

การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์
โดยใช้วงจรขยายความนำ
อนุชา แก้วพูลสุข

Design of OTA-based Triangular-to-Sine Waves Converter
Anucha Kaewpoonsuk

กลุ่มวิจัยฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
Physics-Electronics Research Group, Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000,
Thailand.

Corresponding author. E-mail address: kaewpoonsuk5@yahoo.com, anuchak@nu.ac.th (A. Kaewpoonsuk)

Received 5 April 2007; accepted 2 November 2007

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์แบบง่ายโดยใช้วงจรขยายความนำ (operational transconductance amplifier; OTA) ต่อร่วมกับตัวต้านทาน หลักการของการออกแบบอาศัยคุณสมบัติที่เป็นฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (tanh function) ของวงจรคู่ผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งประกอบอยู่ในวงจรขยายความนำที่มีการผลิตจำหน่ายโดยทั่วไป สมการอินเวอร์สไซน์ที่ได้สังเคราะห์ขึ้นซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันอินเวอร์สไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์เป็นการอาศัยวิธีการประมาณจากหลักการกระจายอนุกรมกำลัง และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบคุณสมบัติการทำงานของวงจรที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้น ในเบื้องต้นได้ใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงาน หลังจากนั้นได้ใช้วิธีต่อวงจรบนบอร์ดทดลอง โดยเลือกใช้วงจรขยายความนำซึ่งมีจำหน่ายในท้องตลาดสามรุ่น ได้แก่ เบอร์ CA3080, CA3280, และ LM13600 เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการที่ได้นำเสนอสามารถนำไปใช้ได้จริง ผลจากการทดสอบการทำงานพบว่า เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันอินพุตเป็นรูปสามเหลี่ยม ความถี่ 1 kHz จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเป็นสัญญาณรูปไซน์ความถี่เดียวกัน โดยค่าผลรวมฮาร์โมนิกจากการใช้วงจรขยายความนำทั้งสามรุ่นมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.5%, 0.55% และ 0.87% ตามลำดับ

คำสำคัญ: วงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์; วงจรขยายความนำ; วงจรโอทีเอ

Abstract

The present work proposed a simple triangular-to-sine wave converter circuit by using operational transconductance amplifiers (OTAs) with resistors. The method made use of the hyperbolic tangent behavior of bipolar differential pair in OTA available from the industry. Synthesized inverse-sine equation in inverse-hyperbolic tangent form was approximated using power series expansion with suitable adjusted parameter obtained from calculation. The PSPICE program was used to simulate the circuit. The circuit was made on testing board using OTAs CA3280, CA3280 and LM13600-types in order to ensure that the proposed hypothesis was valid. After supplying triangular wave with frequency of 1 kHz, all the output signals were sine wave with the same frequency with 0.5%, 0.55% and 0.87% total harmonic distortions, respectively.

Keywords: Triangular-to-sine waves converter; Operational transconductance amplifier; OTA

บทนำ

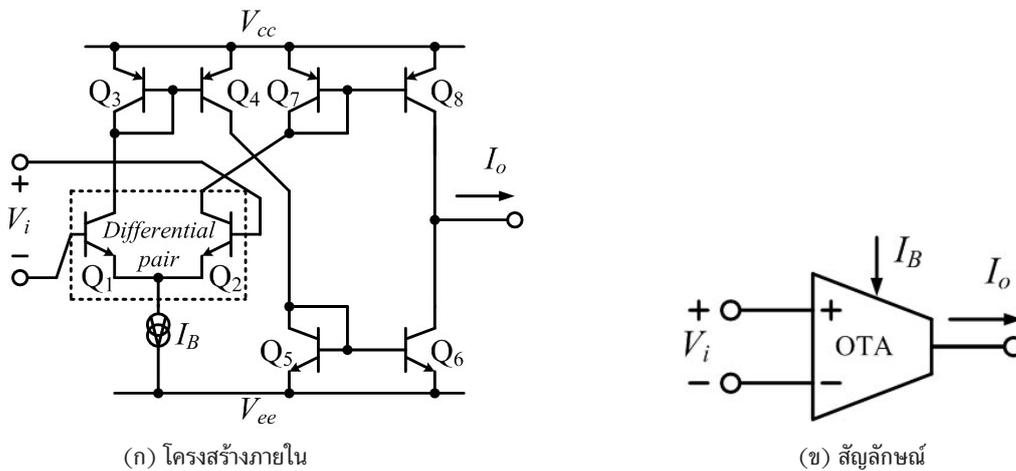
วงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์เป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการประมวลผลสัญญาณในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานที่สำคัญ ได้แก่ การใช้เป็นส่วนประกอบของวงจรภายในเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generators) ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์เป็นที่สนใจสำหรับวิศวกรและนักพัฒนาออกแบบวงจรกันอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างหลักการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณที่ได้มีการนำเสนอไว้ เช่น การใช้โครงข่ายของไดโอด (Heflin, 1973) โดยอาศัยวิธีการประมาณเชิงเส้นแบบเป็นช่วง (piecewise linear approximation) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ หากต้องการสังเคราะห์สัญญาณรูปไซน์ให้มีค่าผลรวมฮาร์โมนิก (total harmonic distortions; THD)

