

บทที่ 10

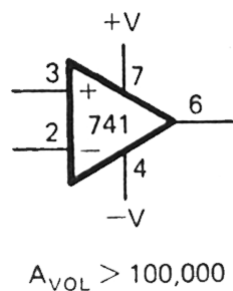
การเชื่อมต่ออุปกรณ์อนาล็อก (Analog Interfacing)

ในการที่จะใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุมเครื่องจักรกล เครื่องมือทดสอบ หรือยานยนต์ มีความจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆ เช่นกำลังดัน อุณหภูมิ หรืออัตราการไหล ขั้นตอนในการทำให้ค่าตัวแปรเหล่านี้สามารถถูกส่งเข้าไปยังไมโครโพรเซสเซอร์ได้ประกอบด้วย การแปลงค่าเหล่านี้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นจึงแปลงให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัลที่สามารถส่งเข้าไปให้ไมโครคอมพิวเตอร์ประมวลผลได้ ขั้นตอนในการแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ (Sensor) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์มักจะมีค่าไม่มากนักจึงจำเป็นต้องนำมาผ่านวงจรขยายสัญญาณ เช่นวงจร OP-AMP (Operational Amplifier) และสุดท้ายการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล จะเกี่ยวข้องกับ A/D Converter (Analog-to-Digital Converter) นอกจากนี้ในการส่งสัญญาณควบคุมกลับไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ยังจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับ D/A Converter (Digital-to-Analog Converter) ในบทนี้เราจะอธิบายในรายละเอียดของสิ่งต่างๆ เหล่านี้

10.1 วงจร OP-AMP (Operational Amplifier) และการประยุกต์ใช้

10.1.1 คุณลักษณะพื้นฐานของ OP-AMP

รูปที่ 10 – 1 เป็นสัญลักษณ์พื้นฐานของ OP-AMP ขาที่มีตัวอักษร + V และ - V เป็น Power Supply ให้กับ OP-AMP ซึ่งโดยทั่วไปมักจะใช้ความต่างศักย์ 12 – 15 V ส่วนใหญ่ OP-AMP จะมี 2 อินพุตคือ ขาที่มีเครื่องหมาย + เป็น Non-inverting Input และขาที่มีเครื่องหมาย - เป็น Inverting Input อัตราส่วนระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าขาออก (V_{OUT}) ต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าขาเข้า (V_{IN}) เรียกว่า “กำลังขยาย (Voltage Gain)” ใช้สัญลักษณ์ A_V โดยทั่วไป OP-AMP มักจะมีกำลังขยายประมาณ 100,000 หรือมากกว่า

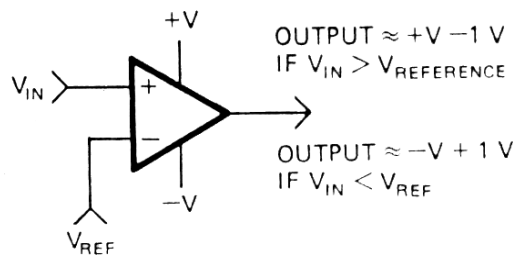


รูปที่ 10 – 1 Common OP-AMP

10.1.2 วงจร Comparator

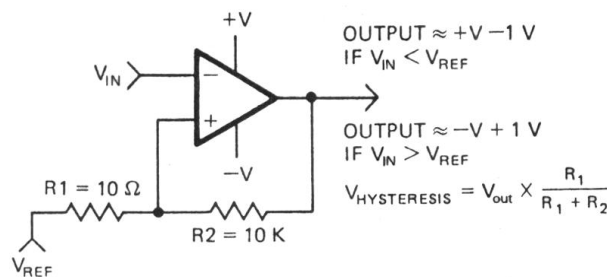
สมมติว่า OP-AMP มีกำลังขยาย $A_V = 100,000$ และจ่ายไฟเลี้ยง +15V และ -15V ให้กับ OP-AMP เมื่อมีสัญญาณ +0.1 Vdc เข้ามาที่ขาอินพุตนอนอินเวิร์ทติง OP-AMP จะพยายามขยายสัญญาณนั้น 100,000 เท่า ซึ่งควรจะมีเอาต์พุตเป็นสัญญาณ +100V อย่างไรก็ตามเอาต์พุตสูงสุดที่ OP-AMP จะสามารถส่งออกไปได้จะมีค่าน้อยกว่าไฟเลี้ยงที่จ่ายให้ 1 – 2 V เช่นมีเอาต์พุตประมาณ +13V และในทำนองเดียวกัน

หากจ่ายสัญญาณ $-0.1V$ เข้ามาที่ขาอินพุตนอนอินเวิร์ทติ่ง **OP-AMP** จะพยายามขยายสัญญาณเป็น $-100V$ แต่ก็สามารถทำได้เพียง $-13V$ วงจรในลักษณะนี้จะมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบสัญญาณที่เข้ามาทางขาอินพุตนอนอินเวิร์ทติ่งกับระดับสัญญาณอ้างอิง (V_{REF}) ซึ่งโดยมากมักจะใช้กราวด์ ($0V$) เป็นระดับการเปรียบเทียบ และให้เอาต์พุตเป็น **High** หรือ **Low** โดยจะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบ เช่นถ้าอินพุตมีค่าสูงกว่าระดับสัญญาณอ้างอิงเพียงเล็กน้อย จะได้เอาต์พุตเป็น **High** ($+13V$) แต่ถ้าอินพุตต่ำกว่าระดับสัญญาณอ้างอิง จะได้เอาต์พุตเป็น **Low** ($-13V$) ดังนั้นวงจร **OP-AMP** ซึ่งมีการทำงานในลักษณะนี้จะเรียกว่า “วงจร **Comparator**” รูปที่ 10 – 2 แสดงสัญลักษณ์ของวงจร **Comparator** ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า V_{REF} ไม่จำเป็นจะต้องเป็นกราวด์เสมอไป



รูปที่ 10 – 2 Comparator

รูปที่ 10 – 3 เป็นวงจร **Comparator** อีกชนิดหนึ่งซึ่งนิยมใช้ ให้สังเกตว่าในวงจรนี้สัญญาณอ้างอิงจะถูกจ่ายเข้าไปให้กับ **OP-AMP** ทางขาอินพุตนอนอินเวิร์ทติ่ง ส่วนสัญญาณขาเข้าจะถูกส่งเข้ามาทางขาอินพุตอินเวิร์ทติ่ง การทำเช่นนี้ก็เพื่อต้องการเปลี่ยนสถานะของเอาต์พุตให้มีสถานะตรงกันข้ามกับวงจร **Comparator** ในรูปที่ 10 – 2 นอกจากนี้ในวงจรนี้ยังมีการส่งสัญญาณย้อนกลับจากเอาต์พุตไปยังอินพุตนอนอินเวิร์ทติ่งผ่านตัวต้านทานเพื่อให่วงจร **Comparator** มีคุณลักษณะเฉพาะที่เรียกว่า “**Hysteresis**” ซึ่งหมายความว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าขาออกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามแรงเคลื่อนไฟฟ้าขาเข้า โดยจะเปลี่ยนแปลงไปทางบวกมากกว่าทางลบ

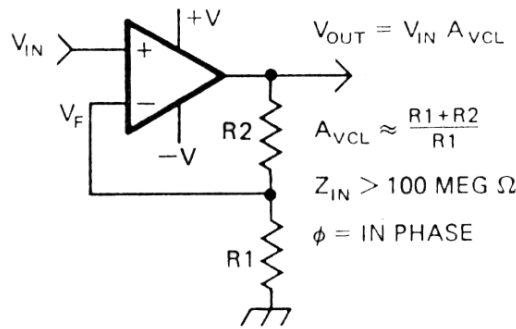


รูปที่ 10 – 3 Comparator with Hysteresis

จากรูปสมมติว่า $V_{REF} = 0V$ และ $V_{OUT} = 13V$ เราจะสามารถคำนวณได้ว่าสัญญาณอินพุตที่เข้ามาทางขาอินพุตอินเวิร์ทติ่งจะมีค่าประมาณ $13mV$ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อินเวิร์ทติ่งอินพุตของ **OP-AMP** จะต้องมีค่าเป็นบวกมากกว่านี้จึงสามารถทำให้เอาต์พุตของวงจร **Comparator** เปลี่ยนสถานะได้ ในทำนองเดียวกัน ถ้า $V_{OUT} = -13V$ สัญญาณอินพุตที่เข้ามาทางขาอินพุตอินเวิร์ทติ่งจะมีค่าประมาณ $-13mV$ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อินเวิร์ทติ่งอินพุตของ **OP-AMP** จะต้องมีค่าเป็นลบมากกว่านี้จึงสามารถทำให้เอาต์พุตของวงจร **Comparator** เปลี่ยนสถานะได้ และ **Hysteresis** ของวงจร **Comparator** นี้มีค่าเท่ากับ $26mV$

10.1.3 Non inverting Amplifier

การใช้ OP-AMP แบบวงจรมีการเปิด (Open-loop) ซึ่งไม่มีการส่งสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) จากเอาต์พุตเข้ามาที่อินพุต จะทำให้ OP-AMP มีกำลังขยายสูงมาก แต่ไม่สามารถคาดคะเนได้ว่าในความเป็นจริงจะมีกำลังขยายเท่าใด เนื่องจากไม่สามารถยอมรับได้สำหรับการใช้งานในวงจร Comparator แต่ไม่สามารถยอมรับได้สำหรับการใช้ OP-AMP ในวงจรขยายสัญญาณหรือแอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) รูปที่ 10 – 4 แสดงวิธีการในการส่งสัญญาณป้อนกลับเข้ามายัง OP-AMP เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ และทราบกำลังขยายที่แน่นอน



รูปที่ 10 – 4 Non-inverting Amplifier

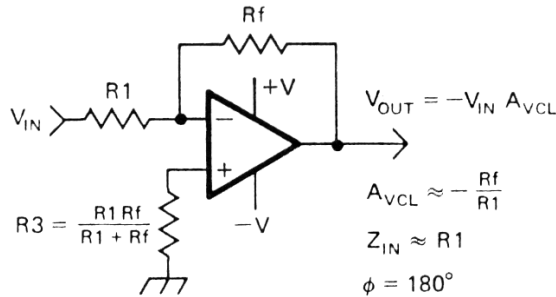
วงจรมีการทำงานดังนี้ สมมติว่าในขณะเริ่มต้น $V_{IN} = 0V$, $V_{OUT} = 0V$ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อินพุตตั้งอินพุตคือ 0 เมื่อมีสัญญาณ $+0.1V_{dc}$ เข้ามาที่อินพุต OP-AMP จะพยายามขยายสัญญาณนี้อีก $100,000$ เท่า แต่ในขณะที่เอาต์พุตมีค่าเป็นบวกเพิ่มมากขึ้น สัญญาณเอาต์พุตบางส่วนจะถูกส่งผ่านตัวต้านทานป้อนกลับเข้ามายังอินพุตตั้งอินพุต จึงทำให้ความแตกต่างระหว่างอินพุตทั้งคู่ลดลง เมื่อถึงจุดสมดุล ($V_F = V_{IN}$) จะสามารถคำนวณ V_{OUT} ได้โดยใช้วิธี Voltage-divider คือ $V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{R1 + R2}{R1} \right)$ สำหรับกำลังขยายของวงจรที่มีการป้อนกลับนี้เรียกว่า “Closed-loop gain” สำหรับวงจรในตัวอย่างนี้จะมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของค่าความต้านทาน $\left(\frac{R1 + R2}{R1} \right)$

วงจรมีเสถียรภาพแบบ Non-inverting Amplifier ส่วนใหญ่ มักจะถูกใช้เป็นบัฟเฟอร์ ทั้งนี้เนื่องจากมีอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{IN}) สูง ซึ่งจะทำให้ไม่ก่อให้เกิดภาระต่อเซ็นเซอร์หรืออุปกรณ์อื่นที่ต่ออยู่กับขาอินพุต ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอินพุตของ OP-AMP วงจรในรูปที่ 10 – 4 จะมีอินพุตอิมพีแดนซ์มากกว่า $100 M\Omega$ และถ้าใช้ FET เช่น National LF356 เป็นอินพุตของ OP-AMP อินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าสูงถึง $10^{12} \Omega$

10.1.4 Inverting Amplifier

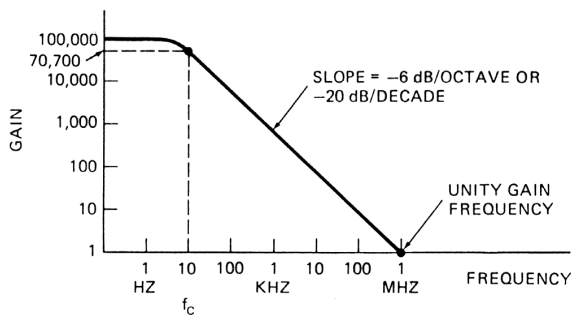
วงจรในรูปที่ 10 – 5 จะใช้ Negative Feedback ในการปรับสถานะสมดุลของ OP-AMP ในวงจรมีการขยายสัญญาณ ให้สังเกตว่าในวงจรมีอินพุตตั้งอินพุตจะถูกต่ออยู่กับกราวด์ ส่วนสัญญาณที่ต้องการขยายจะถูกส่งเข้ามาทางอินพุตตั้งอินพุต ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้จะมีเฟสแตกต่างจากสัญญาณอินพุต 180° สำหรับวงจรมีความต้านทาน R_f จะถูกใช้ในการส่ง Negative Feedback กลับไปปรับสมดุล เพื่อให้อินพุตทั้งคู่ของ OP-AMP มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากอินพุตตั้งอินพุตจะถูกต่ออยู่กับกราวด์ ดังนั้นอินพุตตั้งอินพุต

