B R_y C_x}{2V_T}. \quad (10)$$



รูปที่ 4 ตัวควบคุม PD

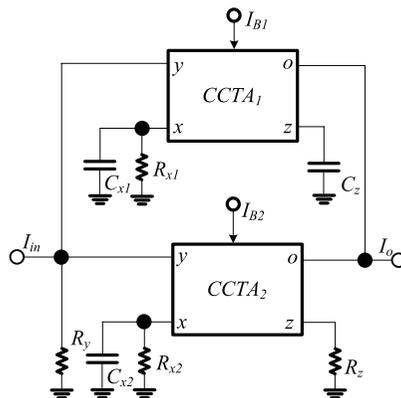
ตัวควบคุม PID

ตัวควบคุม PID ที่นำเสนอตั้งฟังก์ชันในรูปที่ 2 (ข) ประกอบด้วย วงจรตัวควบคุม PI ในรูปที่ 3 และวงจรตัวควบคุม PD ในรูปที่ 4 มาต่อร่วมกันดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าวงจรประกอบด้วย CCTA 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์อย่างละ 4 ตัว และ 3 ตัว จากคุณสมบัติของ CCTA สามารถเขียนเป็นสมการถ่ายโอนของตัวควบคุม PID ได้ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$\frac{I_O}{I_{in}} = g_{m1} \left[\frac{R_y C_{x1}}{C_z} + \frac{R_{x1} C_z}{R_y} \right] + g_{m2} \left[\frac{R_y R_z}{R_{x2}} + R_y C_{x2} \right] \quad (11)$$

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

$$\frac{I_O}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{2V_T} \left[\frac{R_y C_{x1}}{C_z} + \frac{R_{x1} C_z}{R_y} \right] + \frac{I_{B2}}{2V_T} \left[\frac{R_y R_z}{R_{x2}} + R_y C_{x2} \right] \quad (12)$$



รูปที่ 5 วงจรตัวควบคุม PID ด้วย CCTA ที่นำเสนอ

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (4) ที่เป็นสมการ PID ทั่วไปกับสมการที่ (11) จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่นำเสนอในรูปที่ 5 จะแบ่งออกเป็น PI กับ PD ได้ดังต่อไปนี้

$$K_p = g_{m1} \frac{R_y C_{x1}}{C_z} + g_{m2} \frac{R_y R_z}{R_{x1}} \quad (13)$$