มีค่าต่ำจำเป็นต้องใช้ไดโอดและตัวต้านทานเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณต่อมาเป็นการออกแบบโดยใช้วงจรถูผลต่าง (differential pair) จำนวนหลายคู่ต่อขนานกัน (Fattaruso & Meyer, 1985; Gilbert, 1977; Gilbert, 1982; Ishizuka et al., 1991; Pessatti & dos Reis Filho, 2002) เช่นเดียวกับหลักการแรก หากต้องการลดค่าของผลรวมฮาร์โมนิกจำเป็นต้องเพิ่มคู่ของวงจรถูผลต่างให้มากขึ้น ซึ่งทำให้ทั้งสองหลักการเหมาะสำหรับการพัฒนาในรูปแบบของวงจรรวม ตัวอย่างที่สำคัญอีกตัวอย่างหนึ่ง ได้แก่ การอาศัยวงจรถูผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ต่อร่วมกับตัวต้านทานและแหล่งจ่ายกระแสอีกสองแหล่ง (Meyer et al., 1976) ซึ่งถือว่าเป็นหลักการที่ค่อนข้างเรียบง่าย สามารถที่จะพัฒนาขึ้นในรูปแบบของวงจรรวม รวมทั้งการต่อใช้งานในลักษณะดีสครีท (discrete) เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า วงจรขยายความนำจัดเป็นวงจรพื้นฐานสารพัดประโยชน์ประเภทหนึ่งที่ได้มีการผลิตเป็นวงจรรวมหรือไอซี (integrated circuit; IC) เพื่อจำหน่ายโดยทั่วไป โครงสร้างภายในของวงจรรขยายความนำโดยพื้นฐานแล้ว จะประกอบด้วยวงจรถูผลต่างต่อร่วมกับวงจรถูสะท้อนกระแส (current mirror) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยใช้วงจรรขยายความนำต่อร่วมกับตัวต้านทานภายนอก เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป หลักการของการออกแบบเป็นการอาศัยคุณลักษณะการทำงานของวงจรถูผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งประกอบอยู่ในวงจรรขยายความนำ

ในรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างภายในและสัญลักษณ์โดยทั่วไปของวงจรรขยายความนำ เมื่อ I_B คือ กระแสไบอัสของวงจรถูผลต่าง ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ต่อร่วมกันเป็นวงจรถูผลต่าง การทำงานของวงจรถูผลต่างจะให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขาอินพุตทั้งสอง สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเอาต์พุต (I_o) กับแรงดันที่ขาอินพุต (V_i) สามารถแสดงได้ดังนี้ คือ

$$I_o = I_B \tanh(V_i / 2V_T) \quad (1)$$

เมื่อ V_T คือ ค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิ (thermal voltage) มีค่าประมาณ 26 มิลลิโวลต์ ณ อุณหภูมิห้อง



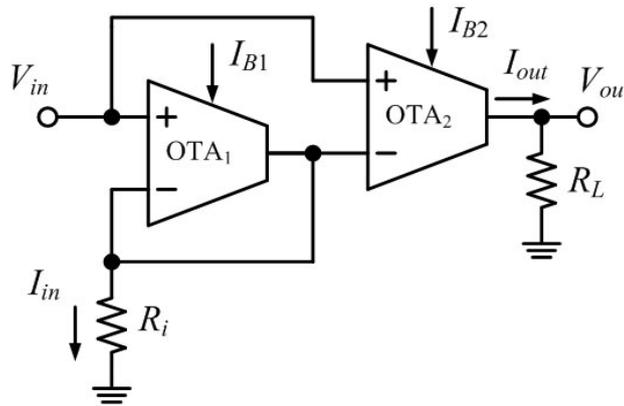
รูปที่ 1 วงจรรขยายความนำ

จากสมการที่ (1) การประยุกต์ใช้งานวงจรรขยายความนำ ส่วนใหญ่มักกำหนดให้ $V_i < 2V_T$ ซึ่งจะสามารถประมาณได้ว่า $I_o = I_B V_i / 2V_T$ แต่ในการศึกษาครั้งนี้ จะยังคงอาศัยสมการที่ (1) เป็นคุณสมบัติหลักสำหรับการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณที่จะนำเสนอ แม้ว่าการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยใช้วงจรรขยายความนำจะได้เคยมีการนำเสนอไว้บ้างแล้ว (CA3280_datasheet, 2002) แต่วิธีดังกล่าวใช้ได้กับเฉพาะวงจรรขยายความนำแบบที่ได้มีการต่อขาอินพุตของวงจรถูผลต่างออกมาภายนอกให้ใช้งาน (มีเฉพาะเบอร์ CA3280) เท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้กับวงจรรขยายความนำเบอร์อื่น ๆ ได้ นอกจากนี้วิธีการต่อวงจร

ดังกล่าวค่อนข้างซับซ้อน โดยต้องใช้ตัวต้านทานหลายตัวต่อร่วมกับวงจรขยายความนำ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการต่อวงจรที่แตกต่างออกไปกับวิธีการดังกล่าว โดยวงจรมีโครงสร้างที่เรียบง่ายกว่า นอกจากนี้ยังสามารถที่จะปรับอัตราขยายของวงจรได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ผู้ต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานสามารถทำได้โดยสะดวกทั้งในรูปแบบตีสคริปต์และแบบวงจรรวม

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการ

ในรูปที่ 2 แสดงวงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรมีโครงสร้างที่เรียบง่าย การออกแบบอาศัยเพียงวงจรขยายความนำและตัวต้านทานอย่างละ 2 ตัว ต่อร่วมกัน



