

วงจรรากที่สองอย่างง่ายโดยใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป

A simple square-rooting circuits using available commercial devices

ชัยวัฒน์ สากุล¹ และ อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ittipongc@sau.ac.th

Received: 04/01/04, Revised: 08/03/04, Accepted: 12/03/24

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ วงจรรากที่สองจำนวน 2 วงจรที่สร้างจาก ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส (AD844) ร่วมกับ ไอซีอินเวอร์เตอร์ (CD4007) หลักการทำงาน ของ วงจรอาศัยคุณสมบัติกำลังสองของ มอสทรานซิสเตอร์ที่อยู่ภายใน CD4007 วงจรรากที่สองแบบที่ 1 จะให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นลบ ขณะที่วงจรรากที่สองแบบที่ 2 จะให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวก ผลการจำลองการทำงานโดยใช้ LTSpice ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรรากที่สอง ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส มอสทรานซิสเตอร์

Abstract

This paper proposes two square-rooting circuits consisting of AD844 and CD4007. Principle of operation of the proposed circuits is based on the square-law characteristic of MOS transistor within CD4007. The first square root circuit gives the output signal negative. The second circuit works give the output signal positive. Simulation results based on LTSpice program agree well with theoretical anticipation.

Keywords: Square Rooting Circuit, Current Feedback Op Amp, MOS Transistor

1. บทนำ

วงจรรากที่สองสัญญาณแบบแอนะล็อกเป็นวงจรที่มีประโยชน์มาก เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในระบบการประมวลผลสัญญาณทางแอนะล็อก โทรคมนาคม และเครื่องมือวัด ในอดีตการสร้าง วงจรรากที่สอง ส่วนมากสร้างโดยการใช้วงจรคูณสัญญาณ ร่วมกับวงจรรอแอมป์ แต่ราคาสำหรับวงจรคูณสัญญาณ (AD633) มีราคาสูงประมาณ 800 บาทเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของ มอสทรานซิสเตอร์(CD4007) ซึ่งมีราคาประมาณ 20 บาท ทำให้การนำไปใช้งาน และศึกษาการทำงานของ วงจรรากที่สองสัญญาณจึงมีไม่มากนัก ในการออกแบบวงจรรากที่สองสัญญาณได้มีการออกแบบมาอย่างต่อเนื่อง[1-10] โดยบางงานวิจัยได้ออกแบบเพื่อใช้งานในรูปแบบของ วงจรรวม[1-4] ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะมาต่อใช้งานสำหรับลงแผ่นปริ้นท์ทั่วไป ขณะที่งานวิจัย [5-6] ได้ออกแบบ วงจรรากที่สองสัญญาณโดยใช้

ไอทีเอ ถึงแม้ว่าไอทีเอจะมีขายในท้องตลาด แต่เมื่อเทียบกับออปแอมป์แล้ว ออปแอมป์ หาซื้อง่ายและราคาถูกกว่า ต่อมาได้มีการออกแบบวงจรรากที่สอง โดยใช้ดึงเอากระแสจากไฟเลี้ยงที่จ่ายให้ออปแอมป์มาใช้ (the op-amp supply current sensing) ซึ่งกระแสนี้ได้รับอิทธิพลจากภาคเอาต์พุตของวงจรรายในออปแอมป์ซึ่งมีคุณสมบัติกำลังสอง [7] แต่มีข้อเสียคือใช้จำนวนอุปกรณ์ที่มาก จากนั้นได้มีการนำเสนอวงจรรากที่สองโดยใช้หลักการ double dual slope[8] ซึ่งข้อเสียคือใช้จำนวนอุปกรณ์ที่มากและมีค่าความผิดพลาดสูง หลังจากนั้นมีการนำเสนอวงจรรากที่สอง[9] ที่ใช้ออปแอมป์ร่วมกับมอสทรานซิสเตอร์แต่บทความดังกล่าวยังมีข้อเสียในเรื่องจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ยังมากอยู่ และเมื่อเร็ว ๆ นี้การนำเสนอวงจรรากที่สอง[10] ที่ใช้ออปแอมป์ร่วมกับมอสทรานซิสเตอร์วงจรมีข้อดีคือ ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อย มีโครงสร้างที่ง่าย แต่บทความดังกล่าวยังมีข้อเสียในเรื่องข้อจำกัดของออปแอมป์ที่ตอบสนองความถี่ที่ไม่สูงและอัตราสุ่มมีค่าต่ำ ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบ วงจรรากที่สองสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสต่อร่วมกับมอสทรานซิสเตอร์ วงจรที่นำเสนอนี้ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อย มีโครงสร้างที่ง่าย และตอบสนองความถี่และอัตราสุ่มที่สูง

2. ทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจร

บทความนี้ได้ออกแบบวงจรรากที่สองที่สร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับกระแส และมอสทรานซิสเตอร์ โดยมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็น มอสทรานซิสเตอร์ ที่อยู่ภายในของ ไอซีดีจิดอล CD4007 ประกอบด้วย มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลและพีแชนแนลอย่างละ 3 ตัว

2.1 มอสทรานซิสเตอร์

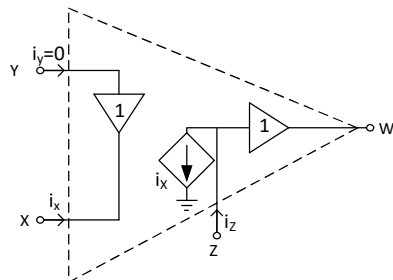
มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันดังนี้

$$I_D = K_n (V_{gs} - V_T)^2 \quad (1)$$

เมื่อ I_D คือกระแสแตรน V_{gs} คือแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์ส V_T คือแรงดันขีดเริ่ม และ $K_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$ คือ พารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์

2.2 ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส(Current Feedback Op Amp: CFOA) ประกอบด้วยวงจรตามแรงดัน 2 วงจรและวงจรตามกระแส 1 วงจรตามรูปที่ 1



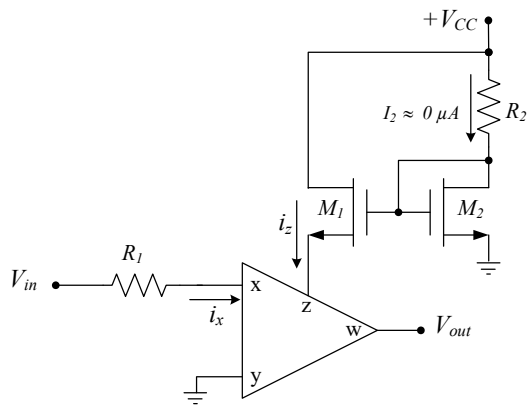
รูปที่ 1 แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

จากรูปที่ 1 ขา y เป็นอินพุตที่มีอิมพีแดนซ์สูง ทำหน้าที่เป็นอินพุตของวงจรตามแรงดันที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันที่ ขา x ขณะที่ ขา x ยังเป็นอินพุตกระแสด้วยที่หน้าที่เป็นวงจรตามกระแสที่ให้เอาต์พุตเป็นกระแสที่ ขา z และ ที่ขา z นี้ยังทำหน้าที่เป็นอินพุตของวงจรตามแรงดันที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันที่ ขา w ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ขาต่างๆเป็นดังนี้

$$i_y = 0, i_x = i_z, v_x = v_y, v_w = v_z \quad (2)$$

2.3 วงจรรากที่สองแบบที่ 1

วงจรรากที่สองแบบที่ 1 จะใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลคู่ร่วมกับออปแอมป์ป้อนกลับกระแสแสดงในรูปที่ 2 ในการทำงาน CFOA, R_1 และ M_1 ทำหน้าที่สร้างฟังก์ชันรากที่สองขณะที่ M_2 และ R_2 ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน เพื่อสร้างแรงดันคงที่ V_T



รูปที่ 2 วงจรรากที่สองแบบที่ 1

ในรูปที่ 2 เมื่อกระแสที่ไหลเข้าโนด x มีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลเข้าโนด z ตามสมการ(2) สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตกับกระแสทรานซิสเตอร์ M_1 ดังนี้

$$\frac{V_{in}}{R_1} = K_n (V_{gs1} - V_T)^2 \quad (3)$$

$$V_{gs1} = V_T + \sqrt{\frac{V_{in}}{K_n R_1}} \quad (4)$$

และเมื่อแรงดัน โนด z เท่ากับแรงดัน โนด w สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดัน M_1 และ M_2 คือ