$$T_i = g_{m1} \frac{R_{x1} C_z}{R_y} \quad (14)$$

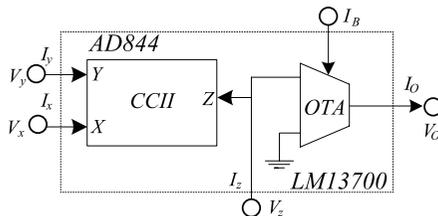
และ

$$T_d = g_{m2} R_y C_{x2} \quad (15)$$

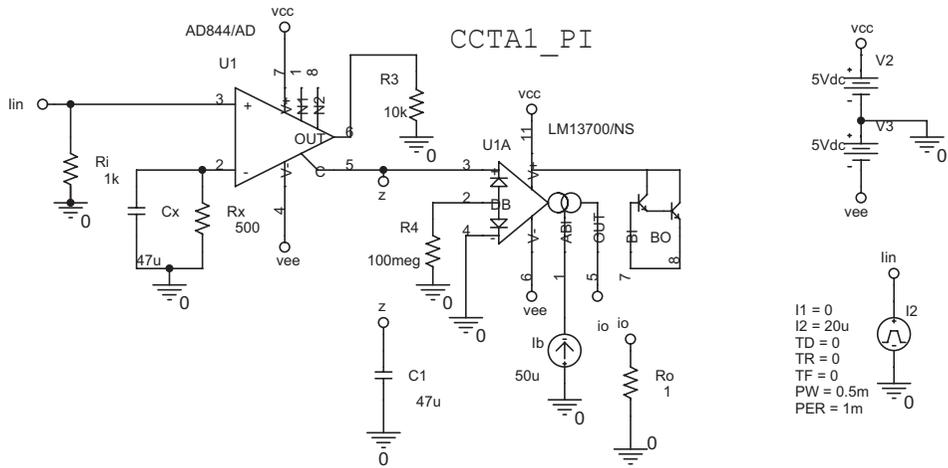
ผลการวิจัย

1. ผลจำลองการทำงานของตัวควบคุม PI ด้วย CCTA จาก AD844 กับ LM13700

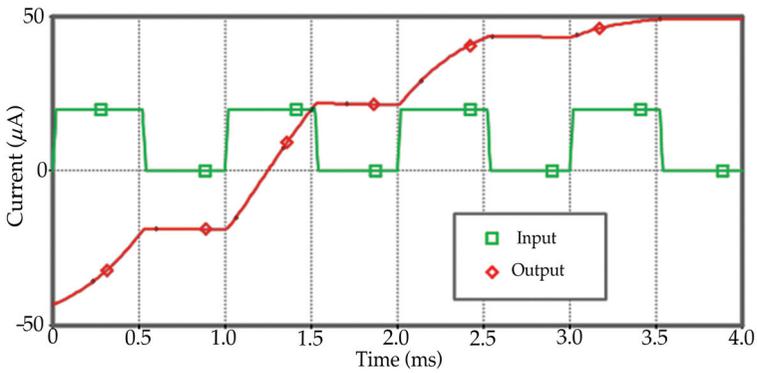
วงจรเสมือน CCTA [16] ด้วยไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเป็นไอซีเบอร์ AD844 [17] (CCII) และ LM13700 [18] (OTA) ดังรูปที่ 6 มาตรฐานวงจรตัวควบคุม PI ดังวงจรรูปที่ 3 โดย CCII ที่ใช้เป็นเบอร์ AD844 ของบริษัท Analog Devices กับ OTA เป็นเบอร์ LM13700 ของบริษัทเท็กซัส อินสตรูเมนต์ กำหนดแหล่งจ่ายเท่ากับ $\pm 5V$ ค่า $R_y = 1k\Omega$, $R_x = 500\Omega$ และ $C_x = C_z = 47\mu F$ ให้กระแสไบแอส $I_B = 52\mu A$ ค่าของความต้านทานที่เป็นโพลดวงจรเท่ากับ 1Ω ดังรูปที่ 7 ซึ่งจะทำได้ค่าพารามิเตอร์ $P=1$ และ $I = 23.5\mu s$ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นรูปแบบสเคปขนาด $20\mu A$ ที่ความถี่ 1 kHz จะได้ผลการจำลองการทำงานในช่วงเริ่มต้นดังรูปที่ 8 (ก) จะเห็นได้ว่าจากสมการที่ (6) ซึ่งเป็นสมการคุณลักษณะเฉพาะของวงจร PI อัตราขยาย P ควบคุมได้ด้วยค่า R_x และ I_B ในรูปที่ 8 (ข) แสดงให้เห็นการปรับค่าพารามิเตอร์ของ P ด้วยการปรับค่าความต้านทาน $R_x = 500\Omega$, $1k\Omega$ และ $2k\Omega$ ในรูปที่ 8 (ค) แสดงให้เห็นผลการจำลองจากการปรับกระแสไบแอส $I_B = 25\mu A$, $50\mu A$ และ $100\mu A$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PI สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนสภาวะการอินทิเกรตสามารถควบคุมได้ด้วยค่าของ C_x และ C_z