จะต้องถูกลดหรือเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียง **0V** โหนดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า “Virtual Ground” กำลังขยายของวงจรรขยายสัญญาณนี้สามารถหาได้จากอัตราส่วนของความต้านทานเช่นเดียวกัน คือ $A_{VCL} = -\frac{R_f}{R_1}$ ที่ความถี่ต่ำ ส่วนอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรนี้จะมีค่าโดยประมาณใกล้เคียงกับ R_1 ทั้งนี้เนื่องจาก OP-AMP จะพยายามรักษาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขาอินพุตไว้ที่ **0V**

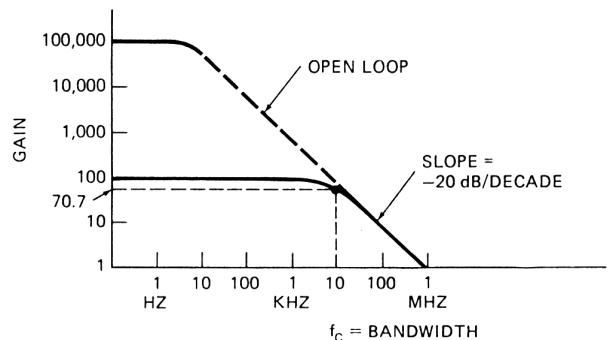


รูปที่ 10 – 5 Inverting Amplifier

คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของวงจรรขยายสัญญาณแบบ Inverting Amplifier คือ gain-bandwidth product จากที่กล่าวข้างต้น OP-AMP อาจจะมีกำลังขยายในขณะ Open-loop ได้สูงถึง 100,000 หรือมากกว่า ที่ความถี่สูงกำลังขยายของ OP-AMP จะลดลง และที่ความถี่ต่ำหนึ่งกำลังขยายของ OP-AMP จะมีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 6 (a) ความถี่นี้เรียกว่า “Unity Gain Frequency” และมักจะมีค่าเท่ากับ 1 MHz. ค่าความถี่นี้หาได้จากผลคูณระหว่างแบนด์วิธของวงจรมอพลิฟายด์ที่มี Negative Feedback กับ close loop gain ของ OP-AMP ที่ความถี่ต่ำ เช่นถ้าใช้ OP-AMP ที่มีค่า gain-bandwidth product 1 MHz. ในการสร้างวงจรรขยายสัญญาณที่มีกำลังขยาย 100 แบนด์วิธ (f_c) ของวงจรมอพลิฟายด์จะมีค่าประมาณ 1 MHz/100 หรือ 10 kHz ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 6 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 10 – 6 (a) Open-loop Gain (b) Closed-loop Gain

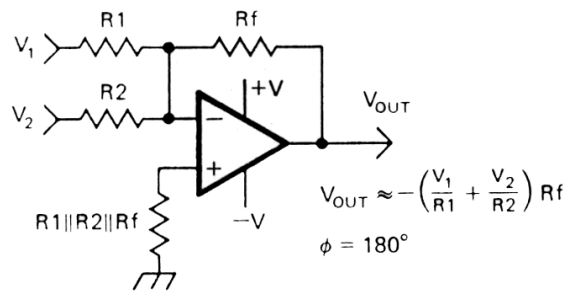
10.1.5 วงจร Adder

รูปที่ 10 – 7 เป็นวงจรแสดงการใช้ OP-AMP ในการรวมสัญญาณอินพุตทั้งสอง หรือมากกว่า เข้าด้วยกัน วงจรนี้จะมีลักษณะการต่อคล้ายกับ Inverting Amplifier ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้า V_1 จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 และความต่างศักย์ไฟฟ้า V_2 จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน R_2

ซึ่งกระแสไฟฟ้าทั้งสองนี้จะถูกรวมเข้าด้วยกันที่ **Virtual Ground** ในวงจรนี้จึงมักเรียกว่า “**Summing Point**” จากนั้น **OP-AMP** จะนำผลรวมของกระแสไฟฟ้านี้ส่งผ่านความต้านทาน R_f เพื่อรักษาให้อินเวิร์ทติ้งอินพุตเป็น **0V** ดังนั้นเอาต์พุตของวงจรนี้คือค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_f ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าคูณด้วยค่าความต้านทาน R_f นั่นคือ

$$V_{OUT} = \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) R_f$$

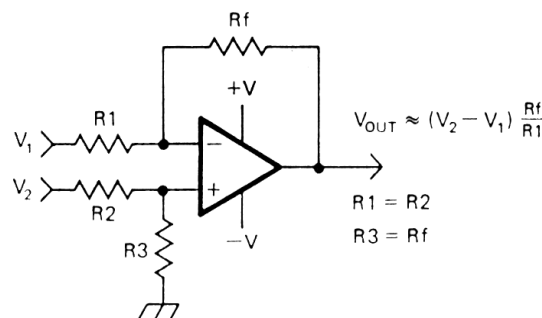
วงจรในลักษณะนี้มีชื่อเรียกว่า “**วงจร Adder**” ซึ่งมักจะถูกนำไปใช้ในการผสมสัญญาณเสียง หรือใช้เป็น **binary-weighted current** ใน **D/A Converter**



รูปที่ 10 – 7 Adder (Mixer)

10.1.6 วงจร *Differential-Input Amplifier*

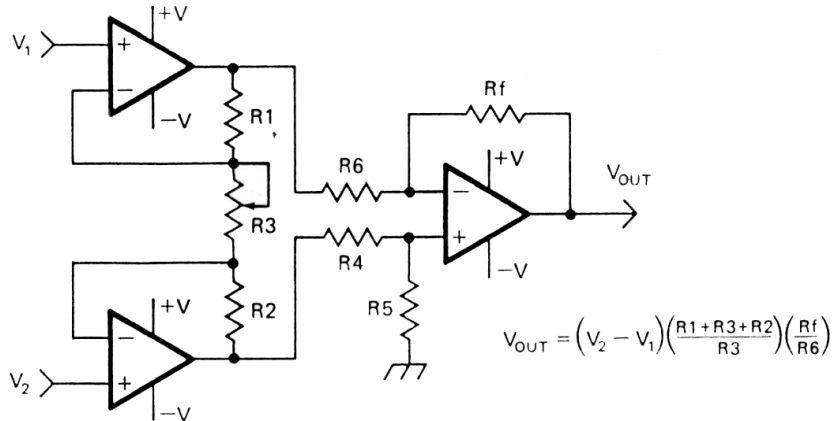
การที่เซนเซอร์ส่วนใหญ่มักจะมีสัญญาณเอาต์พุต 2 เส้น สัญญาณในแต่ละเส้นจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าหลายโวลต์ โดย **dc voltage** ที่ปรากฏในสายสัญญาณนี้ชื่อเรียกว่า “**common-mode voltage**” แต่สัญญาณจากเซนเซอร์ที่ต้องการขยายจริงจะมีความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้ง 2 เส้นเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์ ถ้าใช้วงจรขยายสัญญาณแบบปกติไม่ว่าจะเป็น **Non inverting Amplifier** หรือ **Inverting Amplifier** แรงเคลื่อนไฟฟ้าในสายสัญญาณทั้งหมดจะถูกขยายพร้อมกับความแตกต่างเพียงเล็กน้อยที่ต้องการ รูปที่ 10 – 8 แสดงวงจรขยายสัญญาณที่ใช้สำหรับแก้ไขปัญหานี้โดยไม่จำเป็นต้องใช้คาปาซิเตอร์มาบล็อก **dc voltage** แต่จะใช้ความต้านทานที่ต่ออยู่กับอินเวิร์ทติ้งอินพุตในการรักษาระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียงกับ **common-mode voltage** ส่วนวงจรขยายสัญญาณจะรักษาอินเวิร์ทติ้งอินพุตให้มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้คงที่ ถ้าออกแบบให้ตัวต้านทานมีค่าที่พอเหมาะ วงจรนี้จะทำการขยายเฉพาะค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่าง V_2 กับ V_1 ดังนั้นเอาต์พุตของวงจร **Differential-input Amplifier** จึงมีเฉพาะผลต่างของสัญญาณที่ไม่รวม **common-mode voltage**



รูปที่ 10 – 8 Differential-Input Amplifier

10.1.7 วงจร Instrumentation Amplifier

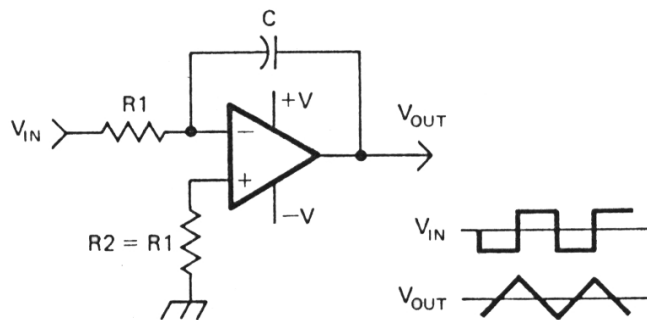
รูปที่ 10 – 9 เป็นภาพของวงจร OP-AMP สำหรับการประยุกต์ใช้ที่ต้องการตัด common-mode voltage ออกได้มากกว่าวงจร Differential-Input Amplifier โดย OP-AMP 2 ตัวแรกในวงจรจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ของสัญญาณอินพุตและทำการขยายสัญญาณเล็กน้อย ส่วน OP-AMP ที่จะส่งสัญญาณออกจะทำการตัด common-mode voltage ออกอีกครั้งพร้อมทั้งขยายสัญญาณและส่งเอาต์พุตออกไปประยุกต์ใช้งาน โดยทั่วไป วงจร Instrumentation Amplifier จะมีขายเป็น Single package



รูปที่ 10 – 9 Instrumentation Amplifier

10.1.8 วงจร Integrator

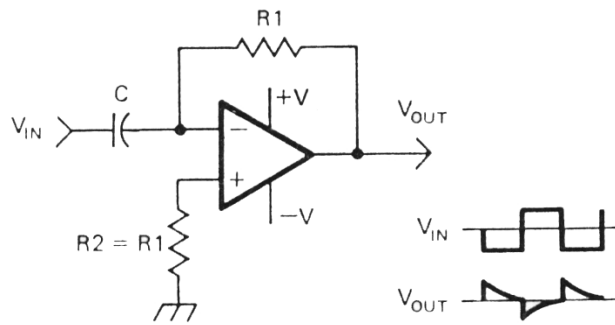
รูปที่ 10 – 10 เป็นวงจร OP-AMP ที่ใช้ในการสร้าง linear voltage ramp โดย dc voltage ที่ส่งเข้ามาทางอินพุตของวงจรนี้จะทำให้เกิดการแสไฟฟ้าคงที่ $V_{IN}/R1$ ไหลไปยัง Virtual-ground และแผ่นด้านหนึ่งของคาปาซิเตอร์ การที่ OP-AMP จะต้องรักษาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อินเวิร์ทเตอร์อินพุตให้เท่ากับ 0V จึงต้องดึงกระแสจากแผ่นอีกด้านหนึ่งของคาปาซิเตอร์มาใช้ คาปาซิเตอร์จึงประจุไฟด้วยอัตราการไหลของกระแสคงที่ ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้นในลักษณะ linear ramp การที่เรียกวงจรนี้ว่า วงจร Integrator เนื่องจากเอาต์พุตของวงจรนี้จะแปรผันกับการอินทิเกรต หรือผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าใต้กราฟที่เป็นมุมลาดเอียง waveform ในรูปแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุตของวงจร



รูปที่ 10 – 10 Integrator

10.1.9 วงจร Differentiator

รูปที่ 10 – 11 เป็นวงจร OP-AMP ที่สร้างสัญญาณเอาต์พุตแปรผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต ถ้าสัญญาณอินพุตของวงจรมีค่าเป็น 0V หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง เอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ 0 แต่ถ้ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าใหม่เข้ามาทางอินพุต แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมคาปาซิเตอร์จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันทีทันใด อินเวิร์ทติ้งอินพุตจึงเปลี่ยนไปจาก 0V จึงเกิดการประจุคาปาซิเตอร์ และดึงอินเวิร์ทติ้งอินพุตให้กลับมามีค่าเป็น 0V เช่นเดิม waveform ในรูปแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุตของวงจร

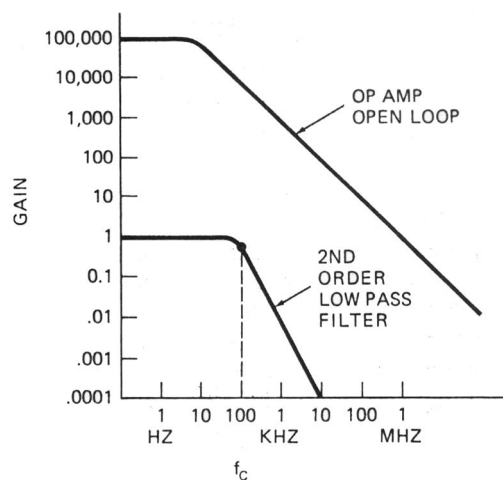


รูปที่ 10 – 11 Differentiator

10.1.10 Active Filter

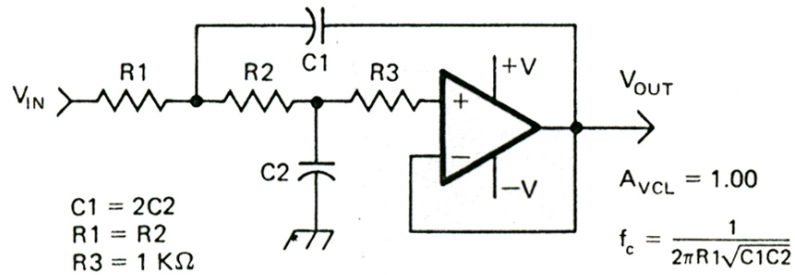
ในระบบควบคุมโดยทั่วไปมักจะมีค่าจำเป็นต้องใช้วงจรการกรองสัญญาณความถี่ต่ำ หรือความถี่สูงที่ไม่ต้องการออกจากค่าที่อ่านเข้ามาจากเซนเซอร์ ซึ่งตามปกติจะสามารถทำได้โดยใช้วงจร RC เป็นตัวกรองสัญญาณ แต่วงจรการกรองสัญญาณที่ใช้ OP-AMP ที่เรียกว่า “Active Filter” จะมีคุณสมบัติการควบคุมการกรองที่ดีกว่า