$$V_{gs1} + V_{out} = V_{gs2} \quad (5)$$

และแรงดัน V_{gs2} ในรูปของกระแสที่ไหลผ่าน R_2 คือ

$$V_{gs2} = V_T + \sqrt{\frac{I_2}{K_n}} \quad (6)$$

แทนสมการ(4)และ(6)ใน(5)จะได้

$$V_{out} = -\sqrt{\frac{V_{in}}{K_n R_1}} + \sqrt{\frac{I_2}{K_n}} \quad (7)$$

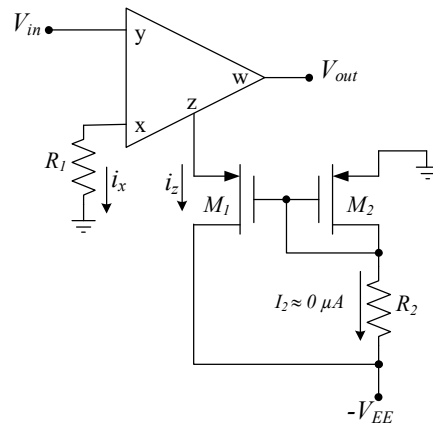
เมื่อ $I_2 = \frac{V_{CC} - V_{gs2}}{R_2}$ ถ้าออกแบบให้ R_2 มีค่าสูงจนทำให้ I_2 มีค่าน้อยมากจนประมาณเท่ากับศูนย์แอมแปร์ทำให้ แรงดันเอาต์พุตกลายเป็น

$$V_{out} = -\sqrt{\frac{V_{in}}{K_n R_1}} \quad (8)$$

จากสมการ (8) จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับค่าลบของรากที่สองของแรงดันอินพุต เงื่อนไขการทำงาน สมการที่ (8) จะเป็นจริงได้เมื่ออินพุต มีค่าเป็นบวกเท่านั้น

2.4 วงจรรากที่สองแบบที่ 2

วงจรรากที่สองแบบที่ 2 จะใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนลคู่ร่วมกับออปแอมป์ป้อนกลับกระแสแสดงในรูปที่ 3 วงจรแบบที่ 2 นี้ใช้จำนวนอุปกรณ์เท่ากับวงจรรากที่สองแบบที่ 1 และโครงสร้างวงจรยังคงคล้ายกันมากคือเปลี่ยนจาก ทรานซิสเตอร์แบบเอ็นแชนแนลเป็นแบบพีแชนแนล



รูปที่ 3 วงจรรากที่สองแบบที่ 2

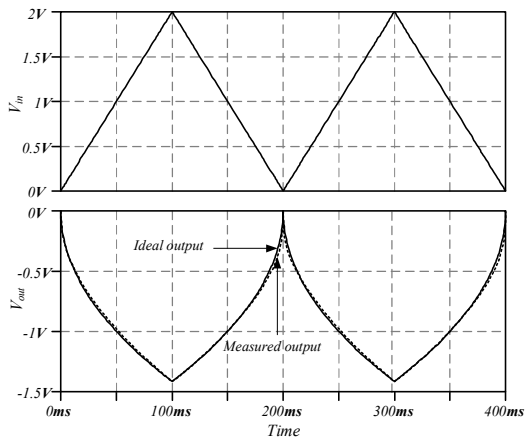
วงจรรากที่สองแบบที่ 2 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและเอาต์พุตได้ดังนี้

$$V_{out} = \sqrt{\frac{V_{in}}{K_p R_1}} \quad (9)$$

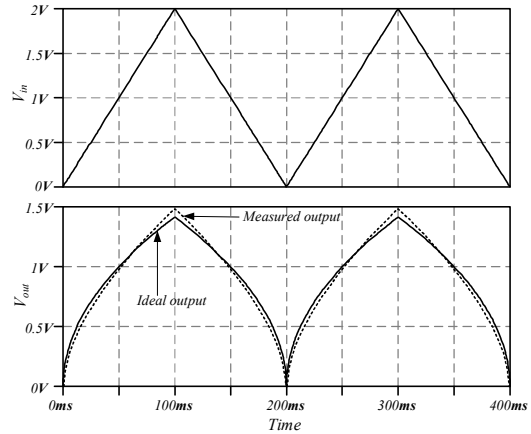
เงื่อนไขการทำงาน สมการ (9) จะเป็นจริงได้เมื่อ อินพุต ต้องมีค่าเป็นบวก เท่านั้น จากสมการ(8)-(9) จะเห็นว่าอัตราขยายของวงจรรากที่สองทั้ง 2 วงจรสามารถปรับได้ด้วยตัวต้านทาน R_1 ถ้าต้องการให้วงจรมีอัตราขยายสูงต้องใช้ค่า R_1 ที่ต่ำแต่ R_1 เป็นค่าความต้านทานอินพุตของวงจรรากที่สองด้วยถ้า R_1 มีค่าต่ำจะส่งผลให้วงจรรากที่สองบริ โภคกระแสสูง ในกรณีที่วงจรที่มีต่อทางด้านอินพุตจ่ายกระแสไม่พอสามารถแก้ไขโดยการเพิ่มวงจรกันชนที่ด้านอินพุตของวงจรรากที่สอง