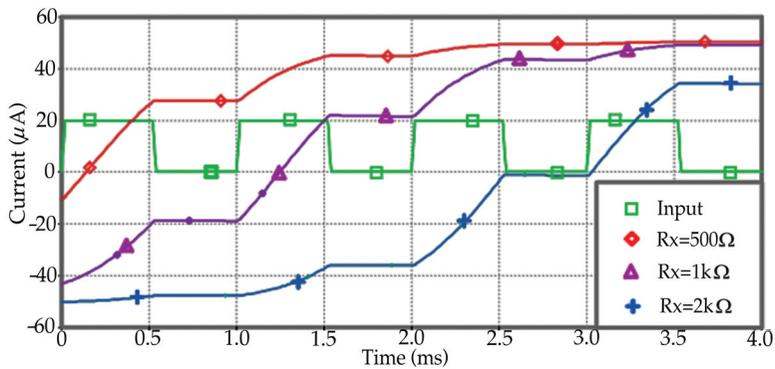
รูปที่ 6 วงจรเสมือนวงจรขยายสายพานกระแสส่งผ่านความนำ



รูปที่ 7 วงจรตัวควบคุม PI ด้วยวงจรเสมือน CCTA จาก AD844 กับ LM13700

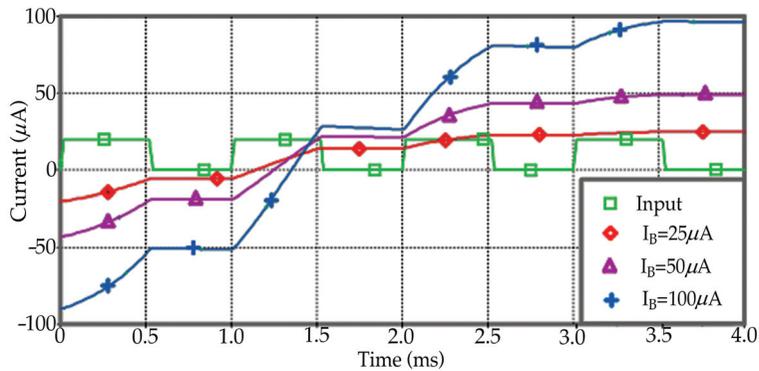


(ก) ในสภาวะเริ่มต้น



(ข) เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_x

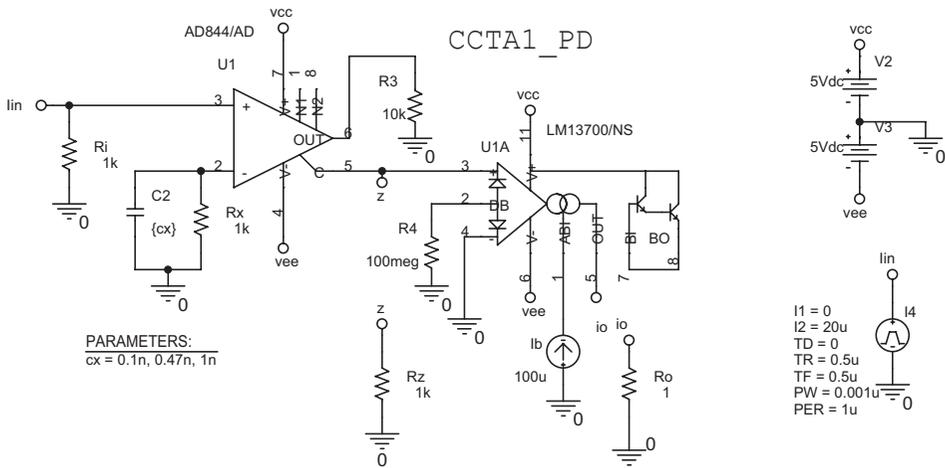
รูปที่ 8 ผลการจำลองตัวควบคุม PI

(ค) เมื่อทำการปรับกระแส I_B

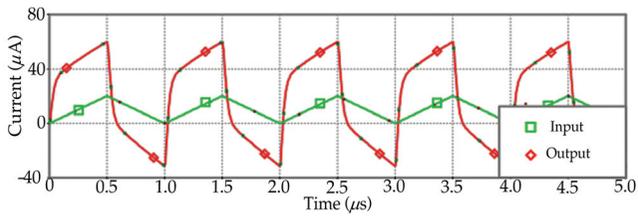
รูปที่ 8 ผลการจำลองตัวควบคุม PI (ต่อ)