รูปที่ 2 วงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์

หลักการการทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ OTA₁ และตัวต้านทาน R_i ต่อร่วมกัน ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดัน V_{in} เป็นสัญญาณกระแส I_{in} โดยมีความสัมพันธ์กันดังนี้ คือ

$$V_{in} = 2V_T \tanh^{-1}(I_{in}/I_{B1}) + I_{in}R_i \tag{2}$$

จากสมการที่ (2) เทอม $2V_T \tanh^{-1}(I_{in}/I_{B1})$ คือ ค่าแรงดันตกคร่อมขาอินพุตของ OTA₁ จากการอาศัยหลักการกระจายอนุกรมกำลัง จะสามารถประมาณได้ว่า

$$V_{in} = 2V_T \left[\left(\frac{I_{in}}{I_{B1}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{I_{in}}{I_{B1}} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{I_{in}}{I_{B1}} \right)^5 + \dots \right] + I_{in}R_i \tag{3}$$

$$\frac{V_{in}}{(2V_T + I_{B1}R_i)} = \left(\frac{I_{in}}{I_{B1}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{I_{in}}{I_{B1}} \right)^3 \left(\frac{1}{1+K} \right) + \frac{1}{5} \left(\frac{I_{in}}{I_{B1}} \right)^5 \left(\frac{1}{1+K} \right) + \dots \tag{4}$$

เมื่อ

$$K = \frac{I_{B1}R_i}{2V_T}$$

พิจารณอนุกรมกำลังของฟังก์ชัน $y = \sin^{-1}(x)$

$$y = \sin^{-1}(x) = x + \frac{1}{3}x^3 \left(\frac{1}{2}\right) + \frac{1}{5}x^5 \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right) + \dots \quad (5)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (4) กับ (5) โดยแทนค่า $x = (I_{in}/I_{B1})$ และ $y = V_{in}/(2V_T + I_{B1}R_i)$ โดยเลือกใช้ค่า K ที่เหมาะสมจะสามารถประมาณได้ว่า

$$V_{in} = (2V_T + I_{B1}R_i) \sin^{-1}(I_{in}/I_{B1}) \quad (6)$$

ในทางกลับกัน

$$I_{in} = I_{B1} \sin(V_{in}/(2V_T + I_{B1}R_i)) \quad (7)$$

จากรูปที่ 2 ขาอินพุตของ OTA₂ ต่อขนานอยู่กับขาอินพุตของ OTA₁ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณกระแส I_{in} เป็นสัญญาณกระแสเอาต์พุต I_{out} ซึ่งมีอัตราขยาย คือ

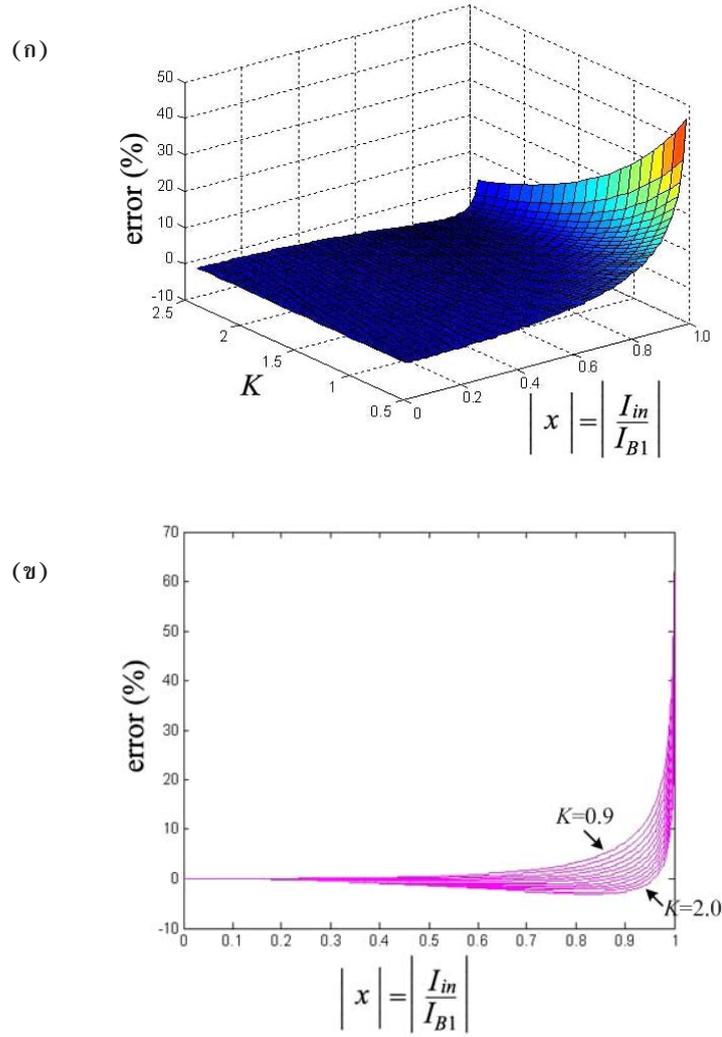
$$I_{out} = \frac{I_{B2}}{I_{B1}} I_{in} \quad (8)$$

แทนค่าสมการที่ (7) ลงในสมการที่ (8) และ เนื่องจาก $V_{out} = I_{out}R_L$ ดังนั้น จะได้

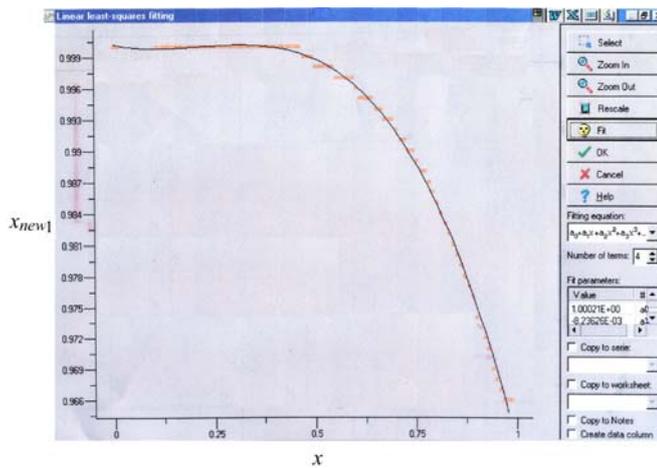
$$V_{out} = R_L I_{B2} \sin(V_{in}/(2V_T + I_{B1}R_i)) \quad (9)$$