3. ผลการทดลอง

เพื่อทดสอบผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี วงจรรากที่สองทั้งสองแบบ ได้ถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม LTspice โดยวงจรรากที่สองทั้ง 2 วงจรนี้ใช้ไฟเลี้ยง $V_{CC} = -V_{EE} = 7\text{ V}$ สำหรับ ออปแอมป์ป้องกันกระแส ใช้แบบจำลอง ของ AD8444 และ มอสมทรานซิสเตอร์ใช้แบบจำลองของ CD4007 [11] สำหรับวงจรรากที่สองแบบที่ 1 ออกแบบให้ค่า $R_1 = 1/K_N = 1.45\text{ k}\Omega$ และ $R_2 = 500\text{ k}\Omega$ ทำให้สมการ(8) เขียนได้ใหม่เป็น $V_{out} = -\sqrt{V_{in}}$ สำหรับวงจรรากที่สองแบบที่ 2 ออกแบบให้ค่า $R_1 = 1/K_P = 0.75\text{ k}\Omega$ และ $R_2 = 1000\text{ k}\Omega$ ทำให้สมการ(9) เขียนได้ใหม่เป็น $V_{out} = \sqrt{V_{in}}$ วงจรรากที่สองแบบที่ 1 ในรูปที่ 2 เมื่อป้อนอินพุตเป็น สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาด 2 V จะได้ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 4 ขณะที่วงจรรากที่สองแบบที่ 2 ในรูปที่ 3 จะได้ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 5 โดยผลลัพธ์ที่ได้ (measured output) ถูกเปรียบเทียบกับค่าในทางทฤษฎี (Ideal output)

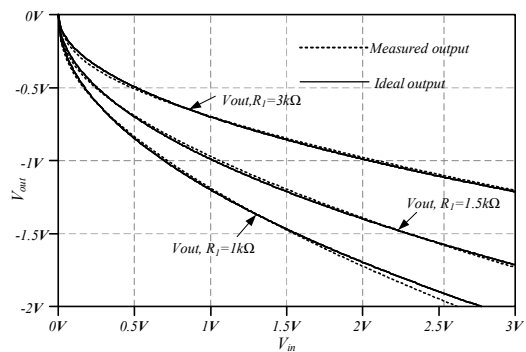


รูปที่ 4 อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรากที่สองแบบที่ 1

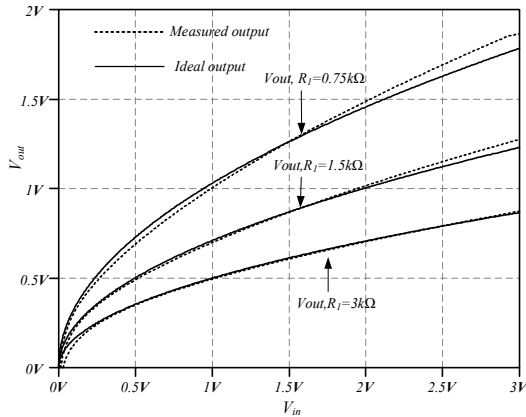


รูปที่ 5 อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรากที่สองแบบที่ 2

ในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V แรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับ -1 V และขณะที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 2 V แรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับ -1.4 V ซึ่งสอดคล้องกับค่าในทางทฤษฎี ตามสมการ $V_{out} = -\sqrt{V_{in}}$ และในรูปที่ 5 พบว่าเมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V แรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับ 1 V และขณะที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 2 V แรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับ 1.5 V ซึ่งใกล้เคียงกับค่าในทางทฤษฎีตามสมการ $V_{out} = \sqrt{V_{in}}$ จะเห็นได้ว่าวงจรรากที่สองแบบที่ 1 ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากกว่าวงจรรากที่สองแบบที่ 2 เมื่อนำวงจรรากที่สองที่นำเสนอขึ้นมา ทดสอบคุณสมบัติทางด้านความถี่ตอบสนองพบว่า ทั้ง 2 วงจร มีค่าความถี่คutoff ประมาณ 55MHz เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวงจรในลักษณะเดียวกันในบทความ[10] ที่มีค่าความถี่คutoff ประมาณ 1MHz จะเห็นได้ว่าวงจรรากที่สองที่นำเสนอขึ้นนี้ให้ผลการตอบสนองความถี่ที่สูงกว่า และเมื่อนำวงจรรากที่สองทั้ง 2 แบบมาทดสอบการปรับค่าอัตราขยายโดยการปรับค่าความต้านทาน R_1 แสดงในรูป 6 และ 7