2. ผลจำลองการทำงานของตัวควบคุม PD ด้วย CCTA จาก AD844 กับ LM13700

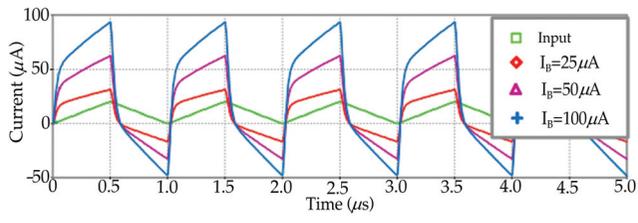
ตัวควบคุม PD ในรูปที่ 4 สามารถใช้วงจรเสมือน CCTA ด้วย IC AD844 กับ LM13700 ได้ ดังรูปที่ 9 กำหนดแหล่งจ่ายเท่ากับ $\pm 5V$, $R_x = R_y = R_z = 1k\Omega$ และ $C_x = C_z = 0.1nF$ ให้กระแสไบแอส $I_B = 52\mu A$ ค่าของความต้านทานที่เป็นโพลดวงจรเท่ากับ 1Ω ซึ่งจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ $P = 1$ และ $D = 0.1 ns$ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นรูปสามเหลี่ยมขนาด $20\mu A$ ที่ความถี่ $1 MHz$ จะได้ผลการจำลองการทำงานในช่วงเริ่มต้นดังรูปที่ 10 (ก) จะเห็นได้ว่าจากสมการที่ (10) ซึ่งเป็นสมการคุณลักษณะเฉพาะของวงจร PD อัตราขยาย P ควบคุมได้ด้วยค่า R_x และ I_B ในรูปที่ 10 (ข) แสดงให้เห็นการปรับค่าพารามิเตอร์ของ P ด้วยการปรับค่ากระแสไบแอส $I_B = 25\mu A$, $50\mu A$ และ $100\mu A$ ในรูปที่ 10 (ค) แสดงให้เห็นผลการจำลองจากการปรับกระแสไบแอส $I_B = 25\mu A$, $50\mu A$ และ $100\mu A$ เช่นกัน แต่เปลี่ยนการป้อนอินพุตเป็นรูปแบบสเตปที่มีขนาดเท่ากับ $20\mu A$ เช่นกัน จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม PD สามารถควบคุมได้วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นไปตามทฤษฎี ส่วนสภาวะการดิฟเฟอเรนเชียลสามารถควบคุมได้ด้วยค่าของ C_x



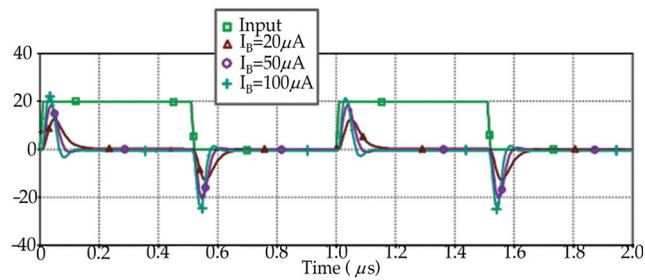
รูปที่ 9 วงจรตัวควบคุม PD ด้วยวงจรเสมือน CCTA จาก AD844 กับ LM13700