จากฟังก์ชันการส่งผ่านในสมการที่ (9) ถ้ากำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณในรูปที่ 2 เป็นสัญญาณแรงดันรูปสามเหลี่ยมที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $(2V_T + I_{B1}R_i)\pi/2$ จะได้เอาต์พุตของวงจรเป็นสัญญาณแรงดันรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ $R_L I_{B2}$

จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5) เพื่อให้สมการทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ผู้วิจัยได้ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ K ที่เหมาะสม ตลอดช่วงปฏิบัติการของ x ซึ่งมีค่าจาก -1 ถึง 1 ในรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสมการทั้งสอง ซึ่งในที่นี้จะถือว่าเป็นค่าผิดพลาด (error) ที่เกิดขึ้นระหว่างสมการที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้น (สมการที่ (4)) กับสมการของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ (\sin^{-1} function) ที่แท้จริง (สมการที่ (5)) จากผลการพิจารณาจะเห็นว่า ค่า K หนึ่งๆ จะมีค่า error เกิดขึ้นไม่คงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของ x ในขณะนั้น ดังนั้น การเลือกใช้ค่า K ค่าใดค่าหนึ่งก็จะเหมาะสมหรือสามารถใช้ได้กับค่า x ช่วงใดช่วงหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถใช้ได้กับค่า x ตลอดช่วงทั้งหมดได้ สำหรับวิธีการปรับปรุงแก้ไขวิธีแรก ได้แก่ การแบ่งค่า x ออกเป็นช่วง แล้วเลือกใช้ค่า K ที่เหมาะสมในแต่ละช่วง แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ จะมีผลทำให้อัตราขยายของระบบ (เทอม $2V_T + I_{B1}R_i$) ในสมการที่ (6) และสมการที่ (7) ในแต่ละช่วงมีค่าไม่เท่ากัน วิธีการที่สอง ได้แก่ การเลือกใช้ค่า K ค่าใดค่าหนึ่ง แต่ทำการประมวลผลค่า x ก่อนที่จะนำไปเป็นอินพุตของระบบ โดยผู้วิจัยได้ลองพิจารณาให้ค่า $K = I_{B1}R_i/2V_T = 1$ และทำการเขียนโปรแกรมเพื่อสังเคราะห์ค่า x ค่าใหม่โดยตั้งชื่อตัวแปรใหม่นี้ว่าเป็น x_{new1} เพื่อใช้แทนค่า $x (= I_{in}/I_{B1})$ เดิมในสมการที่ (4) โดยตั้งเงื่อนไขว่า ค่า error ที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 0.1% ซึ่งจะทำให้ได้ค่า x_{new1} ดังแสดงในรูปที่ 4 ต่อจากนั้นได้ใช้โปรแกรม Data Master 2000 สังเคราะห์สมการของตัวแปร x_{new1} นี้ ซึ่งจะได้ว่า



รูปที่ 3 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ K ที่เหมาะสม (ก) แบบ 3 มิติ (ข) แบบ 2 มิติ



รูปที่ 4 การสังเคราะห์หาค่า x_{new1}

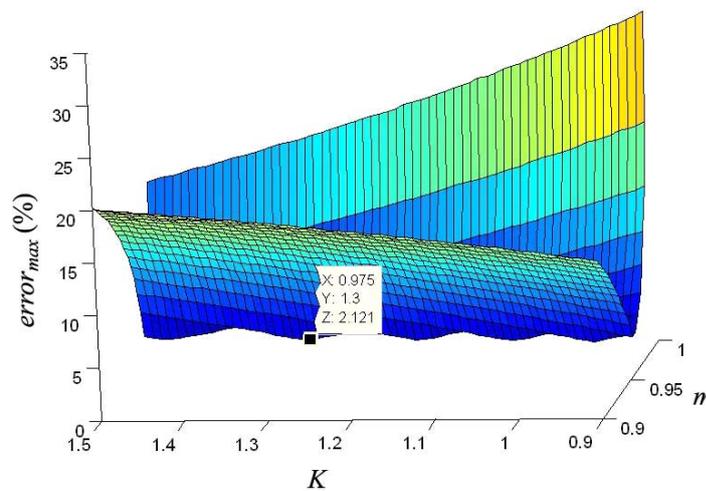
$$x_{new1} = 1.00021 - 0.00824x + 0.05138x^2 - 0.08150x^3 \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) จะเห็นได้ว่า การประมวลผลค่า x เดิม เพื่อให้ได้ค่า x_{new1} ใหม่ตามสมการดังกล่าวนี้เป็นเรื่องที่ยากยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วงจรประมวลผลสัญญาณแบบอนาลอก วิธีการต่อมาผู้วิจัยได้ใช้วิธีกำหนดค่าตัวแปร m เพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งตัวเพื่อใช้เป็นค่าคงที่ที่จะนำไปคูณกับค่า x เดิม เพื่อสังเคราะห์ค่า x_{new2} ขึ้นมาใหม่ โดย $x_{new2} = mx = mI_{in}/I_{B1}$ และนำไปแทนค่า x เดิมในสมการที่ (4) ซึ่งจะได้ออกมาใหม่

$$\frac{V_{in}}{m(2V_T + I_{B1}R_i)} = \left(\frac{I_{in}}{I_{B1}}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{I_{in}}{I_{B1}}\right)^3\left(\frac{m^2}{1+K}\right) + \frac{1}{5}\left(\frac{I_{in}}{I_{B1}}\right)^5\left(\frac{m^4}{1+K}\right) + \dots \quad (11)$$