วงจรการกรองสัญญาณความถี่ต่ำ หรือ Low-pass Filter จะยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านออกไปได้ เอาต์พุตของวงจรมีค่าค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งถึง 0.707 ของค่าความถี่นั้นจะถึงจุดความถี่วิกฤติ (Critical frequency) หรือ Break point รูปที่ 10 – 12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราการขยายสัญญาณของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำที่แสดงให้เห็นจุดความถี่วิกฤติ (f_c) ให้สังเกตว่าความถี่ที่สูงกว่าจุดความถี่วิกฤติ ค่าอัตราการขยายสัญญาณจะลดลงอย่างรวดเร็ว



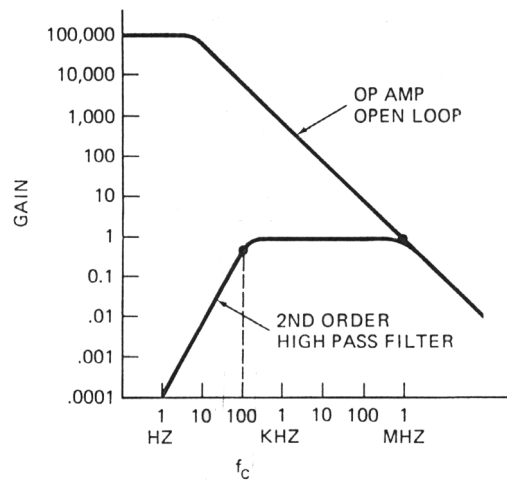
รูปที่ 10 – 12

รูปที่ 10 – 13 เป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ การที่จะจำแนกวงจรได้ว่าเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ให้ดูที่เส้นทางของ dc จากอินพุตไปยังนออินเวิร์ทติงอินพุตของแอมพลิฟายด์ ถ้ามีการเชื่อมต่อเส้นทางนี้ แสดงว่าวงจรนั้นเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

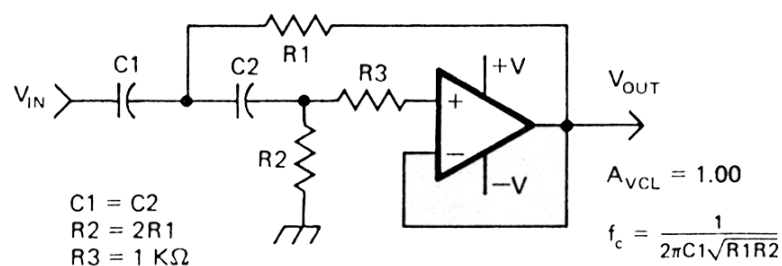


รูปที่ 10 – 13 Second order Low-pass Filter

ในทางตรงกันข้าม ถ้าดูวงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High-pass Filter) ดังรูปที่ 10 – 14 จะเห็นได้ว่าไม่มีองค์ประกอบของ dc จากสัญญาณอินพุต สามารถต่อไปถึงนออินเวิร์ทติงอินพุตได้ ดังนั้นวงจรนี้จึงไม่สามารถขยายสัญญาณ dc และสัญญาณความถี่ต่ำได้ ส่วนรูปที่ 10 – 15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราการขยายสัญญาณของวงจรกรองสัญญาณความถี่สูงที่แสดงให้เห็นจุดความถี่วิกฤติ (f_c) ให้สังเกตว่า gain-bandwidth product ของ OP-AMP จะเป็นตัวจำกัดการโต้ตอบกับความถี่สูงของวงจรนี้



รูปที่ 10 – 14



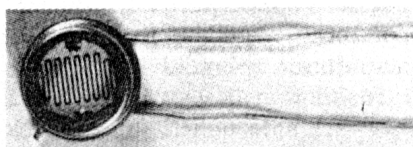
รูปที่ 10 – 15 Second order High-pass Filter

10.2 เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ (Sensors and Transducers)

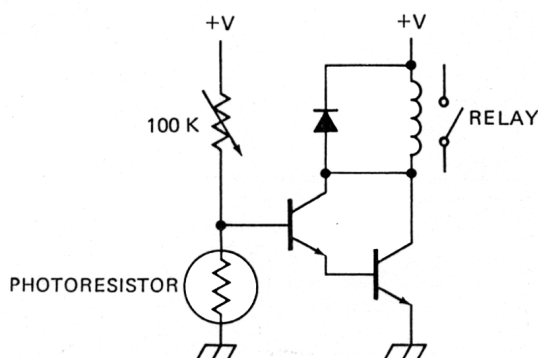
มีการนำเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์หลายประเภท มาใช้ในระบบควบคุมเป็นจำนวนมาก จนไม่สามารถอธิบายรายละเอียดการทำงานและการประยุกต์ใช้ได้หมด ในหัวข้อนี้จึงแนะนำเฉพาะเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์บางประเภทที่นิยมใช้ในระบบควบคุมเครื่องจักรกลโดยใช้ไมโครโพรเซสเซอร์

10.2.1 เซนเซอร์แสง (Light Sensor)

เซนเซอร์แสงอย่างง่าย คือตัวต้านทานซึ่งมีความต้านทานแปรเปลี่ยนไปตามความเข้มของแสง ที่เรียกว่า “Photo resistor” เช่น Clairex CL905 ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 16 (a) สำหรับหลักการทำงานของ Photo resistor ก็คือแสงจะส่องผ่านแผ่นกระจกลงไปยังขดลวดแคดเมียมซัลไฟด์ หรือแคดเมียมเซลีนายด์ ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยค่าความต้านทานจะแปรเปลี่ยนไปตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบ ความต้านทานของ CL905 จะแปรผันได้ตั้งแต่ $15\text{ k}\Omega$ จนถึง $15\text{ M}\Omega$ อย่างไรก็ตามตัวต้านทานลักษณะนี้นอกจากจะมีราคาแพงแล้ว หากต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยตรงจะต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน และไม่มีเสถียรภาพในขณะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง จึงต้องนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรดังแสดงตามรูปที่ 10 - 16 (b)



(a)



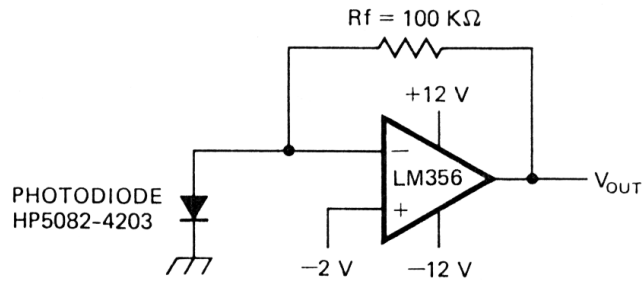
(b)

รูปที่ 10 – 16 (a) Clairex CL905 Photocell (b) วงจรควบคุมรีเลย์ด้วยแสง

วงจรถนุควบคุมรีเลย์ด้วยแสงมีการทำงาน คือเมื่อเริ่มมีความมืด ความต้านทานของ Photo resistor จะเพิ่มขึ้น ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์สูงขึ้น จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งทีเพียงพอต่อการไปออสซาเบส กระแสไฟฟ้าไหลจึงจากคอลเลคเตอร์ไปยังอิมิตเตอร์ เพื่อขับรีเลย์

อุปกรณ์อีกอย่างหนึ่งที่มีการทำงานตามระดับความเข้มของแสงคือ “โฟโตไดโอด (Photo Diode)” การทำงานของโฟโตไดโอด คือแสงที่ตกกระทบไดโอดจะทำให้กระแสที่รั่วไหล (Leakage Current) ของไดโอดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแสง วงจรในรูปที่ 10 – 17 จะใช้ในการแปลงค่ากระแสที่รั่วไหลนี้ให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่

สัมพันธ์กัน ให้สังเกตว่าในวงจรนี้จะใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าเป็นลบจ่ายเข้าไปยังอินเวอร์ทติ้งอินพุตของ OP-AMP เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง และส่งเอาต์พุตของ OP-AMP ไป reverse-bias ให้กับไดโอด ตัวอย่างของโฟโตไดโอดที่แสดงในรูปคือ HP5082-4203 ซึ่งค่ากระแสรั่วไหลจะมีค่าแปรผันได้ตั้งแต่ $0\ \mu\text{A}$ จนถึง $100\ \mu\text{A}$ ดังนั้นถ้าใช้ตัวต้านทาน $R_f = 100\ \text{k}\Omega$ จะทำให้เอาต์พุตของวงจรนี้มีค่าตั้งแต่ $0 - 10\ \text{V}$ การที่ในวงจรนี้เลือกใช้ LM356 FET เป็น Input Amplifier เนื่องจาก OP-AMP ตัวนี้ไม่ต้องการกระแส reverse-bias จากภายนอก



รูปที่ 10 – 17 วงจร Photo Diode สำหรับวัดค่าความเข้มของแสง

วงจร Photo Diode ในลักษณะนี้มักจะถูกนำมาใช้ในการตรวจนับปริมาณควัน โดยนำแกเลียมอาร์เซไนด์ Infrared LED มาวางไว้ที่ด้านหนึ่งของอุปกรณ์ตรวจนับ ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเป็นวงจรวัดค่าความเข้มของแสง เนื่องจากควันจะดูดกลืนแสง เมื่อเกิดควันมากปริมาณของแสงจาก LED ที่เดินทางมาถึงโฟโตไดโอดก็จะลดลง จึงสามารถส่งสัญญาณไปแจ้งให้ทราบปริมาณควันได้ การที่นำ Infrared LED มาใช้ ก็เนื่องจาก โฟโตไดโอดจะมีความไวต่อแสงในย่านอินฟราเรด

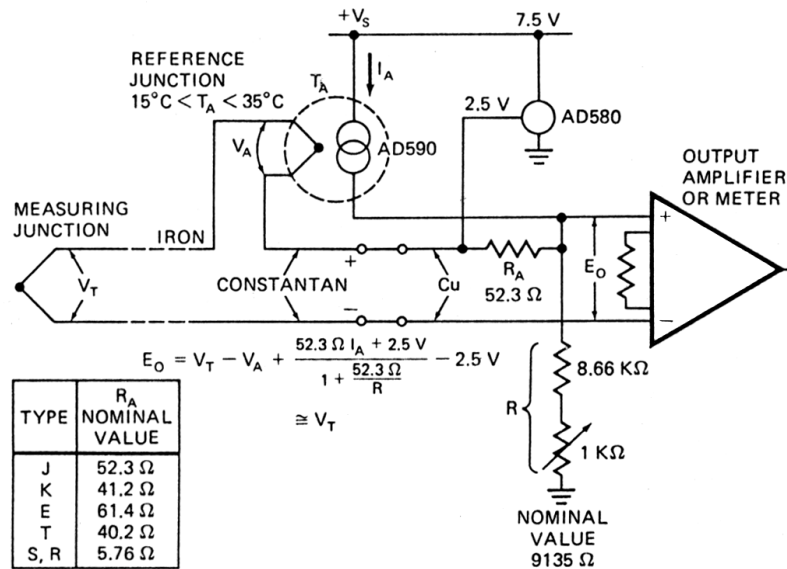
โซลาร์เซลล์เป็นอุปกรณ์อีกอย่างหนึ่งที่ใช้หลักการการวัดค่าความเข้มของแสง อย่างที่ทราบดีอยู่แล้วว่าโซลาร์เซลล์ทำมาจากซิลิกอน PN Junction ดังนั้นแสงที่ส่องกระทบโซลาร์เซลล์จะก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับการทำงานของโฟโตไดโอด กระแสที่ได้จะถูกนำไปประจุแบตเตอรี่เพื่อเก็บไว้ใช้งานต่อไป

10.2.2 เซนเซอร์อุณหภูมิ (Temperature Sensor)

เซนเซอร์อุณหภูมิที่นิยมใช้มี 4 ประเภท คือ Semiconductor Temperature Sensor, Thermocouples, Resistance Temperature Detectors และ Thermistors

10.2.2.1 Semiconductor Temperature Sensor

Semiconductor Temperature Sensor แบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 2 ชนิด คือ Temperature-sensitive voltage source และ Temperature-sensitive current source ตัวอย่างของเซนเซอร์ชนิดแรก ได้แก่ National LM35 ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 18 (a) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C เอาต์พุตของ LM35 จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น $10\ \text{mV}$ และถ้าต่อเอาต์พุตเข้ากับ $-V_S$ ดังรูป เซนเซอร์นี้จะสามารถวัดค่าอุณหภูมิได้ในย่าน -55°C ถึง $+150^\circ\text{C}$ และมีความเที่ยงตรงประมาณ 1°C