(ก) ในสภาวะเริ่มต้น



(ข) เมื่อทำการไบแอสกระแส I_B



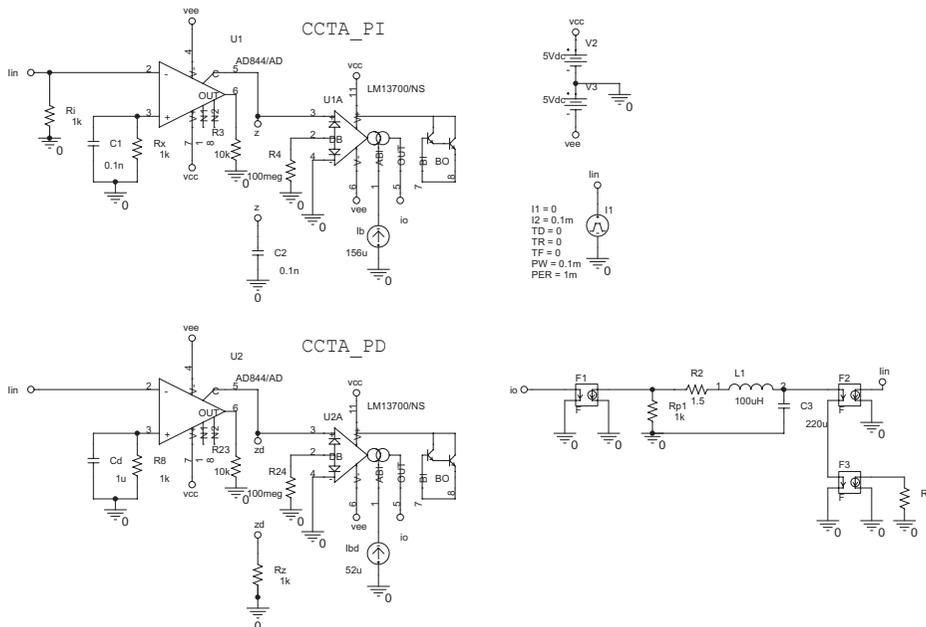
(ค) เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นรูปแบบสเตรป

รูปที่ 10 ผลการจำลองตัวควบคุม PD

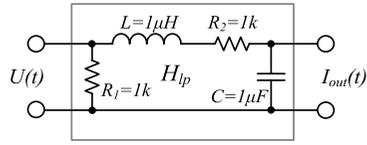
3. ผลจำลองการทำงานของตัวควบคุม PID ด้วย CCTA จาก AD844 กับ LM13700

ตัวควบคุม PID ที่นำเสนอด้วยวงจรเสมือน CCTA ในรูปที่ 11 เกิดจากการนำตัวควบคุม PID ดังรูปที่ 5 กำหนดให้ค่าความต้านทาน $R_y = R_{x1} = R_{x2} = R_z = 1k\Omega$ ค่าตัวเก็บประจุ $C_{x1} = C_z = 1nF$, $C_{x2} = 0.1nF$ และ $I_{B1} = 52\mu A$ และ $I_{B2} = 52\mu A$ ซึ่งจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ $P = 1$, $I = 1$ ms และ $D = 0.1$ ns ตามลำดับ แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร $\pm 5V$ และกระแสไบแอส I_B และ $I_{B2} = 52\mu A$ กำหนดให้สัญญาณอินพุตที่เป็นรูปสัญญาณแบบสเตป ที่มีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 0.1 ms ที่ความถี่ 1 kHz ป้อนให้ตัวควบคุม PID พร้อมด้วยแพลนของระบบเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ ในรูปที่ 12 ที่สามารถเขียนสมการถ่ายโอนของวงจรได้ดังสมการที่ (16) นำมาใช้ในการตรวจสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบปิดดังรูปที่ 13 ให้เป็นที่ปรากฏ