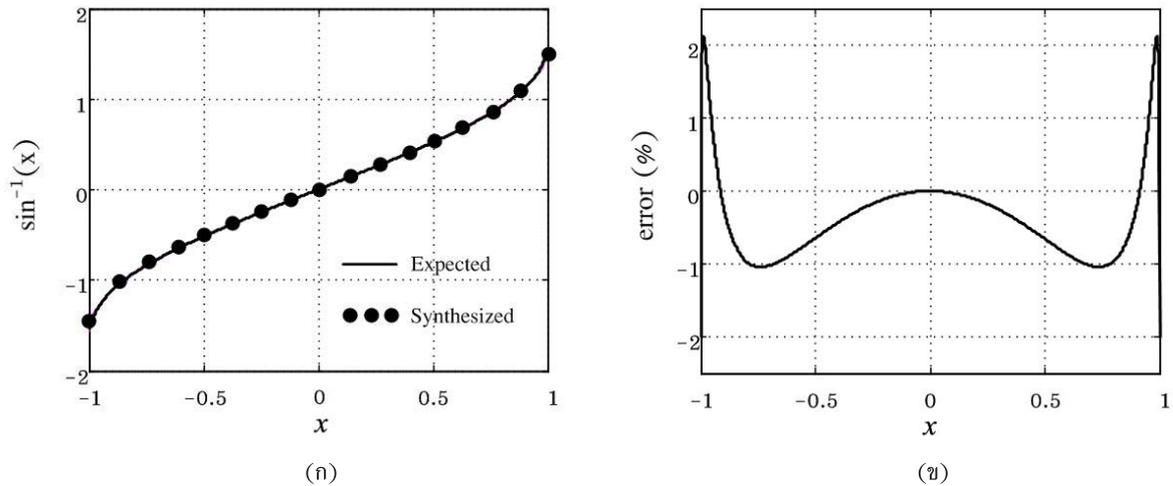
จากสมการที่ (11) ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมโดยแปรค่าทั้งค่า K และค่า m เพื่อให้สมการที่ (11) มีค่าเข้าใกล้สมการที่ (5) มากที่สุด โดยนำค่า $error_{max}$ ตลอดช่วงขนาดของ x มาพิจารณาว่า ที่ค่า K และ m ใดจะให้ค่า $error_{max}$ ดังกล่าวออกมามีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกจุดที่ค่า $K = 1.3$ และ $m = 0.975$ ซึ่งจุดดังกล่าวนี้ให้ค่า $error_{max}$ อยู่ที่ประมาณ 2.1% โดยในที่สุดจะสามารถประมาณได้ว่า

$$V_{out} = R_L I_{B2} \sin\left(\frac{V_{in}}{m(2V_T + I_{B1}R_i)}\right) \quad (12)$$



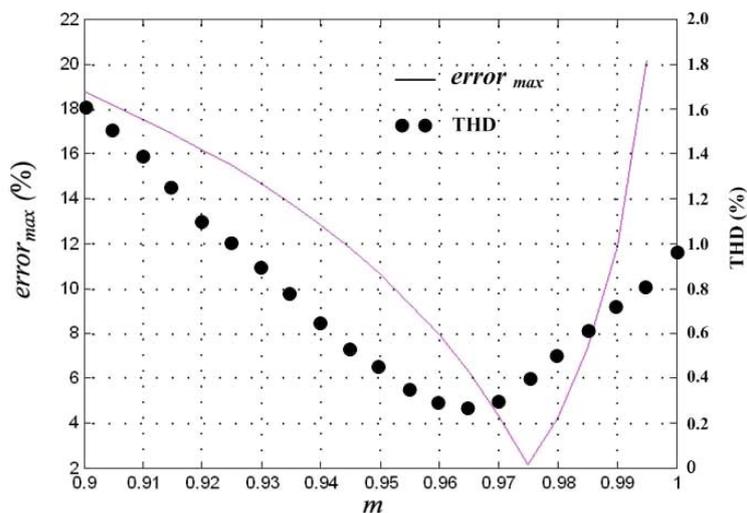
รูปที่ 5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ K และค่า m ที่เหมาะสม

ในรูปที่ 6(ก) แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างสมการของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ที่ได้สังเคราะห์ขึ้น (synthesized) กับสมการของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ที่แท้จริง (expected) ซึ่งเป็นผลมาจากการเลือกใช้พารามิเตอร์ $K=1.3$ และ $m = 0.975$ โดยจะเห็นได้ว่า ค่า $error$ ตลอดช่วงปฏิบัติการของ x จาก -1 ถึง 1 มีค่าไม่เกิน 2.1% ดังแสดงในรูปที่ 6(ข)



รูปที่ 6 ผลการเขียนโปรแกรมเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ที่ต้องการกับฟังก์ชันที่ได้สังเคราะห์ขึ้น (ก) กราฟคุณลักษณะ (ข) ค่าผิดพลาด