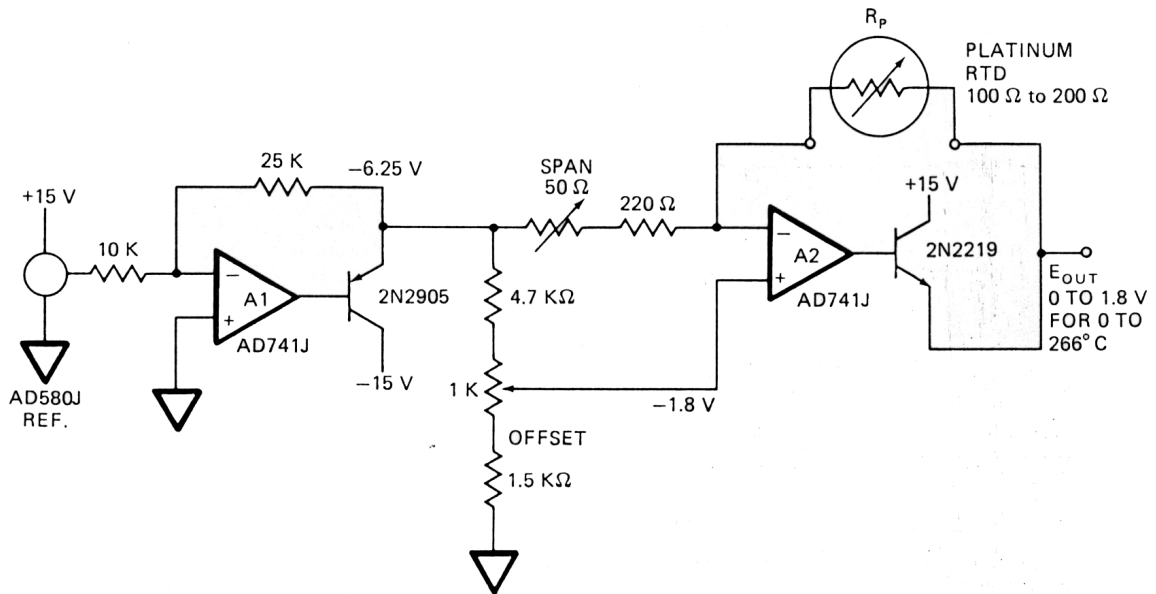


รูปที่ 10 – 19 วงจรขยายสัญญาณที่ได้จาก Thermocouple

ในรูปจะเห็นได้ว่าสายไฟที่ต่อเอาต์พุตจากตัววัดจะนำมาจาก Constantan ทั้ง 2 เส้น ดังนั้นการใช้ลวดทองแดงต่อเข้าไปยังแอมป์ลิฟายด์ จึงทำให้เป็น Thermocouple อินพุตของแอมป์ลิฟายด์จึงเป็น ความแตกต่างระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อม Thermocouple ทั้งคู่ อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาอีกเล็กน้อยหาก อุณหภูมิของ Thermocouple ทั้งคู่เกิดการเปลี่ยนแปลง จะทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้เกิด จากที่ใด ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการปรับเปลี่ยนค่า R_A ในวงจร ตามประเภทของ Junction ดังแสดงในรูปที่ 10 – 19 ส่วนปัญหาประการสุดท้ายคือเอาต์พุตที่ได้จาก Thermocouple จะไม่แปรผันโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จึงต้องแก้ไขโดยการใช้วงจรอนาล็อกในการปรับค่าอัตราขยายสัญญาณของแอมป์ลิฟายด์ อย่างไรก็ตามหากใช้ Thermocouple ในเครื่องมือวัดที่ควบคุมด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยง่าย โดยใช้ค่าแก้ไข อุณหภูมิที่ถูกต้องในตารางที่เก็บไว้ใน ROM

10.2.2.3 RTDs และ Thermistors

Resistance Temperature Detectors (RTDs) และ Thermal Sensitive Resistors (หรือเรียกว่า Thermistors) เป็นเซนเซอร์อุณหภูมิประเภทที่ใช้ตัวต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความ ต้านทานตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดย RTDs จะนำมาจากแผ่นฟิล์มแพลตตินัมหรือลวดนิเกิล ถึงแม้ว่าค่า ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปจะไม่แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ แต่ก็มีเสถียรภาพสูง ดังนั้นเซนเซอร์อุณหภูมิประเภท นี้จึงมักถูกนำมาใช้ในการวัดอุณหภูมิที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง RTDs จะสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -250°C ถึง $+850^\circ\text{C}$ วงจรในรูปที่ 10 – 20 จะใช้ในการแปลงค่าความต้านทานที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิให้เป็น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีค่าสัมพันธ์กัน



รูปที่ 10 – 20 วงจรการเชื่อมต่อ 100Ω RTD ในการวัดอุณหภูมิ

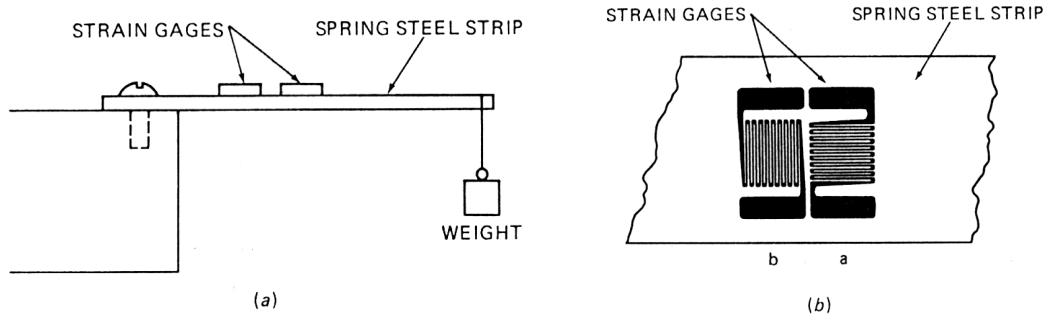
Thermistors ทำมาจาก Semiconductor ที่ค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง Thermistors เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีราคาต่ำ และมีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามจะมีความเที่ยงตรงไม่มากนัก จึงมักถูกนำมาใช้ในการวัดอุณหภูมิที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงมาก วงจรในลักษณะเดียวกับรูปที่ 10 – 20 สามารถนำมาใช้ในการแปลงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของ Thermistor ให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สัมพันธ์กันได้

10.2.3 Force and Pressure Transducer

ในการแปลงค่าแรงหรือกำลังดันให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้ Strain gages หรือ linear variable differential transformers (LVDTs) ซึ่งวิธีการทั้ง 2 อย่างนี้ จะเกี่ยวข้องกับการทำให้บางสิ่งบางอย่างเกิดการเคลื่อนที่ ด้วยเหตุผลนี้อุปกรณ์เหล่านี้จึงเรียกว่าทรานสดิวเซอร์ (Transducer) แทนที่จะเรียกว่าเซนเซอร์ (Sensors)

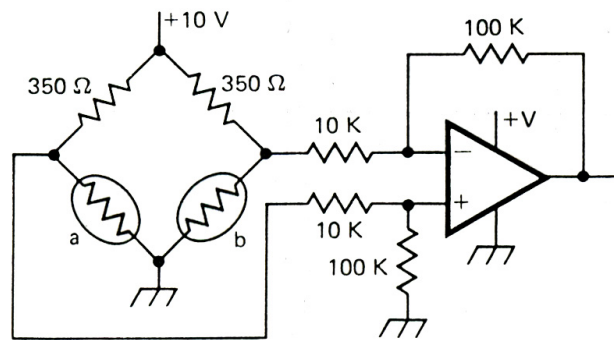
10.2.3.1 Strain Gages และ Load Cells

Strain gage คือตัวต้านทานขนาดเล็ก ซึ่งค่าความต้านทานจะแปรผันตามความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมากมักจะทำมาจากลวดเส้นบางๆ หรือ Semi conductor รูปที่ 10 – 21 เป็นภาพการจัดตั้งเครื่องมือวัดค่าแรงหรือน้ำหนักโดยใช้ Strain gage ปลายด้านหนึ่งของแผ่นสปริงจะถูกยึดติดอยู่กับพื้นผิวที่มั่นคง และยึด Strain gage ติดกับแผ่นสปริงที่โค้งงอได้ด้วยกาว แรงหรือน้ำหนักที่จะวัดค่าจะถูกใส่ไว้ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของแผ่นสปริง เมื่อมีแรงกระทำหรือมีน้ำหนักแผ่นโลหะจะเกิดการโค้งงอ Strain gage จึงถูกทำให้ยึดตัวออก ความต้านทานจึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการโค้งงอของแผ่นโลหะสปริงจะแปรผันกับแรงกระทำที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ความต้านทานจึงมีค่าผันแปรตามแรงกระทำ ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Strain gage แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม Strain gage ก็ จะแปรผันตามแรงกระทำ



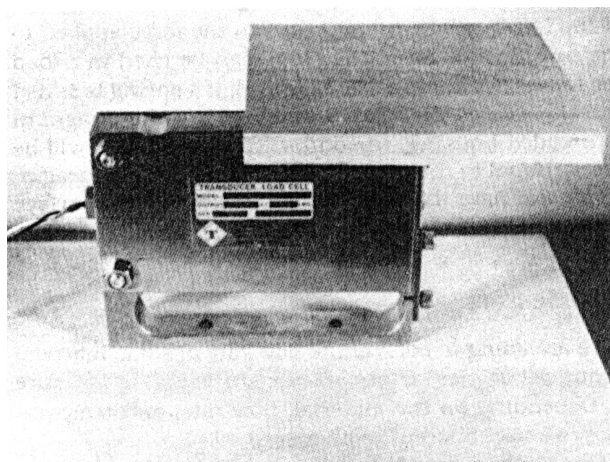
รูปที่ 10 – 21 การใช้ Strain gage วัดแรงกระทำ (a) ภาพด้านข้าง (b) ภาพด้านบน

อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานของ Strain gage ก็จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย ดังนั้นในการติดตั้ง Strain gage จึงมักจะติดตั้ง 2 ชุด ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 21 (b) ความต้านทานของ Strain gage ทั้ง 2 ชุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ แต่จะมีเพียงชุด A เท่านั้น ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามแรงกระทำ เมื่อต่อ Strain gage ทั้ง 2 ชุดนี้เข้ากับวงจร Bridge ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 22 จะทำให้เกิดการถ่วงสมดุลระหว่าง Strain gage ทั้ง 2 ชุด และผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อการวัดค่าแรงกระทำ



รูปที่ 10 – 22 วงจรการวัดค่าแรงกระทำ

วงจร Strain-gage bridge จะถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวัดค่าแรงและกำลังต้น ถ้าใช้กับโครงสร้างที่มีลักษณะเหมือนคานที่โค้งงอได้ มักจะใช้ในการวัดน้ำหนัก และมีชื่อเรียกว่า “load cell” ซึ่งสามารถส่งข้อมูลให้ไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อทำการควบคุมได้ รูปที่ 10 – 23 เป็นภาพของ 10-lb load cell



รูปที่ 10 – 23 Load cell Transducer

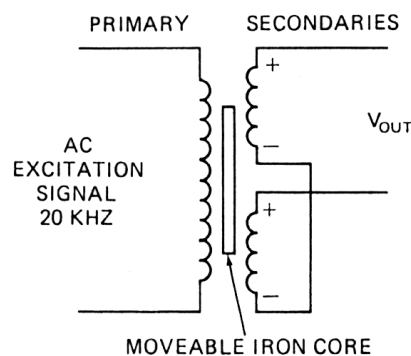
ถ้าวงจร Strain-gage bridge ถูกนำมาติดตั้งกับไดอะแฟรมที่ยุบตัวได้ เอาต์พุตของ วงจรนี้จะแปรผันตามกำลังดันที่กระทำต่อไดอะแฟรม ถ้าด้านหลังไดอะแฟรมเป็นสุญญากาศ ค่ากำลังดันที่วัดได้นี้จะเป็นค่ากำลังดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure) แต่ถ้าใช้ไดอะแฟรมแบบเปิด ค่ากำลังดันที่วัดได้จะเป็นกำลังดันสัมพัทธ์ที่ต้องเปรียบเทียบกับกำลังดันบรรยากาศ และถ้าแผ่นไดอะแฟรมทั้งสองด้านถูกต่ออยู่กับแหล่งที่มีกำลังดันแตกต่างกัน เอาต์พุตที่ได้จะเป็นผลต่างระหว่างความดันทั้งสองด้านของไดอะแฟรม รูปที่ 10 – 24 เป็นภาพของ Sensym LX1804GBZ Pressure Transducer ที่ใช้สำหรับวัดค่าความดันได้ตั้งแต่ 0 ถึง 15lb/in² ซึ่งโดยมากมักจะนิยมใช้ในเครื่องมือวัดความดันโลหิตที่ควบคุมด้วยไมโครโพรเซสเซอร์



รูปที่ 10 – 24 LX1804GBZ Pressure Transducer

10.2.3.2 Linear variable differential transformers (LVDTs)

LVDT คือทรานสดิวเซอร์ประเภทหนึ่งที่มีถูกนำมาใช้ในการวัดค่าแรง กำลังดัน หรือ ตำแหน่ง รูปที่ 10 – 25 คือโครงสร้างพื้นฐานของ LVDT ซึ่งประกอบด้วยชุดคอยล์ 3 ชุด เป็นชุดปฐมภูมิ (Primary) 1 ชุด เป็นชุดทุติยภูมิ (Secondary) 2 ชุด และมีแกนกลางเป็นเหล็กกล้าซึ่งเคลื่อนที่ได้

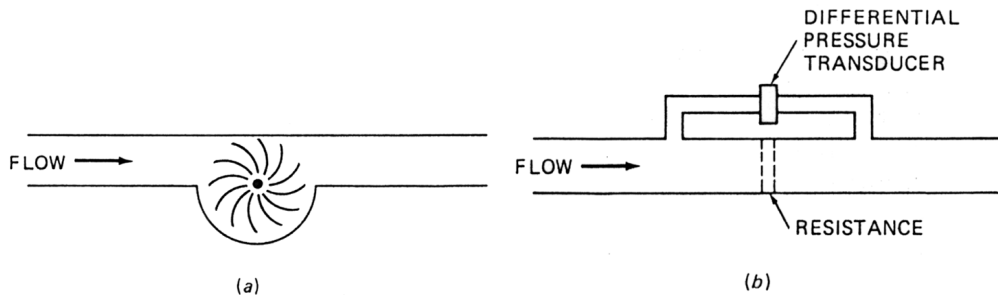


รูปที่ 10 – 25 โครงสร้างของ Linear variable differential transformers

สัญญาณ AC excitation 20 kHz ถูกจ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิ ส่วนขดทุติยภูมิทั้งสองขด จะถูกต่อให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในแต่ละขดทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามกัน ถ้าแกนเหล็กอยู่ใน ตำแหน่งกึ่งกลาง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิแต่ละขดจะเท่ากันและหักล้างกันหมดพอดี เอ๊าต์พุตของ วงจรจะเท่ากับ 0V แต่ถ้าแกนเหล็กเกิดการเคลื่อนที่ออกจากจุดกึ่งกลาง ขดลวดทุติยภูมิขดหนึ่งจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า มากกว่าอีกขดหนึ่ง และหักล้างกันไม่หมด เอ๊าต์พุตของวงจรก็คือผลต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำ สำหรับความล้มพันธ์ของเฟลสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอ๊าต์พุตจะเป็นตัวระบุทิศทางในการเคลื่อนที่ของแกนกลาง