รูปที่ 14 (ก) เป็นผลการจำลองการทำงานของระบบป้อนกลับแบบปิด แสดงให้เห็นช่วงเริ่มต้นจาก 0 ถึง $20\mu s$ ด้วยการเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มต้นของสัญญาณในช่วงการไต่ขึ้น จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ของอินพุต และเอาต์พุตก็สอดคล้องกันเป็นไปตามทฤษฎีในรูปที่ 14 (ข) เป็นการแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุตในช่วง 5 รูปคลื่น ซึ่งเป็นสภาวะคงตัวของระบบ รูปที่ 14 (ค) แสดงให้เห็นถึงการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแสไบแอส $I_{B1} = 52\mu A$, $104\mu A$ และ $156\mu A$ ซึ่งเป็นส่วนของตัวควบคุม PI ทำให้ได้พารามิเตอร์ $P = 1, 2$ และ 3 $I = 1 \mu s$, $2 \mu s$ และ $3 \mu s$ พร้อมกับคงค่ากระแสไบแอส $I_{B2} = 52\mu A$ ในส่วนของตัวควบคุม PD พารามิเตอร์ $P = 1$ และ $D = 0.1 \mu s$ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกระแส I_{B1} มากขึ้น ช่วงไต่ขึ้นยิ่งเข้าใกล้อินพุตมากขึ้นเช่นกัน ในรูปที่ 14 (ง) คงที่กระแสไบแอส $I_{B1} = 52\mu A$ จากนั้นทำการปรับกระแส $I_{B2} = 52\mu A$, $104\mu A$ และ $156\mu A$ ตามลำดับ จะพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้น อันเนื่องระบบอยู่ในสภาวะเหมาะสมระหว่างตัวควบคุมกับแพลนของระบบ

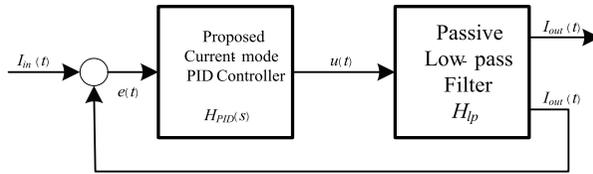


รูปที่ 11 ตัวควบคุม PID ที่นำเสนอจากวงจรเสมือน CCTA จาก AD844 กับ LM13700

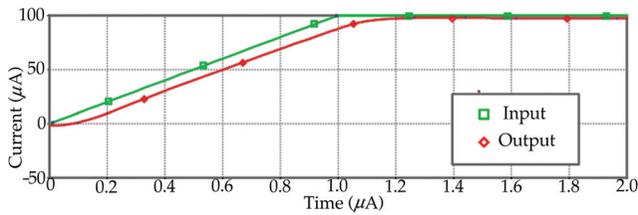


รูปที่ 12 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านด้วย RLC แพลนที่ใช้ในการทดลอง

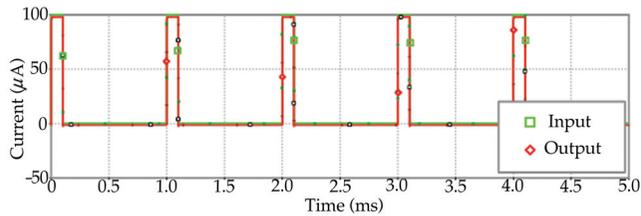
$$H_{lp} = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{R_1}{R_1 L C s^2 + R_2 C s + 1} \quad (16)$$



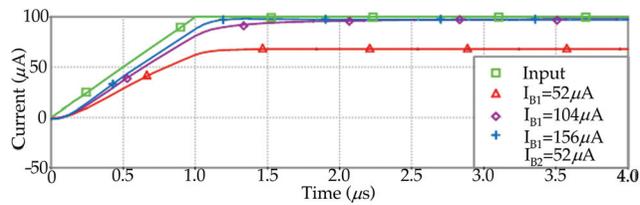
รูปที่ 13 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบปิด



(ก) สภาวะเริ่มต้น

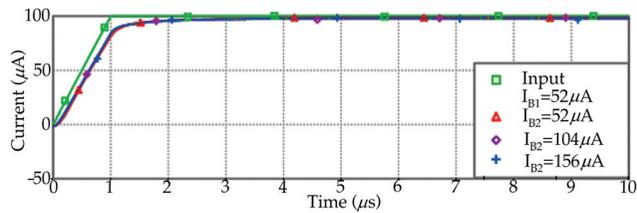


(ข) สภาวะคงตัว



(ค) การปรับกระแสไบแอส I_{B1}

รูปที่ 14 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุม PID

(ง) การปรับกระแสไบแอส I_{B2}

รูปที่ 14 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุม PID (ต่อ)