เนื่องจากการสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ในการวิจัยนี้ เป็นการดำเนินการโดยอาศัยการประมาณจากส่วนกลับของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ซึ่งไม่ใช่การดำเนินการโดยตรง ดังนั้น เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของหลักการดังกล่าวอีกครั้งหนึ่ง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงานของวงจรในรูปที่ 2 โดยกำหนดให้ค่า $K = 1.3$ ทดลองแปรค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต V_{in} และวัดค่าผลรวมฮาร์โมนิค (THD) เพื่อพิจารณาค่าแอมพลิจูดที่ทำให้ค่า THD มีค่าต่ำที่สุด โดยกำหนดให้ $V_{inmax} = m(2V_T + I_{B1}R_i)\pi/2$ คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณแรงดันอินพุต V_{in} ซึ่งจะได้ว่า $m = 2V_{inmax}/\pi(2V_T + I_{B1}R_i)$ พิจารณาค่า THD ที่ได้เปรียบเทียบกับค่า $error_{max}$ ซึ่งใช้วิธีการหาตั้งที่ได้อธิบายก่อนหน้านี โดยจะได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นว่าค่า m ที่ทำให้ได้ค่า $error_{max}$ มีค่าต่ำสุดจะอยู่ที่ประมาณ 0.975 (วัดค่า THD ≈ 0.4%) แต่เมื่อพิจารณาจากจุดที่ค่า THD มีค่าต่ำสุดจะได้ค่า m ประมาณ 0.965 โดยมีค่า THD ≈ 0.29% ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ และส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากหลักการการประมาณจากส่วนกลับของฟังก์ชัน ดังนั้นในการทดสอบและการใช้งานวงจรที่ได้ทำการพัฒนาออกแบบขึ้น เพื่อให้ได้ผลการทำงานในทางปฏิบัติที่ดีที่สุดต่อไป ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่า $K = 1.3$ และ ค่า $m = 0.965$

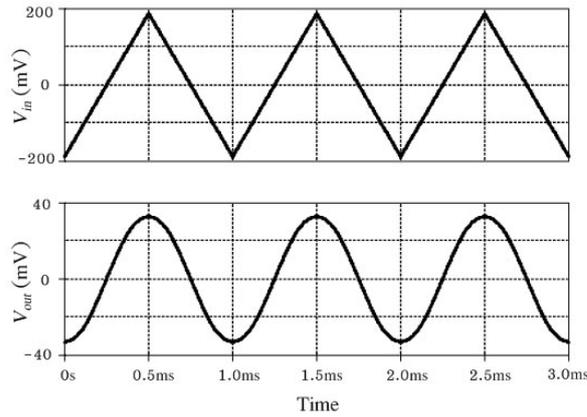


รูปที่ 7 การวิเคราะห์หาค่า m ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า THD เปรียบเทียบกับการพิจารณาจากค่า $error_{max}$ (เมื่อ $K = 1.3$)

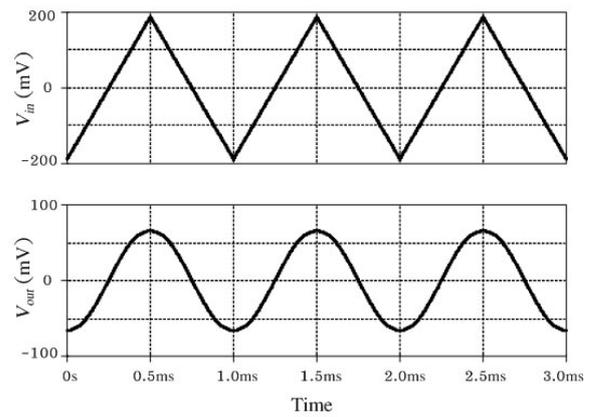
ในการทดสอบและยืนยันคุณสมบัติการทำงานของวงจรที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้น ในขั้นต้นได้ใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงานของวงจร โดยใช้โพลาร์ทรานซิสเตอร์เบอร์ Q2N3904 และ Q2N3906 ต่อร่วมกัน ประกอบเป็นวงจรขยายความนำตามโครงสร้างของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และเมื่อนำมาต่อเป็นวงจรแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ตามวงจรในรูปที่ 2 กำหนดแรงดันไฟเลี้ยงวงจรเท่ากับ ± 10 V ความต้านทาน $R_i = R_L = 1k\Omega$ ค่ากระแสไบอัส $I_{B1} = 67.6 \mu A$ ป้อนอินพุต V_{in} เป็นสัญญาณแรงดันรูปสามเหลี่ยมแอมพลิจูด $V_{inmax} = m(2V_T + I_{B1}R_i)\pi/2 = 181mV$ ความถี่ 1 kHz และทำการแปรค่ากระแสไบอัส I_{B2} เพื่อทดสอบผลการแปลงรูปสัญญาณและอัตราขยายของวงจร ต่อจากนั้นทำการทดสอบด้วยอินพุตที่เป็นสัญญาณแรงดันไฟตรงขนาด 181 mV ทำการแปรค่ากระแสไบอัส I_{B2} จาก 1 μA ถึง 10 mA เพื่อทดสอบอัตราขยายของวงจร ในลำดับต่อมาทำการทดสอบวัดค่า THD เพื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ของสัญญาณอินพุต โดยทำการแปรค่าความถี่จาก 10 Hz ถึง 1 MHz กำหนด V_{inmax} คงที่เท่ากับ 181 mV หลังจากได้ทดสอบด้วยวิธีการเลียนแบบการทำงานของวงจร ผู้วิจัยได้ทำการต่อวงจรบนบอร์ดทดลองเพื่อทดสอบการทำงานจริง โดยทดลองใช้วงจรขยายความนำที่เป็นไอซีสำเร็จรูปสามรุ่น ได้แก่ เบอร์ CA3080, CA3280 และ LM13600 เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการที่ได้นำเสนอสามารถใช้ได้กับวงจรขยายความนำแบบโพลาร์ทรานซิสเตอร์โดยทั่วไปได้จริง กำหนดค่าความต้านทาน $R_i = R_L = 1k\Omega$ กระแสไบอัส $I_{B1} = 67.6 \mu A$ อินพุตของวงจรเป็นสัญญาณแรงดันรูปสามเหลี่ยม ความถี่ 1 kHz ขนาดมีค่าประมาณ เท่ากับ 181 mV และ I_{B2} ปรับค่าสำหรับปรับอัตราขยายของวงจร