10.2.4 เซนเซอร์วัดอัตราการไหล (Flow Sensor)

ถ้าต้องการที่จะควบคุมอัตราการไหลของของเหลวบางอย่างด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ จะต้องสามารถ วัดค่าอัตราการไหลนั้นได้ วิธีการหนึ่งในการวัดอัตราการไหลคือทำครีบบวงล้อมันทางไหล ดังรูปที่ 10 – 26 (a) อัตรา การไหลจะคำนวณจากจำนวนรอบที่ครีบบวงลื้อหมุนไปในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เราจะทราบจำนวนรอบที่ครีบบวงลื้อหมุนไป ได้โดยการใช้ Optical Encoder ติดไว้กับเพลลาของครีบบวงลื้อ



10 – 26 เซนเซอร์วัดอัตราการไหล

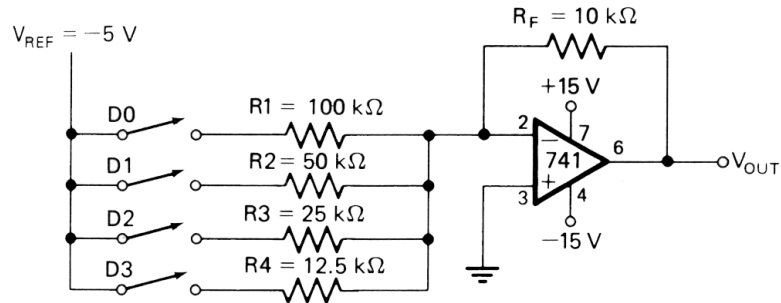
วิธีการอีกอย่างหนึ่ง คือการวัดอัตราการไหลด้วย Differential Pressure Transducer ดังรูปที่ 10 – 26 (b) ตาข่ายลวดถูกใส่เข้าไปในท่อเพื่อสร้างค่าความต้านทาน การไหลผ่านตาข่ายนี้จะทำให้เกิดความแตกต่าง ระหว่างความดันด้านหน้าและด้านหลังตาข่ายลวด ดังนั้นเอ๊าต์พุตของ Pressure Transducer จะแปรผันกับอัตราการ ไหลของของเหลวหรือก๊าซภายในท่อ โดยใช้หลักการเช่นเดียวกับการที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะแปรผันกับอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้า

10.3 D/A Converter

การใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุมอุปกรณ์นั้น เมื่อก้าวถึงเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดค่าอนาล็อกต่างๆ ไม่ว่าจะ เป็นอุณหภูมิ ความดัน และอื่นๆ ให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้าแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเราจะอธิบายถึงการนำ อุปกรณ์ A/D Converter มาใช้ในการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเหล่านั้นให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลที่ไมโคร โพรเซสเซอร์สามารถนำไปใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจาก D/A Converter เป็นอุปกรณ์อย่างง่ายที่ใช้ในการแปลง สัญญาณดิจิทัลให้เป็นอนาล็อก และ A/D Converter หลายประเภทจะมี D/A Converter เป็นส่วนหนึ่งของ อุปกรณ์ ดังนั้นในที่นี้จะเริ่มอธิบายจากหลักการทำงานของ D/A Converter เป็นอันดับแรก

10.3.1 หลักการทำงาน

วัตถุประสงค์หลักของอุปกรณ์ D/A Converter คือมีหน้าที่ในการแปลงข้อมูลไบนารีให้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าเลขฐานสองของข้อมูลไบนารีนั้น รูปที่ 10 – 27 แสดงวงจรรายง่ายของ 4-bit D/A Converter



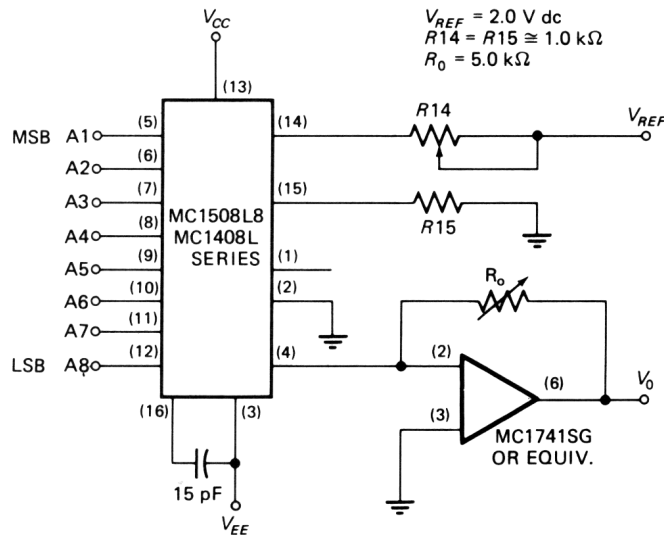
รูปที่ 10 – 27 4-bit D/A Converter

เนื่องจากอินพุตที่อินพุตของ OP-AMP ถูกต่ออยู่กับกราวด์ OP-AMP จึงพยายามที่จะรักษาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อินพุตให้เท่ากับ 0V เมื่อสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งต่อทางไฟ จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลจาก V_REF (-5V) ผ่านตัวต้านทานไปรวมกับกระแสย้อนกลับ ดังนั้นเอาต์พุตของ OP-AMP จะต้องมียุทธศาสตร์ที่บ่อนกลับไปรวมแล้วทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อินพุตให้เท่ากับ 0V เช่นถ้าสวิตช์ D0 ต่อทางไฟ กระแสไฟ 0.05 mA จะไหลเข้าไปรวมกับกระแสย้อนกลับ การที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับได้ OP-AMP จะต้องสร้างเอาต์พุตให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า $0.05 \text{ mA} \times 10 \text{ k}\Omega = 0.5 \text{ V}$ และถ้าสวิตช์ D1 ต่อทางไฟเพิ่มอีก 1 ตัว จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก 0.1 mA รวมเป็น 0.15 mA ดังนั้นการที่ OP-AMP จะรักษาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อินพุตให้เท่ากับ 0V จะต้องมียุทธศาสตร์ $0.15 \text{ mA} \times 10 \text{ k}\Omega = 1.5 \text{ V}$

จุดสำคัญก็คือค่าความต้านทานที่ใช้จะสัมพันธ์กันในลักษณะไบนารี กระแสที่ไหลเข้ามาที่ OP-AMP จะสร้างให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สอดคล้องกับข้อมูลไบนารีที่ส่งเข้ามาควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์แต่ละตัว สวิตช์ D3 ในรูปที่ 10 – 27 จึงเป็นตัวแทนของบิตที่มีความสำคัญสูงสุด (MSB) ทั้งนี้เนื่องจากการต่อทางไฟสวิตช์ตัวนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้ามาที่ OP-AMP มากที่สุด และการที่ใช้ V_REF เป็นค่าลบ จะทำให้เอาต์พุตของวงจรนี้มีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหัวใจสำคัญของ D/A Converter ก็คือชุดของความต้านทานที่มีค่าแตกต่างกันในลักษณะของรหัสไบนารี เพื่อให้กระแสไหลผ่านไปยัง OP-AMP สร้างเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เป็นตัวแทนชุดข้อมูลไบนารี

10.3.2 คุณลักษณะเฉพาะ

รูปที่ 10 – 28 แสดงวงจรรายง่ายของ IC D/A Converter ต่ออยู่กับ OP-AMP ซึ่งมีหน้าที่ในการแปลงค่ากระแสให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เราจะใช้วงจรนี้ในการอธิบายคุณลักษณะเฉพาะของ D/A Converter คุณสมบัตินี้ประการแรกของ D/A Converter คือความละเอียด (resolution) ซึ่งพิจารณาได้จากจำนวนบิตของข้อมูลอินพุตคอนเวอร์เตอร์ที่มีอินพุต 8 บิต ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 28 จะมีเอาต์พุตที่แตกต่างกันได้ $2^8 = 256$ ระดับ ดังนั้นจึงมีความละเอียดได้ถึง $1/256$ หรืออาจแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ คือ MC1408 มีความละเอียด $(1/256) \times 100 = 0.39\%$



Theoretical V_0

$$V_0 = \frac{V_{REF}}{R_{14}} (R_0) \left\{ \frac{A1}{2} + \frac{A2}{4} + \frac{A3}{8} + \frac{A4}{16} + \frac{A5}{32} + \frac{A6}{64} + \frac{A7}{128} + \frac{A8}{256} \right\}$$

ADJUST V_{REF} , R_{14} OR R_0 SO THAT V_0 WITH ALL DIGITAL INPUTS AT HIGH LEVEL IS EQUAL TO 9.961 V

$$V_0 = \frac{2 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} (5 \text{ k}\Omega) \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} + \frac{1}{128} + \frac{1}{256} \right\}$$

$$= 10 \text{ V} \left\{ \frac{255}{256} \right\} = 9.961 \text{ V}$$

รูปที่ 10 – 28 Motorola MC1408 8-bit D/A Converter

คุณลักษณะประการต่อมาที่จะพิจารณาคือ **Full-Scale Output Voltage** สำหรับคอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 10 – 28 กระแสที่จ่ายไปยังสวิตช์ทั้งหมดได้มาจาก V_{REF} ที่ไหลผ่าน R_{14} กระแสเอาต์พุตจาก pin 4 ของ **D/A Converter** จะถูกดึงผ่าน R_0 เพื่อสร้างเป็นสัญญาณเอาต์พุต ตามสูตรที่แสดงอยู่ได้รูป ถึงแม้ว่าค่าที่คำนวณได้ นี้จะไม่ถึง 10 V แต่จะถือว่าคอนเวอร์เตอร์นี้เป็น **10V- output Converter**

คุณสมบัติความเที่ยงตรงของ **D/A Converter** คือการเปรียบเทียบระหว่างเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจริง กับเอาต์พุตที่ออกแบบ โดยจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของ **Full-Scale Output Voltage** เช่น $10\text{V} \pm 0.2\%$ แสดงว่า เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ตัวนี้จะมียุทธศาสตร์สูงสุด $0.002 \times 10\text{V} = 20\text{mV}$ สำหรับ **D/A Converter** ในอุดมคติ ความผิดพลาดของเอาต์พุตจะมีค่าได้ไม่เกิน $\pm 1/2$ ของค่า **LSB**

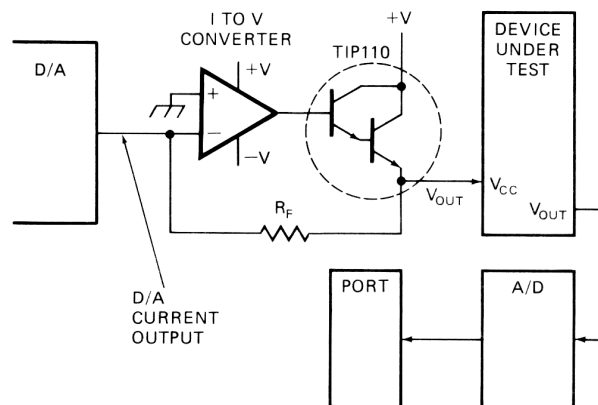
คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่สำคัญของ **D/A Converter** คือ **Linearity** ซึ่งหมายถึงความสามารถ ในการรักษารเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ในขณะที่ข้อมูลอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปจะเปรียบเทียบจากการที่สวิตช์ทุกตัว ยังไม่ต่อทางไฟจนกระทั่งสวิตช์ทุกตัวต่อทางไฟ (ข้อมูล 0000 0000 เปลี่ยนไปเป็น 1111 1111) ในอุดมคติแล้วการ เบี่ยงเบนของเอาต์พุตจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1/2$ ของค่า **LSB** อย่างไรก็ตาม **D/A Converter** ที่มีขายในท้องตลาด อาจจะมีอัตราการเบี่ยงเบนของเอาต์พุตมากกว่านี้ เช่น **National DAC1020** ซึ่งเป็น **10-bit resolution Converter** จะมีคุณสมบัติ **Linearity 0.05%**

คุณสมบัติประการสุดท้ายที่จะพิจารณาในที่นี้คือ **Settling Time** การที่ส่งค่าข้อมูลไบนารีเวิร์ดเข้าไป ใน **D/A Converter** การที่เอาต์พุตจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สอดคล้องกับข้อมูลอินพุตจะต้องใช้เวลาในการปรับแต่ง

จนกระทั่งได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกต้อง ช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับแต่งเอาต์พุตจนกระทั่งมีความเบี่ยงเบนอยู่ภายใน $\pm 1/2$ ของค่า LSB จะเรียกว่า “Settling Time” ตัวอย่างเช่น National DAC1020 ซึ่งเป็น 10-bit Converter จะมีช่วงเวลา Settling Time เท่ากับ 500 ns คุณสมบัติที่นับว่ามีความสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้ ทั้งนี้เนื่องจากถ้านำ Converter ไปใช้งานในสถานะที่มีความถี่สูงมากจนเกินไป Converter จะยังไม่สามารถปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตรงตามข้อมูลอินพุตก่อนที่จะรับข้อมูลชุดใหม่เข้ามา