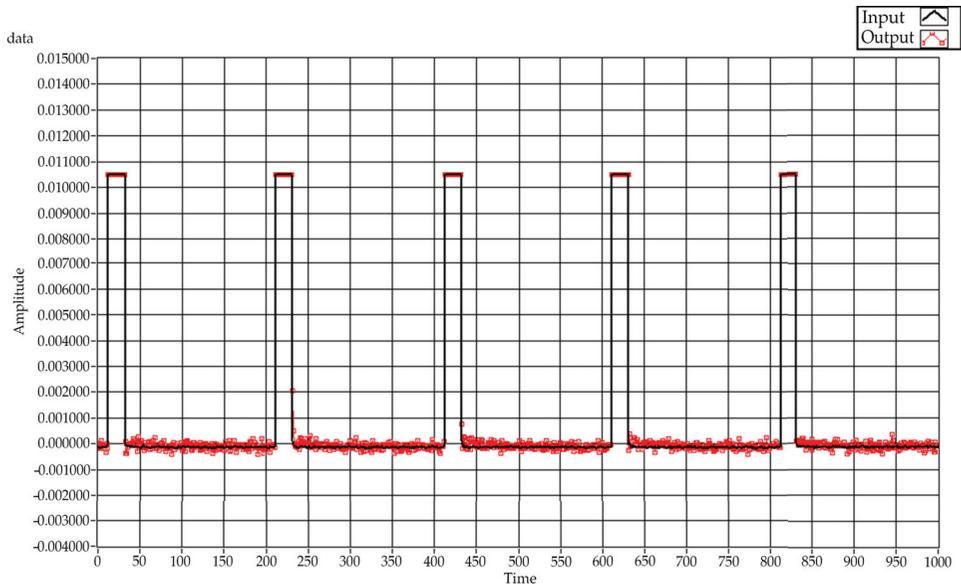
4. ผลการทำงานของตัวควบคุม PID ด้วยไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดบนชุดทดลอง NI ELVIS II

ยิ่งไปกว่านั้นเพื่อเป็นยืนยันว่าการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID ในโหมดกระแสด้วยวงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำ สามารถทำงานได้จริงด้วยไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ทั้งนี้จากหัวข้อที่ 3. ที่กล่าวมาแล้วนั้น มาต่อด้วยอุปกรณ์จริงลงบนแผงทดลองของบริษัทเนชั่นแนล อินสทรูเมนต์ส์ NI ELVIS II [19] ให้เห็นวงจรตัวควบคุม PID ที่นำเสนอทำงานบนโปรแกรม LabVIEW อุปกรณ์ที่ใช้งานเหมือนกันกับหัวข้อที่ 3. ทุกประการ ยกเว้นค่ากระแสไบแอสของ LM13700 อยู่ที่ 1 mA. ที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง $\pm 5V$ อินพุตที่ป้อนให้กับระบบมีขนาดเท่ากับ 0.1 mA ที่ความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 0.1 ms ของสัญญาณความถี่ที่ 1 kHz ดังแสดงในรูปที่ 15 (ก) เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของระบบในสภาวะเริ่มต้นเช่นกันที่รูปที่ 15 (ข) แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตในสภาวะคงตัว 5 รูปคลื่น



(ก) ในสภาวะเริ่มต้น

รูปที่ 15 ผลการทำงานของตัวควบคุม PID บนโปรแกรม LabVIEW



(ข) ในสภาวะคงตัว

รูปที่ 15 ผลการทำงานของตัวควบคุม PID บนโปรแกรม LabVIEW (ต่อ)

สรุปและเสนอแนะ

บทความวิจัยเรื่องการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID ในโหมดกระแสด้วย CCTA วงจรตัวควบคุมที่นำเสนอประกอบด้วย CCTA จำนวน 2 ตัว ต่อทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานแบบต้องลงกราวด์อย่างละ 3 ตัว และ 4 ตัว สามารถปรับพารามิเตอร์ของแต่ละส่วนของตัวควบคุมได้อย่างอิสระจากกันด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ และยังสามารถปรับพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice จากโครงสร้างของ CCTA ด้วยไอซี AD844 และ LM13700 ให้ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าผลการทดลองด้วยไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเบอร์ AD844 กับ LM13700 บนชุดทดลอง NI ELVIS II ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ก็ให้ผลทดลองสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎีเช่นกัน