ผลการศึกษา และอภิปรายผล

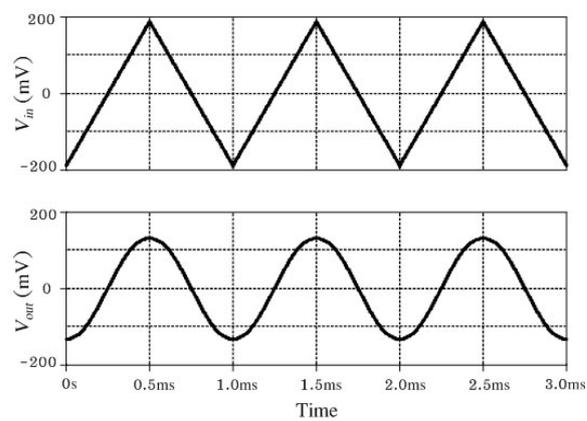
รูปที่ 8 แสดงผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยรูปที่ 8(ก) ถึง 8(ค) แสดงผลการทดสอบด้วยอินพุตที่เป็นสัญญาณแรงดันรูปสามเหลี่ยมจากการใช้ค่ากระแส I_{B2} ที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 33.8 μA , 67.6 μA และ 135.2 μA ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ขนาดของสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่ได้มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่ากระแส I_{B2} ที่ใช้ ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่า การปรับอัตราขยายของวงจรสามารถทำได้ โดยการปรับค่ากระแส I_{B2} รูปที่ 8(ง) แสดงองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต V_{out} เมื่อกำหนดให้ $I_{B2} = I_{B1} = 67.6 \mu A$ โดยจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบหลักของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าความถี่ที่ 1 kHz โดยมีค่า THD ประมาณเท่ากับ 0.29% รูปที่ 8(จ) แสดงผลการทดสอบด้วยอินพุตที่เป็นสัญญาณแรงดันไฟตรง แล้วทำการปรับอัตราขยายของวงจรด้วยการแปรค่ากระแสไบอัส I_{B2} จาก 1 μA ถึง 10 mA ซึ่งผลการวัด (measured) ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณ (expected) แต่จะมีขนาดจำกัดอยู่ที่ระดับต่ำกว่าแรงดันไฟเลี้ยงวงจร (10 V) อยู่เล็กน้อย รูปที่ 8(ฉ) แสดงผลการวัดค่า THD จากการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ของสัญญาณอินพุต จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ต่ำกว่า 10 kHz ค่า THD ที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่า 0.3% และที่ความถี่สูงขึ้น ค่า THD ที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 100 kHz และ 1 MHz วัดค่า THD ได้ประมาณเท่ากับ 1.13% และ 8.27% ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นอุดมคติของตัววงจรขยายความนำเอง รูปที่ 9, 10 และ 11 แสดงผลการทดลองด้วยวิธีการต่อวงจรจริงโดยใช้ไอซีของวงจรขยายความนำเบอร์ CA3080, CA3280 และ LM13600 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า วงจรที่นำเสนอสามารถทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ได้จริง แม้ว่าในส่วนของการทดลองจริงขนาดของค่าแรงดันอินพุต V_{in} และแรงดันเอาต์พุต V_{out} จะแตกต่างไปจากในส่วนของการเลียนแบบการทำงานเล็กน้อยก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ที่ประกอบอยู่ภายในโอทีเอมีค่าไม่สูงตามอุดมคติ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า หลักการที่นำเสนอสามารถใช้โอทีเอทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ได้จริง นอกจากนี้ยังสามารถปรับอัตราการขยายของวงจรได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ นั่นคือ การปรับค่ากระแสไบอัส I_{B2} สำหรับค่าผลรวมฮาร์โมนิคจากการเลียนแบบ การทำงานของวงจรมีค่าเท่ากับ 0.29% และผลรวมฮาร์โมนิคจากการทดลองจริงโดยใช้ไอซีของวงจรขยายความนำทั้งสามเบอร์มีค่าเท่ากับ 0.5%, 0.55%, และ 0.87% ตามลำดับ



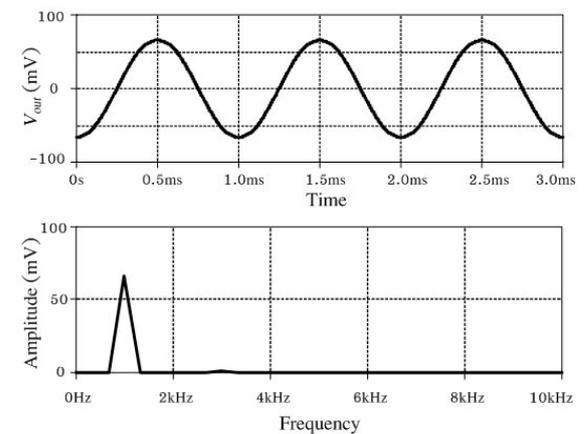
(ก)



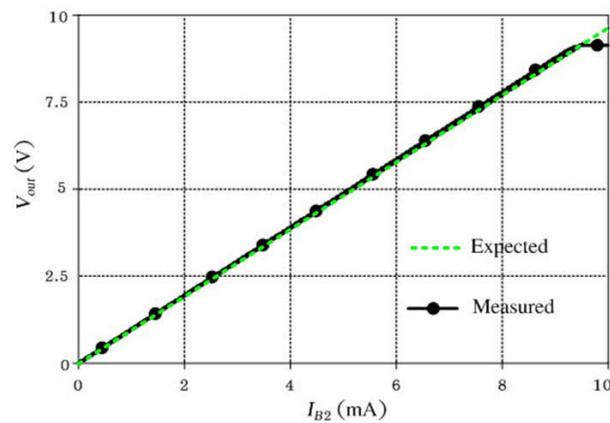
(ข)