10.3.3 การเชื่อมต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์

D/A Converter มีการนำไปประยุกต์ใช้ในเรื่องที่ไม่เกี่ยวข้องกับไมโครโพรเซสเซอร์อย่างกว้างขวาง เช่นในการแปลงข้อมูลเสียงในเครื่องเล่นแผ่นดิสก์ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อขับลำโพง อย่างไรก็ตามในที่นี้เราจะมุ่งจุดสนใจไปที่การใช้ D/A Converter กับไมโครคอมพิวเตอร์ สมมติว่าเราต้องการที่จะสร้างอุปกรณ์ทดสอบ Power Supply ที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุม ถ้าต่อเอาต์พุตของ D/A Converter เข้ากับวงจร High-power buffer ดังรูปที่ 10 – 29 จะสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงระดับการจ่าย Power-supply ได้ตามโปรแกรมควบคุม ในการพิจารณาเอาต์พุตของ IC ภายใต้การทดสอบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง Supply ให้ต่ออินพุตของ A/D Converter เข้ากับเอาต์พุตของ IC แล้วต่อเอาต์พุตของ A/D Converter เข้ากับอินพุตพอร์ตของไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำได้



รูปที่ 10 – 29 High-power buffer for D/A output

10.4 A/D Converter

10.4.1 คุณลักษณะเฉพาะ

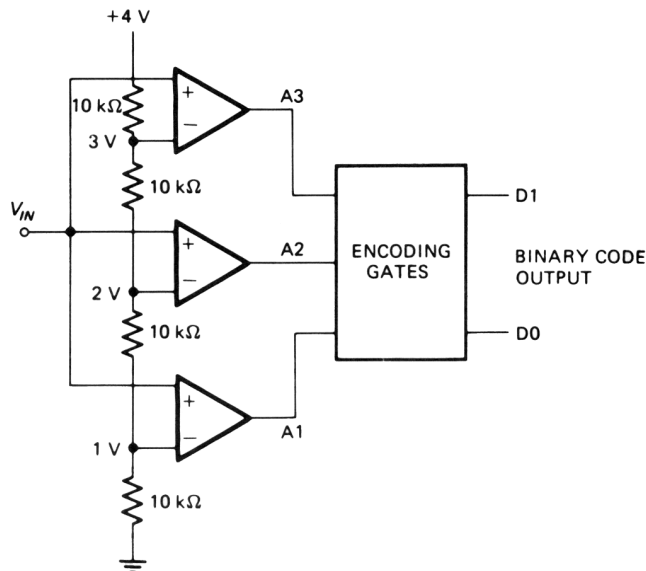
ฟังก์ชันการทำงานของ A/D Converter คือการสร้างเวิร์ดข้อมูลดิจิทัลซึ่งเป็นตัวแทนของระดับกระแสไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาล็อก ดังนั้นคุณลักษณะเฉพาะโดยทั่วไปของ D/A Converter จึงคล้ายคลึงกับคุณลักษณะเฉพาะของ D/A Converter โดย ความละเอียด (Resolution) ของ A/D Converter จะกล่าวถึงจำนวนบิตข้อมูลของเอาต์พุต ตัวอย่างเช่น 8-bit D/A Converter จะมีความละเอียด 1/256 สำหรับค่าความเที่ยงตรงและ Linearity มีความหมายเช่นเดียวกับ D/A Converter ส่วนคุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญของ A/D Converter คือ Conversion Time ซึ่งหมายถึงเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นเวิร์ดข้อมูลรหัสไบนารี ดังนั้นเมื่อกล่าวถึง A/D Converter ความเร็วสูง จะหมายถึง A/D Converter นั้นมีค่า Conversion Time ต่ำ

10.4.2 ประเภทของ A/D Converter

มีวิธีการต่างๆ ในการที่จะแปลงข้อมูลอนาล็อกให้เป็นรหัสไบนารีเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีการแปลงโดยใช้ A/D Converter ประเภทต่างๆ เพียง 3 ประเภท ซึ่งวิธีการต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลให้ทราบถึงประสิทธิภาพของ A/D Converter จาก Conversion Time

10.4.2.1 Parallel Comparator A/D Converter

รูปที่ 10 – 30 เป็นวงจร 2-bit Converter ประเภทที่ใช้ Parallel Comparator ซึ่งมีหลักการทำงานคือ Voltage Divider จะกำหนดแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิงที่ขาอินเวิร์ทตั้งอินพุตของ Comparator แต่ละตัว โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิงที่ Comparator ตัวบนสุดจะแทนค่าสูงสุดของ Converter แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จะถูกแปลงค่าให้เป็นข้อมูลดิจิทัลจะถูกใส่เข้ามาทางขาอนอินเวิร์ทตั้งอินพุตของ Comparator แต่ละตัวพร้อมกันแบบขนาน ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิงที่ Comparator เอาต์พุตจะเป็น Logic High ตัวอย่างเช่นถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 2.6V เอาต์พุต A1 และ A2 จะเป็น High

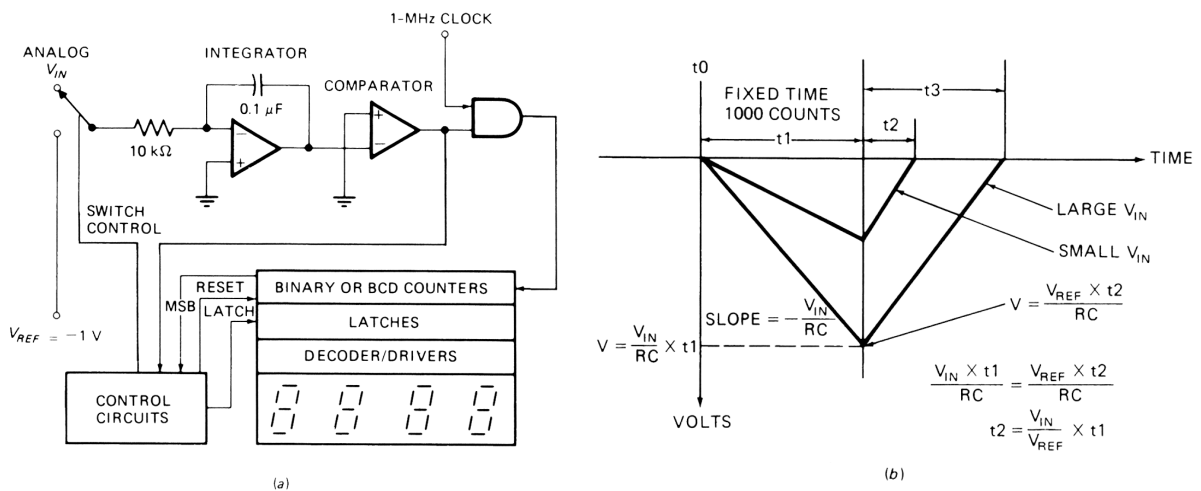


รูปที่ 10 – 30 Parallel Comparator A/D Converter

ข้อดีที่สำคัญของ A/D Converter ประเภทนี้คือมีความเร็วในการแปลงสูง จะถูกหน่วงเวลาเท่ากับ Propagation Delay ของ Comparator เท่านั้น และถึงแม้ว่าเอาต์พุตจาก Comparator จะไม่ใช่รหัสไบนารีมาตรฐาน แต่ก็สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของข้อมูลแบบใดก็ได้ ส่วนข้อเสียที่สำคัญของ A/D Converter ประเภทนี้ก็คือถ้าต้องการให้มีความละเอียดมาก จะต้องใช้ Comparator ตามจำนวนบิตที่ต้องการจะทำการแปลง เช่นในรูปที่ 10 – 30 ซึ่งเป็น 2-bit Converter จะต้องใช้ Comparator 3 ตัว นั่นคือถ้าต้องการความละเอียด N-bit จะต้องใช้ Comparator ทั้งหมด $(2^N - 1)$ ตัว ซึ่งหมายความว่าถ้าต้องการข้อมูลดิจิทัลที่มีความละเอียด 8 บิต จะต้องใช้ Comparator ทั้งหมด 255 ตัว โดยมากในการใช้งานจะต้องการใช้ A/D Converter ใน single-package จึงทำให้ A/D Converter ประเภทนี้ที่มีความเร็วสูงมีราคาแพง ในปัจจุบันมี 8-bit A/D Converter ซึ่งมี Conversion Time น้อยกว่า 10 ns ในท้องตลาด แต่ก็มีราคาแพงมาก

10.4.2.2 Dual-Slope A/D Converter

รูปที่ 10 – 31 (a) เป็นบล็อกไดอะแกรมของ Dual-Slope A/D Converter ซึ่งมักนิยมใช้เป็นหัวใจหลักของเครื่อง Digital Volt Meter เนื่องจากสามารถให้ความละเอียดได้สูง โดยมีราคาต่ำ การพิจารณาเริ่มต้นจากการรีเซ็ตเคาน์เตอร์เป็นศูนย์ และต่ออินพุตของ Integrator เข้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตที่จะทำการแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล ถ้าสมมติว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตมีค่าเป็นบวก จะทำให้เอาต์พุตของ Integrator มีความชันเป็นลบ ดังแสดงตามรูป 10 – 31 (b) ด้านซ้าย และในทันทีที่เอาต์พุตของ Integrator มีค่าต่ำกว่า 0V จะทำให้เอาต์พุตของ Comparator เป็น High ซึ่งจะ enable AND Gate ให้ส่งพัลส์ 1-MHz ออกมาแสดงผลที่เคาน์เตอร์ และหลังจากนับไปจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็น 1000 วงจรควบคุมจะสวิตช์ให้อินพุตของ Integrator ต่อเข้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งมีค่าเป็นลบ และรีเซ็ตเคาน์เตอร์ให้เป็นศูนย์ การที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตมีค่าเป็นลบ จะทำให้เอาต์พุตของ Integrator มีความชันเป็นบวก ดังแสดงตามรูป 10 – 31 (b) ด้านขวา และเมื่อเอาต์พุตของ Integrator มีค่าสูงกว่า 0V เอาต์พุตของ Comparator จะเป็น Low และ disable AND Gate ตัวอย่างเช่นถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตมีค่า +2V จะสร้างสัญญาณนับถึง 2000 และเนื่องจากตัวต้านทานและคาปาซิเตอร์ถูกใช้สำหรับทั้งแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุตและแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิง การเปลี่ยนแปลงค่าอันเนื่องมาจากอุณหภูมิจึงไม่ส่งผลกระทบต่อความเที่ยงตรงในการแปลงค่าของ A/D Converter

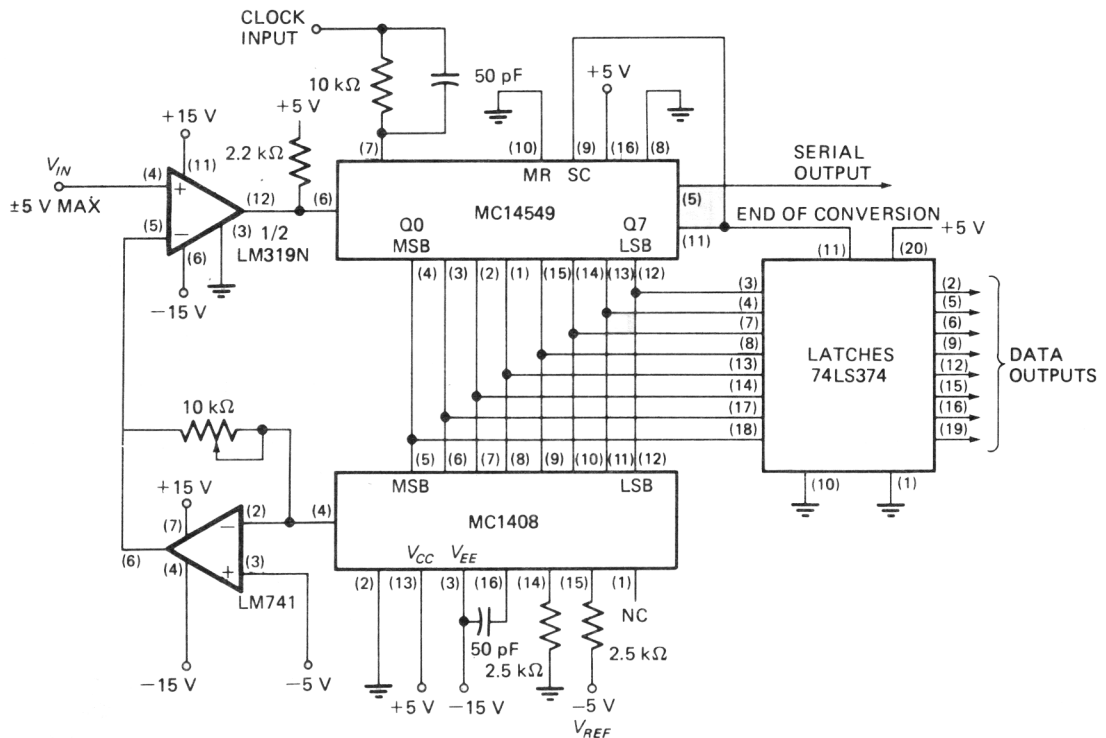


รูปที่ 10 – 31 Dual-Slope A/D Converter

A/D Converter ประเภท Dual-Slope นี้มีอยู่ในรูปแบบของ Single IC Package เช่น Intersil ICL7136 ซึ่งบรรจุวงจรการแปลงค่า 3 1/2-digit A/D Converter พร้อมทั้งวงจรขับ LED เพื่อแสดงผลภายใน Package เดียว ซึ่งสามารถแสดงค่าได้สูงสุด 1999 ดังนั้นจึงมีความละเอียดถึง 1 ใน 2000 ตัวอย่างของ A/D Converter อีกตัวหนึ่งคือ Intersil ICL7135 ซึ่งบรรจุวงจรแปลงค่าสำหรับ 4 1/2-digit A/D Converter พร้อมทั้ง Multiplexed BCD Output เพื่อแสดงผลเป็นเลข BCD สำหรับชิปเซ็ต Intersil ICL8068 และ ICL7104-16 จะบรรจุวงจร slope-type ที่แปลงข้อมูลได้ละเอียดถึง 16 บิต ข้อเสียที่สำคัญของ A/D Converter ประเภทนี้คือความเร็วในการแปลงข้อมูลค่อนข้างต่ำ นั่นคือสำหรับ 4 1/2-digit A/D Converter จะมีค่า Conversion Time ประมาณ 300 ms