รูปที่ 6 เอาต์พุตของวงจรรากที่สองแบบที่ 1 เมื่อเปลี่ยนค่า R_1



รูปที่ 7 เอาต์พุตของวงจรแบบที่ 2 เมื่อเปลี่ยนค่า R_1

จาก ผลลัพธ์ ในรูปที่ 6 และ 7 ยืนยันว่าค่าอัตราขยายของวงจรที่ สองทั้ง 2 แบบสามารถปรับค่าด้วยความต้านทาน R_1 ซึ่งจะสอดคล้องกับ สมการ(8)และ(9) เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอ (measured output)กับ ค่าแรงดันเอาต์พุตในทางทฤษฎี(Ideal output) พบว่าวงจรทั้งสองแบบที่ 1 ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี มากกว่าวงจรแบบที่ 2

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอ วงจรรากที่สองสัญญาณจำนวน 2 วงจรโดย วงจรรากที่สองทั้ง 2 นี้ จะให้แรงดันเอาต์พุตที่มีทิศทางตรงข้ามกัน และ อัตราขยายของวงจรทั้งสองทั้ง 2 วงจรสามารถปรับค่าได้ด้วยตัว ต้านทาน R_1 เมื่อนำวงจรทั้งสองมาทดสอบด้วย LTspice พบว่าผลลัพธ์ ที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี โดยวงจรที่สองแบบที่ 1 ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากกว่าวงจรแบบที่ 2

เอกสารอ้างอิง

[1] I. M. Filanovsky, and H. P. Baltas, “ Simple CMOS analog square-rooting and squaring circuits,” IEEE Trans. Circuits Syst., vol.39, pp.312-315, 1992.

[2] S. I. Liu, “Square-rooting and vector summation circuits using current conveyors,” IEE Proceedings G-Circuits, Devices and Systems, vol.142, pp. 223-226,1995.

[3] I. Chaisayun and K. Dejhan, “ Analog nonlinear circuits based on the voltage level shift buffer,” Proc. of ECTI, Bangkok, Thailand, May, 9-11, 2007.

[4] I. Chaisayun, “ squaring circuit, square-rooting circuit and vector summation circuit using the flipped voltage follower,” วิศวกรรมเอเชียอาคเนย์, ปีที่ 5(1), มิถุนายน-พฤศจิกายน 2552.

[5] V. Riewruja, “A simple square rooting circuit using OTA,” Electronic Letters, Vol. 44, Issue 17, pp:1000-1002,2008.

[6] วิภาวัลย์ นาคทรัพย์ วิวัฒน์ กิรานนท์ วิชา แสงพิลิตธิ์ และ สิทธิพร เพชรกิจ, “ วงจรรากที่สองและวงจรกกำลังสองโดยใช้ โอทีเอ,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม,ปีที่ 9(2), 15 กรกฎาคม – ธันวาคม 2550.

[7] V. Riewruja and T. Kamsri, “ Square-rooting and absolute function circuits using operational amplifiers,” IET circuits, Devices & systems, Vol. 3, pp:55-63,2009.

[8] K.C. Selvam, “ Double dual slope square rooter,” IET The journal of Engineering,pp32-32, 2014.

[9] I. chaisayun, “A simple and low cost square-rooting circuit employing commercial devices”, The 5th International Electrical Engineering Congress (IEECON2017) ,pp.759-762, Thailand, March 8-10, 2017.

[10]อิทธิพงษ์ ชัยสาขันธ์, “วงจรรากที่สองอย่างง่ายโดยใช้โอปแอมป์ 1 ตัว” หน้า101-105, การประชุมวิชาการสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, 24-25, มิถุนายน 2565.

[11] SPICE Models for the 4007 CMOS chip, URL: https://people.rit.edu/lffeee/CD4007_SPICE_MODEL.pdf