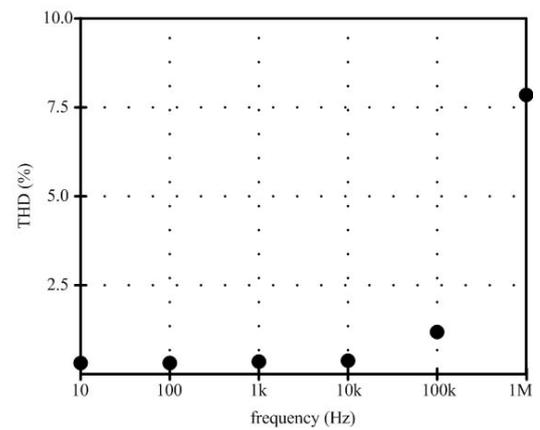
(ค)



(ง)



(จ)

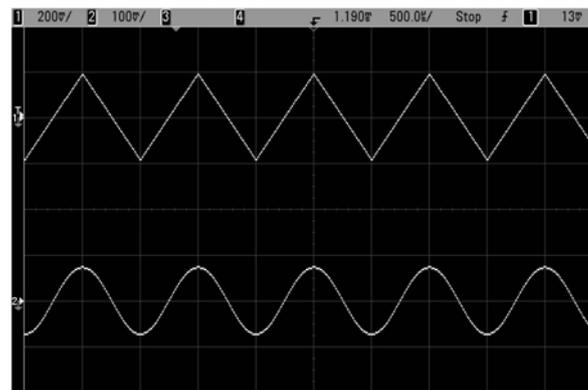


(ฉ)

รูปที่ 8 ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE (ก) กำหนด $I_{B2} = I_{B1}/2 = 33.8 \mu A$ (ข) กำหนด $I_{B2} = I_{B1} = 67.6 \mu A$ (ค) กำหนด $I_{B2} = 2I_{B1} = 135.2 \mu A$ (ง) องค์ประกอบทางความถี่ (จ) ผลการแปรค่า I_{B2} (ฉ) ผลการแปรค่าความถี่



รูปที่ 9 ผลการทดลองโดยใช้ไอซีวงจรรขยายความนำเบอร์ CA3080
 เส้นบน : สัญญาณแรงดันอินพุต V_{in} (สเกลแนวตั้ง : 100 mV/div.)
 เส้นล่าง : สัญญาณแรงดันเอาท์พุต V_{out} (สเกลแนวตั้ง : 50 mV/div.)
 (สเกลแนวนอน : 500 μ s/div.)



รูปที่ 10 ผลการทดลองโดยใช้ไอซีวงจรรขยายความนำเบอร์ CA3280
 เส้นบน : สัญญาณแรงดันอินพุต V_{in} (สเกลแนวตั้ง : 200 mV/div.)
 เส้นล่าง : สัญญาณแรงดันเอาท์พุต V_{out} (สเกลแนวตั้ง : 50 mV/div.)
 (สเกลแนวนอน : 500 μ s/div.)



รูปที่ 11 ผลการทดลองโดยใช้ไอซีวงจรรขยายความนำเบอร์ LM13600
 เส้นบน : สัญญาณแรงดันอินพุต V_{in} (สเกลแนวตั้ง : 200 mV/div.)
 เส้นล่าง : สัญญาณแรงดันเอาท์พุต V_{out} (สเกลแนวตั้ง : 100 mV/div.)

สรุปผลการศึกษา

วงจรแปลงสัญญาณที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้นโดยใช้วงจรขยายความนำต่อร่วมกับตัวต้านทานมีโครงสร้างและวิธีการการต่อวงจรที่เรียบง่าย สามารถทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ได้จริง ซึ่งหลักการที่ได้นำเสนอนี้สามารถประยุกต์ใช้กับวงจรขยายความนำแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีการผลิตจำหน่ายในท้องตลาดโดยทั่วไป เหมาะสำหรับการนำไปเป็นส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบและประมวลผลสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย และต้นทุนต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และมหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นต้นสังกัดของผู้ทำวิจัย ที่ได้ให้การส่งเสริม สนับสนุนการทำวิจัยของบุคลากรอย่างจริงจัง

เอกสารอ้างอิง

- CA3280_datasheet (2002). Retrieved October 1, 2006, from <http://www.intersil.com/data/fn/fn1174.pdf>
- Fattaruso, J. W., & Meyer, R. G. (1985). Triangle-to-sine wave conversion with MOS technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 20, 623-631.
- Gilbert, B. (1977). Circuits for the precise synthesis of the sine function. *Electronics Letters*, 13, 506-508.
- Gilbert, B. (1982). A monolithic microsystem for analog synthesis of trigonometric functions and their inverses. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 17, 1179-1191.
- Heflin, E. H. (1973). Compact function generator with enhanced capability/cost ratio. *Hewlett-Packard Journal*, 15-20.
- Ishizuka, O., Tang, Z., & Matsumoto, H. (1991). MOS sine function generator using exponential-law technique. *Electronics Letters*, 27, 1937-1939.
- Meyer, R. G., Sansen, W. M. C. Lui, S., & Peeters, S. (1976). The differential pair as a triangle-sine wave converter. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 11, 418-420.
- Pessatti, M. P., & Dos Reis Filho, C. A. (2002, April). CMOS analog sine function generator using lateral-pnp bipolar transistors. Paper presented at the 4th Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, Aruba, Holland.