10.4.2.3 Successive-Approximation A/D Converter

รูปที่ 10 – 32 เป็นวงจร 8-bit Successive-Approximation A/D Converter ซึ่งมีหัวใจสำคัญอยู่ที่ SAR (Successive-approximation register) เช่น MC14549



รูปที่ 10 – 32 วงจร 8-bit Successive-Approximation A/D Converter

สำหรับฟังก์ชันการทำงานคือในสัญญาณนาฬิกาพัลส์แรกของวงรอบการแปลงข้อมูล SAR จะส่งเอาต์พุตบิต MSB เป็น High ไปยัง MC1408 A/D Converter จากนั้นเอาต์พุตของ Converter จะถูกขยายแล้วส่งกลับไปยังขาอินเวิร์ทติ่งอินพุตของ Comparator ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้มีค่าสูงกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิง เอาต์พุตจะเป็น Low ซึ่งทำให้ SAR หยุดส่งเอาต์พุตบิต MSB เป็น High เนื่องจากค่าที่ได้จะสูงเกินไป แต่ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้มีค่าต่ำกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิง เอาต์พุตจะยังคงเป็น High ซึ่งทำให้ SAR ก็ส่งเอาต์พุตบิต MSB เป็น High ต่อไป และเมื่อมีสัญญาณนาฬิกาพัลส์ที่สองเข้ามา SAR ก็จะส่งบิตที่มีความสำคัญถัดมาเป็น High ออกไปยัง MC1408 A/D Converter และใช้หลักการเดิมในการเปรียบเทียบสัญญาณที่ Comparator เพื่อควบคุมให้ SAR ส่งเอาต์พุตบิตนี้เป็น High หรือ Low การทำงานจะเป็นไปในลักษณะนี้จนกระทั่งถึงบิต LSB ซึ่งจะใช้สัญญาณนาฬิกาทั้งสิ้น 9 clock pulse จากนั้น SAR จะส่งสัญญาณ EOC (End-of-conversion) ออกมา เพื่อควบคุมให้ Latch 74LS374 ส่งเอาต์พุตทั้ง 8 บิตออกมา

National ADC1280 เป็น Single-chip 12-bit Successive Approximation Converter ที่ใช้เวลาในการแปลงข้อมูลนาฬิกาให้เป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 12 บิตได้ในเวลาประมาณ 22 μ s นอกจากนั้นยังมี Converter อีกหลายชนิดที่มี Multiplexer อยู่ที่อินพุต อาทิเช่น National ADC ซึ่งมี Multiplexer ขนาด 16 บิตอยู่ด้านหน้า A/D Converter เพื่อช่วยให้ Converter สามารถทำการแปลงข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ได้ถึง 16 สัญญาณ โดยมาก Converter ชนิดนี้มักจะมีชื่อเรียกว่า DAS (Data Acquisition System)

10.4.2.4 A/D Output Code

เนื่องจาก A/D Converter มีอยู่หลายประเภท ซึ่งผลิตสัญญาณเอาต์พุตในหลายรูปแบบ ดังนั้นก่อนที่จะอธิบายถึงการเชื่อมต่อ A/D Converter จะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับรหัสโดยทั่วไปของเอาต์พุตที่ได้จาก A/D Converter เสียก่อน วิธีที่ดีที่สุดคือให้พิจารณาเอาต์พุตแบบต่างๆ ในรูปของค่าที่แปลงได้ รูปที่ 10 – 33 เป็นตารางแสดงค่าสำหรับ 8-bit A/D Converter

UNIPOLAR BINARY CODES

VALUE	10 VOLTS FULL SCALE	BINARY (BIN)	COMPLEMENTARY BINARY (CB)	INVERTED BINARY (IB)	INVERTED COMPLEMENTARY BINARY (ICB)
+FS –1 LSB	9.9609	1111 1111	0000 0000		
+½ FS	5.0000	1000 0000	0111 1111		
+½FS –1 LSB	4.9609	0111 1111	1000 0000		
+1 LSB	0.0391	0000 0001	1111 1110		
ZERO	0.0000	0000 0000	1111 1111	0000 0000	1111 1111
–1 LSB	–0.0391			0000 0001	1111 1110
–½ FS + 1 LSB	–4.9609			0111 1111	1000 0000
–½ FS	–5.0000			1000 0000	0111 1111
– FS + 1 LSB	–9.9609			1111 1111	0000 0000

UNIPOLAR BINARY CODED DECIMAL CODES

VALUE	10 VOLTS FULL SCALE	BINARY CODED DECIMAL (BCD)	COMPLEMENTARY BINARY CODED DECIMAL (CBCD)	INVERTED BINARY CODED DECIMAL (IBCD)	INVERTED COMPLEMENTARY BINARY CODED DECIMAL (ICBCD)
+ FS –1 LSB	9.9	1001 1001	0110 0110		
+½ FS	5.0	0101 0000	1010 1111		
+1 LSB	0.1	0000 0001	1111 1110		
ZERO	0.0	0000 0000	1111 1111	0000 0000	1111 1111
–1 LSB	–0.1			0000 0001	1111 1110
–½ FS	–5.0			0101 0000	1010 1111
–FS +1 LSB	–9.9			1001 1001	0110 0110

BIPOLAR BINARY CODES

VALUE	10 VOLTS FULL SCALE RANGE	OFFSET BINARY (OB)	COMPLEMENTARY OFFSET BINARY (COB)	TWO'S COMPLEMENT (TC)
+FS	5.0000			
+FS –1 LSB	4.9609	1111 1111	0000 0000	0111 1111
+1 LSB	0.0391	1000 0001	0111 1110	0000 0001
ZERO	0.0000	1000 0000	0111 1111	0000 0000
–1 LSB	–0.0391	0111 1111	1000 0000	1111 1111
–FS +1 LSB	–4.9609	0000 0001	1111 1110	1000 0001
–FS	–5.0000	0000 0000	1111 1111	1000 0000

รูปที่ 10 – 33 Common A/D Output Code

สำหรับ A/D Converter ที่มีอินพุตเฉพาะค่าบวก (Unipolar) จะใช้รหัสเลขฐานสองตามปกติ แต่ถ้าต้องการใช้เอาต์พุตของ A/D Converter ในการขับ Display เพื่อแสดงค่าตัวเลข มักจะนิยมใช้รหัสของเอาต์พุตเป็น BCD สำหรับการประยุกต์ใช้ A/D Converter ที่อินพุตมีทั้งค่าบวกและลบ (Bipolar) จะนิยมใช้รหัส offset-binary code ซึ่งใช้ค่า 2's complement ในการแสดงค่าลบ

10.4.3 การเชื่อมต่อ A/D Converter ต่างๆ เข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์

10.4.3.1 การเชื่อมต่อ Parallel-Comparator A/D Converter

ในการประยุกต์ใช้งานที่จำเป็นต้องใช้ A/D Converter ประเภท Parallel-Comparator ซึ่งมีความเร็วในการแปลงข้อมูลสูง ซึ่งดูเหมือนว่าจะเร็วกว่าที่ไม่โครโปรเซสเซอร์จะอ่านข้อมูลเหล่านั้นได้ทัน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรอีกวงจรมุ่งหน้าเพื่อทำหน้าที่ในการนำข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จาก Converter เข้าไปเก็บไว้ในหน่วยความจำโดยตรง เพื่อให้ไมโครโปรเซสเซอร์สามารถเข้าไปอ่านข้อมูลเหล่านั้นเข้ามาเป็นลำดับได้ การนำข้อมูลเข้าไปเก็บโดยตรงโดยไม่ผ่านไมโครโปรเซสเซอร์นี้เรียกว่า “Direct Memory Access (DMA)” หลักการทำงานของ DMA คือใช้ IC ควบคุมภายนอกบอกให้ไมโครโปรเซสเซอร์ปล่อยให้บัสข้อมูลว่างเพื่อให้ DMA เข้าไปควบคุมการใช้งานบัสข้อมูล โดยใช้ในการส่งข้อมูลจาก A/D Converter เข้าไปยังหน่วยความจำโดยตรง

10.4.3.2 การเชื่อมต่อ Slope-Type A/D Converter

โดยมาก A/D Converter ประเภท Slope-Type มักจะนิยมใช้ในวงจรขับ 7-segment display เช่นใน Digital Volt Meter, Frequency Counter หรือเครื่องมือวัดต่างๆ ดังนั้นข้อมูลเอาต์พุตจึงมักเป็นรหัส BCD การอ่านข้อมูลจาก Converter ประเภทนี้จึงต้องทำการอ่านข้อมูลแต่ละบิตตามสัญญาณนาฬิกาของ Converter โดยใช้หลักการของการส่งสัญญาณ Strobe เป็น High เพื่อบอกให้ไมโครโปรเซสเซอร์ทราบว่าในขณะนั้นข้อมูลในหลักใดพร้อมที่จะให้ไมโครโปรเซสเซอร์ทำการอ่าน และข้อมูลแต่ละหลักก็จะถูกอ่านเข้ามาเก็บไว้ในหน่วยความจำจนกระทั่งครบวงจร

10.4.3.3 การเชื่อมต่อ Successive-Approximation A/D Converter

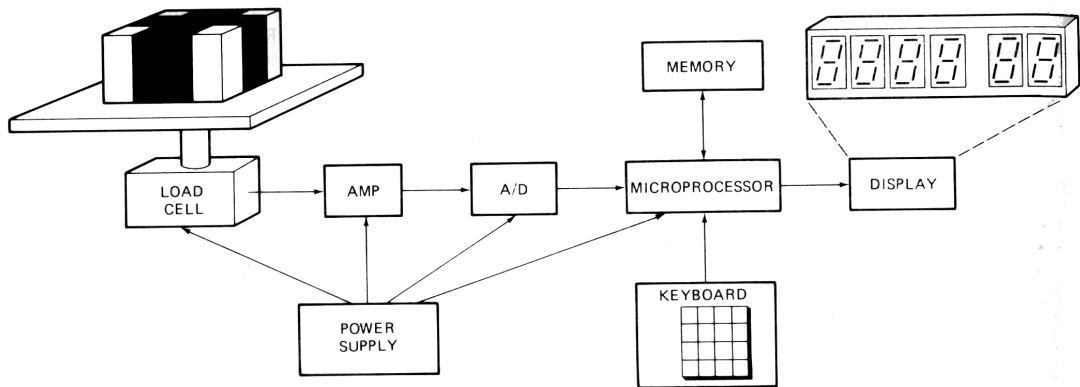
โดยมาก A/D Converter ประเภท Successive-Approximation จะสร้างข้อมูลแต่ละบิตเป็นรหัสเลขฐานสองตามปกติ หรือใช้ค่า offset ของเลขฐานสอง ดังนั้นจึงสามารถเชื่อมต่อเอาต์พุตแบบขนานเข้ากับอินพุตพอร์ตของไมโครโปรเซสเซอร์ได้โดยตรง และอ่านข้อมูลนี้เข้ามาใช้งานภายใต้การทำงานของโปรแกรมควบคุม นอกจากนี้ยังมีสัญญาณอีก 2 สัญญาณที่จำเป็นต้องต่อเข้ากับพอร์ตของไมโครโปรเซสเซอร์ คือสัญญาณ START CONVERT ซึ่งเป็นสัญญาณที่ต่อจากเอาต์พุตของไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อส่งไปบอกให้ A/D Converter ทำการแปลงข้อมูลให้ และสัญญาณ EOC ที่ A/D Converter ส่งไปบอกให้ไมโครโปรเซสเซอร์ทราบว่าได้ทำการแปลงข้อมูลเสร็จสิ้นแล้ว และมีข้อมูลพร้อมอยู่ที่พอร์ตอินพุตของไมโครโปรเซสเซอร์

10.5 Microcomputer-based Scale

จุดเริ่มต้นของการอธิบายการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในระบบควบคุม จำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจกับการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ร่วมกับไมโครคอมพิวเตอร์ ในที่นี้จะยกตัวอย่างเครื่องมือวัดอย่างง่ายที่มีการใช้งานร่วมกับไมโครคอมพิวเตอร์นั่นคือ เครื่องชั่งน้ำหนัก

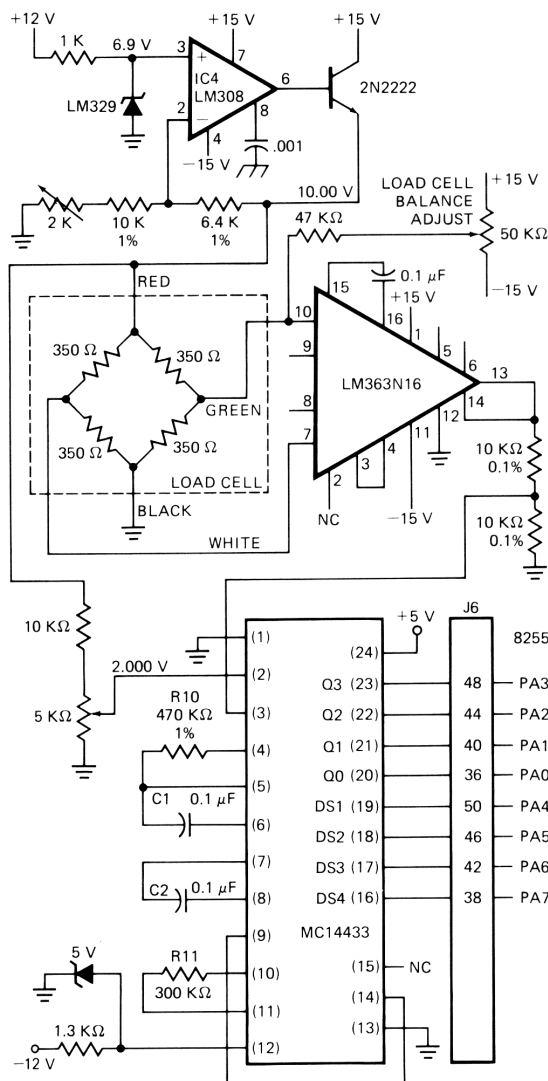
10.5.1 หลักการทำงาน

รูปที่ 10 – 34 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องชั่งน้ำหนักที่ต่อเข้ากับบอร์ด SDK-86 เพื่อนำค่าน้ำหนักที่วัดได้มาแสดงผลบนไมโครคอมพิวเตอร์