References

- [1] Bennette, S. (1993). Development of The PID Controller. IEEE Control Systems Mag 1993. Vol. 13. pp. 58-65
- [2] Ang, K.H., Chong, G.C.Y. and Li, Y. (2005). PID Control System Analysis, Design, and Technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 13. Issue. 4. pp.559-576

- [3] Toumazou, C., Lidgey, F.J. and Haigh. D.G. (1990). *Analogue IC design: The Current-mode Approach*, 1990. London: Peter Peregrines
- [4] Ferri, G. and Guerrini, NC. (2003). *Low-voltage low-power CMOS Current Conveyors*. London: Kluwer Academic Publishers
- [5] Franco, S. (1998). *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill International Editions
- [6] Erdal, C., Toker, A. and A. Acar. (2001). OTA-C Based Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller and Calculating Optimum Parameter Tolerances. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. Vol. 9. No. 2. pp.189-198
- [7] Minaei, S., Yuce, E., Tokat, S. and Cicekoglu, O. (2005). Simple Realization of Current-Mode and Voltage-Mode PID, PI and PD controllers. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*., Croatia 20. pp. 195-198
- [8] Yuce, E., Tokat, S., Kizilkaya, A. and Cicekoglu, O. (2006). CCII Based PID Controllers Employing Grounded Passive Components. *International Journal of Electronics and Communications (AEU)*. Vol. 60. No. 5. pp. 399-403
- [9] Yuce, E., Tokat, S., Minaei, S. and Cicekoglu, O. (2006). Low Component-Count Insensitive Current-Mode and Voltage-Mode PID, PI and PD Controllers. *Frequenz*. Vol. 60. No. 3-4. pp. 29-33
- [10] Erdal, C., Kuntman, H. and Kafali, S. (2004). A Current Controlled Coveyor Based Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*. Vol. 4. No. 2. pp. 1243-1248
- [11] Keskin, A.U. (2006). Design of a PID Controller Circuit Employing CDBAs. *International Journal of Engineering Education*. Vol. 43. No. 1. pp.48-56
- [12] Sagbas, M., Koksai, M. and Ayten, U.E. (2013). Design of Dominantly Proportional PID Controller Using a Single Commercially Available Active Component. 36th *International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. pp. 427-430
- [13] Prokop, R. and Musil, V. (2005). New Modern Circuit Block CCTA and Some its Applications. In *The Fourteenth International Scientific and Applied Science Conference-Electronics ET'2005, Book 5*. Sofia: TU Sofia. pp. 93-98
- [14] Prokop, R. and Musil, V. (2005). Modular Approach to Design of Modern Circuit Blocks for Current Signal Processing and New Device CCTA. In *Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Signal and Image Processing, Anaheim, USA*. pp. 494- 499

- [15] Prokop, R. and Musil, V. (2005). 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
- [16] Jaikla, W., Silapan, P., Chanapromma, C. and Siripruchyanun, M. (2008). Practical Implementation of CCTA Based on Commercial CCII and OTA. In *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2008)*. Thailand, 2008, pp. 1-4
- [17] Analog Devices. (2009). *AD844 Monolithic Op Amp*, 20 p. Access (1 March 2017). Available ([www:http://www.analog.com](http://www.analog.com))
- [18] Texas Instruments. (2015). *LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifiers with Linearizing Diodes and Buffers*, p. 37. Access (1 March 2017). Available ([www.http://www.ti.com](http://www.ti.com))
- [19] National Instruments. (2016). *NI ELVIS II Modular Engineering Educational Laboratory Platform*. Access (1 March 2017). Available ([www.http://www.sine.no.com](http://www.sine.no.com))