รูปที่ 10 – 34 เครื่องชั่งน้ำหนัก

รูปที่ 10 – 23 เป็น Strain-gage Load cell Transducer, Inc. Model C462-10#10P1 ที่ใช้ในเครื่องชั่งน้ำหนักนี้ โหลดเซลตัวนี้มีค่าเที่ยงตรงถึง 1 ใน 1000 หรือมีค่าผิดพลาดเพียง 0.01 ปอนด์ ในการชั่งน้ำหนักตั้งแต่ 0 – 10 ปอนด์ ตามที่ออกแบบไว้ โดยมีวงจรการทำงานดังแสดงตามรูปที่ 10 – 35



รูปที่ 10 – 35 วงจรการเชื่อมต่อ Load Cell เข้ากับ A/D Converter

จากรูปจะเห็นได้ว่า Load Cell ประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 350Ω จำนวน 4 ตัวต่อกันอยู่ในลักษณะ Bridge โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด 10V ต่อเข้าที่ด้านบนของ Bridge ในขณะที่ยังไม่มีโหลดบน Load Cell แรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุตของ Bridge จะมีค่าเท่าๆ กันประมาณ 5V เมื่อมีโหลดค่าความต้านทานของตัวต้านทานด้านล่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลง จะทำให้เอาต์พุตของ Bridge มีความแตกต่างกัน สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักที่ชั่งได้สูงสุด 10 ปอนด์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แตกต่างกันนี้จะมีค่ามากที่สุด 2 mV ต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ 1V ดังนั้นสำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักนี้จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าแตกต่างกันได้สูงสุด 20 mV

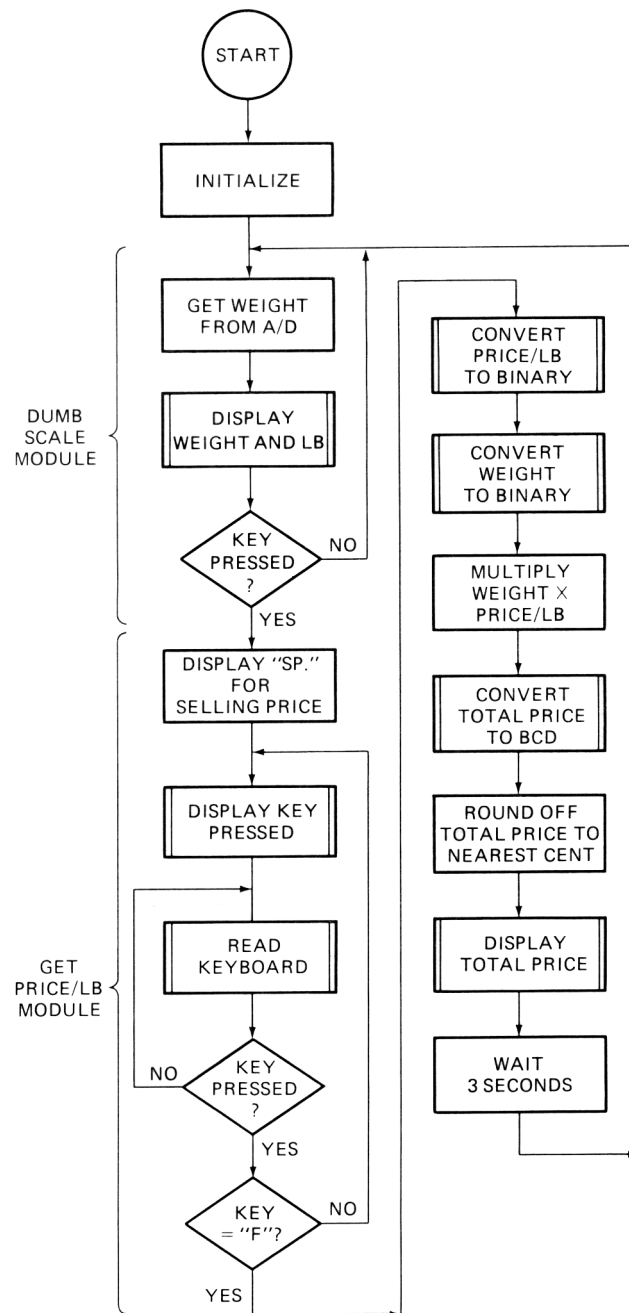
การขยายสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุตของ Bridge ที่แตกต่างกันนี้ ใช้ National LM363 Instrument Amplifier ที่มีกำลังขยาย 100 เท่า ดังนั้นเอาต์พุตสูงสุดที่จะส่งไปยัง A/D Converter จะมีค่าเท่ากับ 2V อย่างไรก็ตามวงจร Voltage Divider ซึ่งอยู่ที่เอาต์พุตของแอมพลิฟายด์ จะแบ่งสัญญาณนี้ออกครึ่งหนึ่งเพื่อให้น้ำหนัก 10 ปอนด์สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่จุดนี้ได้ 1V เพื่อทำให้เป็นมาตรฐานส่วนที่ง่ายต่อการอ่านค่าของไมโครโพรเซสเซอร์ สำหรับคาปาซิเตอร์ขนาด $0.1\mu\text{F}$ ซึ่งต่ออยู่ระหว่างขา 15 และ 16 ของแอมพลิฟายด์จะทำหน้าที่ลดแบนด์วิธของแอมพลิฟายด์ลงเหลือ 7.5 Hz. เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากกระแสไฟฟ้า 60 Hz เหนี่ยวนำเข้ามาในวงจร ส่วน A/D Converter ที่ใช้ในที่นี้คือ MC14433 ซึ่งเป็น A/D Converter ประเภท Dual-Slope ที่แสดงผลเป็นเลข BCD และการที่ความแตกต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ Load Cell จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ A/D Converter ที่มีราคาแพงและความเร็วสูง อัตราการแปลงข้อมูลจะถูกกำหนดโดย Oscillator ภายในและตัวต้านทาน R11 ถ้า R11 มีค่าความต้านทาน $300\text{k}\Omega$ จะสร้างสัญญาณนาฬิกาความถี่ 66 KHz และความถี่ในการ Multiplex 0.8 KHz ความเที่ยงตรงของ A/D Converter นี้คือ $\pm 0.5\%$ ซึ่งใกล้เคียงกับความเที่ยงตรงของ Load Cell

10.5.2 อัลกอริทึม

รูปที่ 10 – 36 เป็น Flow Chart แสดงการทำงานของเครื่องชั่งน้ำหนัก ให้สังเกตว่าส่วนสำคัญของโปรแกรมที่จะถูกเขียนเป็นโปรแกรมจะแสดงด้วยรูปกล่องที่มีเส้น 2 เส้นด้านข้าง โดยมีการทำงานคือ เอาต์พุตของ A/D Converter ที่อยู่ในรูปแบบของ BCD เพื่อแสดงผลเป็นตัวเลขที่หลัก Q0 – Q3 โดยจะส่งเอาต์พุตสัญญาณ STROBE สำหรับข้อมูลของแต่ละหลักโดยเฉพาะคือ DS1 – DS4 การอ่านข้อมูลในหลักนั้นๆ จะต้องรอให้สัญญาณ STROBE เป็น High และเมื่อครบทั้ง 4 หลัก ไมโครโพรเซสเซอร์จะนำข้อมูลเหล่านั้นไปแสดงผลบน Display โดยมีตัวอักษร “Lb” แสดงรวมอยู่ในฟิลด์ข้อมูล เพื่อแสดงให้ทราบว่าแสดงผลน้ำหนักในหน่วยเป็นปอนด์

ในการทำงานของโปรแกรมจะต้องมีการตรวจสอบเพื่อดูว่ามีคีย์ใดถูกกดโดยผู้ใช้หรือไม่ ถ้าคีย์ถูกกด จะเกิดการอินเตอร์รัพท์ 8086 ให้นำข้อมูลจากคีย์บอร์ดไปแสดงผลก่อน เช่นถ้าคีย์ “SP” ซึ่งหมายถึง Sell Price ถูกกด ข้อมูลนี้จะถูกนำไปแสดงในฟิลด์เอเดเรส เพื่อนำไปอ่านรหัสของแต่ละคีย์จาก 8279 และทำการป้อนราคาขายต่อหน่วยน้ำหนักสำหรับสินค้านั้นๆ ลงไป ในการคำนวณจึงเป็นการคูณน้ำหนักของสินค้าซึ่งอยู่ในรูปแบบ BCD เข้ากับราคาของสินค้าต่อหน่วยน้ำหนักในรูปแบบของ BCD โดยการแปลงให้อยู่ในรูปแบบของเลขฐานสองก่อนทำการคูณ จากนั้นจึงทำการแปลงผลลัพธ์ที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบ BCD เพื่อที่จะนำไปแสดงผลให้ทราบราคาขาย โดยการแสดง

ตัวอักษร “Pr” ในฟิลด์ข้อมูล เพื่อให้ทราบว่าตัวเลขที่แสดงให้เห็นเป็นราคาขายสินค้า หลังจากนั้นโปรแกรมจะกลับไปแสดงค่าน้ำหนักของสินค้าที่วางอยู่บน Load Cell ต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเกิดการกดคีย์เพื่อใส่ราคาสินค้าต่อหน่วย



รูปที่ 10 – 36 Flow Chart แสดงการทำงานของโปรแกรมเครื่องชั่งน้ำหนัก

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. วงจร Comparator ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 2 ได้รับความจ่ายไฟเลี้ยง $\pm 15V$ ถ้าอินเวิร์ทติ้งอินพุตถูกต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า $+5V$ และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า $+5.3V$ จ่ายเข้ามาที่นอนอินเวิร์ทติ้งอินพุต อยากราบว่าจะต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าใดจึงจะทำให้วงจร Comparator นี้ส่งเอาต์พุตออกมา
2. วงจรแอมพลิฟายด์ดังแสดงในรูปที่ 10 – 4 มีความต้านทาน $R_1 = 10k\Omega$ และ $R_2 = 190k\Omega$ จงคำนวณกำลังขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบ Closed-loop และหาค่า V_{OUT} ที่ทำให้ $V_{IN} = 0.030V$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จะวัดได้ที่ขาอินเวิร์ทติ้งอินพุตมีค่าเท่าใด และกำลังขยายจะเป็นอย่างไรถ้า $R_2 = 0\Omega$
3. วงจรแอมพลิฟายด์ดังแสดงในรูปที่ 10 – 5 ถูกสร้างโดยใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = 15k\Omega$ และ $R_f = 75k\Omega$ จงคำนวณหากำลังขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบ Closed-loop หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุต $0.73V$ และอยากราบว่าจะวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขาอินเวิร์ทติ้งอินพุตของวงจรนี้ได้เท่าใด
4. Differential Amplifier ดังแสดงในรูปที่ 10 – 8 ถูกสร้างโดยใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = R_2 = 100k\Omega$ และ $R_f = R = 1M\Omega$ ถ้า $V_1 = 4.9V$ และ $V_2 = 5.1V$ จงคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุตและ polarity
5. จงอธิบายถึงข้อดีในการใช้ Instrumentation Amplifier เมื่อเปรียบเทียบกับ Differential Amplifier
6. จงวาดวงจรแสดงการเชื่อมต่อ Light-dependent Resistor เข้ากับ Comparator เพื่อให้เอาต์พุตของวงจร Comparator เปลี่ยนสถานะเมื่อความต้านทานของ LDR มีค่าเท่ากับ $10k\Omega$
7. คุณสามารถที่จะวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขาอินพุตอินเวิร์ทติ้งของวงจร Photodiode Amplifier ดังแสดงตามรูปที่ 10 – 17 ได้หรือไม่ เพราะเหตุใดจึงจำเป็นต้องใช้ FET เป็นอินพุตให้กับแอมพลิฟายด์ในวงจรนี้
8. ในการประยุกต์ใช้งานอะไรที่ต้องใช้ Temperature-dependent Current เช่น AD590 แทนที่จะใช้ Temperature-dependent Voltage เช่น LM35
9. เพราะเหตุใด Thermocouple จึงเป็น cold-junction compensate เพื่อให้สามารถวัดค่าได้อย่างเที่ยงตรง
10. เพราะเหตุใด Strain gage จึงถูกต่อเข้าด้วยกันในลักษณะ Bridge และเพราะเหตุใดจึงเลือกใช้ Differential Amplifier ในการขยายสัญญาณเอาต์พุตจาก Strain gage Bridge
11. จงคำนวณเอาต์พุตเต็มขั้นของ D/A Converter ในรูปที่ 10 – 27
12. อยากราบว่า 13-bit D/A Converter มีความละเอียด (Resolution) เท่าใด
13. เพราะเหตุใด 12-bit D/A Converter จึงต้องมี Latch ที่อินพุต ถ้านำไปต่อเข้ากับพอร์ตขนาด 8 บิต หรือต่อเข้ากับบัลล์ข้อมูลขนาด 8 บิต
14. อยากราบว่าตัวนับของวงจรในรูปที่ 10 – 31 จะแสดงตัวเลขเท่าใด ถ้าอินพุตของ A/D Converter ประเภท Dual-slope มีค่าเท่ากับ $2.372V$ และหาค่าความละเอียดของ $41/2$ digit-Slope-type A/D Converter
15. อยากราบว่าจะต้องใช้สัญญาณนาฬิกาที่วงรอบในการทำให้ 12-bit Successive Approximation A/D Converter ทำการแปลงสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุต $0.1V$ และ $5V$