บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

3.1 เครื่องวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

โดยทั่วไปเครื่องวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ขั้ววัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจจากผิวหนัง และวงจรวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจ ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 ขั้ววัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจจากผิวหนัง

โดยทั่วไปขั้ววัดไฟฟ้า (Electrode) ที่ใช้ในการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากผิวหนังจะต้องประกอบไปด้วยแผ่นโลหะนำไฟฟ้าและสารอิเล็กโตรไลท์ที่ใช้ในการเชื่อมทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะกับผิวหนัง ตัวอย่างของโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้ทำขั้ววัดไฟฟ้า ได้แก่ แผ่นทองเหลืองชุบนิกเกิล (Nickel-Plated Brass) เป็นต้น ยังให้ประสิทธิภาพในการวัดได้ไม่ดีนัก เนื่องจากขั้ววัดไฟฟ้าสองขั้วที่ใช้ในการวัด ประกอบกับสารอิเล็กโตรไลท์ที่ใช้ในการเชื่อมทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะกับผิวหนังและสารละลายของเกลือภายในลำตัวจะปฏิบัติตัวร่วมกันเสมือนแบตเตอรี่ ทำให้เกิดแรงดันไฟตรง (DC Voltage) ปนมากับสัญญาณไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้ ลักษณะนี้เรียกว่าขั้ววัดไฟฟ้าแบบมีขั้ว (Polarizable Electrode) แรงดันไฟตรงที่ปนมากับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจนี้เมื่อผ่านการขยายสัญญาณจากวงจรขยายอาจจะทำให้เกิดการอิ่มตัว (Saturation) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาในการวัดเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในร่างกายเกิดจากการไหลของไอออน แต่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวนำทางไฟฟ้าเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอน ดังนั้นขั้ววัดไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจจากผิวหนังจะต้องทำหน้าที่ในการแปลงกระแสของไอออนไปเป็นกระแสของอิเล็กตรอนนั้นเอง ปัจจุบันวัสดุที่นิยมใช้ทำขั้ววัดไฟฟ้าก็คือซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl) ซึ่งเป็นการนำชั้นของซิลเวอร์คลอไรด์มาติดอยู่กับแผ่นโลหะซิลเวอร์หรือเงินซึ่งใช้เป็นขั้วต่อกับสายไฟ ประกอบกับสารอิเล็กโตรไลท์ที่ใช้ในการเชื่อมทางไฟฟ้าระหว่างขั้ววัดไฟฟ้ากับผิวหนังประกอบด้วยไอออนของคลอไรด์ ไอออนของคลอไรด์จะเคลื่อนที่ภายในร่างกายสารอิเล็กโตรไลท์ของชั้นซิลเวอร์คลอไรด์ และ จะถูกแปลงเป็นกระแสของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแผ่นโลหะซิลเวอร์ผ่านเข้าสายไฟต่อไป ลักษณะนี้สามารถประมาณได้ว่าเป็นขั้ววัดไฟฟ้าแบบ ไม่มีขั้ว (Nonpolarizable Electrode) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตรงเนื่องจากการสัมผัสระหว่างขั้ววัดไฟฟ้ากับผิวหนังที่มีขนาดเล็กกว่าขั้ววัดไฟฟ้าแบบโพลาไรซ์มาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจสูง

3.1.2 วงจรวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจ[11]

ลักษณะและคุณสมบัติที่สำคัญของวงจรวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ดีมีประสิทธิภาพควรมีดังต่อไปนี้

- **มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก**

เนื่องจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจโดยใช้ขั้ววัดไฟฟ้าจะทำให้เกิดความต้านทานขึ้นบริเวณรอยสัมผัสระหว่างขั้ววัดไฟฟ้าและผิวหนัง ค่าความต้านทานนี้จะมีค่าสูงมาก ดังนั้นวงจรขยายจึงต้องมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงกว่าค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างรอยสัมผัสระหว่างขั้ววัดไฟฟ้าและผิวหนังให้มากที่สุด เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้มีการสูญเสียที่รอยสัมผัสให้น้อยที่สุด

- **มีค่า Common Mode Rejection Radio (CMRR) สูง**

เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้จากขั้ววัดไฟฟ้าที่ติดอยู่บนผิวหนังโดยทั่วไปมีประมาณเพียง 1mV [10] ดังนั้นสัญญาณอื่นๆที่ไม่พึงปราถนาจึงอาจเข้ามารบกวนได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz จากไฟฟ้าตามบ้าน ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบมอนิเตอร์ (0.05-100Hz) สำหรับการวินิจฉัยแบบมาตรฐาน[10] อาจแทรกเข้ามาได้ทั้งทางร่างกาย ทางขั้ววัดหรือสายวัดสัญญาณ เป็นต้น ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเลือกใช้วงจรขยายความแตกต่างที่มีค่า Common Mode Rejection Radio (CMRR) ที่สูง และทำการวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจในลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลโหมด (Differential Mode) ซึ่งเป็นการขยายสัญญาณเฉพาะส่วนที่เป็นความแตกต่างเท่านั้น ส่วนสัญญาณรบกวนและสัญญาณความถี่ 50 Hz ที่เหมือนกันของแต่ละอินพุทจะหักล้างกันในลักษณะของคอมมอนโหมด(Common Mode) เนื่องจากค่า CMRR ก็คืออัตราส่วนระหว่างค่าDifferential Mode Gain และค่า Common mode Gain โดยมาตราฐานเครื่องมือควรมีค่า CMRR>80 dB และการออกแบบวงจรขยายความแตกต่างเบื้องต้นจะกำหนดให้ค่า Differential Mode Gain มีค่าตามต้องการ ดังนั้นการออกแบบวงจรขยายความแตกต่างให้มีค่า CMRR สูงที่สุดสามารถทำได้โดยการปรับแต่งวงจรให้ค่า Common Mode Gain ของวงจรมีค่าต่ำที่สุด(เท่ากับ 0 ในอุดมคติ)

ในความเป็นจริงทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่ 50 Hz ออกไปได้หมด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของขนาดและเฟสของสัญญาณความถี่ 50 Hz ที่เกิดขึ้นในแต่ละอินพุท ทำให้สัญญาณไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้ยังคงมีสัญญาณความถี่ 50 Hz หลงเหลืออยู่ดังนั้นภายในวงจรสัญญาณไฟฟ้าหัวใจจึงควรมีวงจรกรองความถี่ 50 Hz ไว้ป้องกันเสมอ

- **ป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้ารั่วไหล**

เนื่องจากกาวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจจะต้องใช้ขั้ววัดไฟฟ้าสัมผัสโดยตรงกับผู้ป่วยซึ่งถ้าหากเครื่องมือวัดมีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลออกมาในปริมาณที่มากพอ ก็อาจทำให้ผู้ป่วยได้รับอันตรายได้นอกจากนี้ยังอาจทำให้สัญญาณไฟฟ้าหัวใจวัดได้ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงดังนั้นวงจรขยายที่

ออกแบบมาจึงควรมีส่วนที่ทำหน้าที่ให้การแยกสายดินของเครื่องมือวัดออกจากส่วนของวงจรขยายสัญญาณภาคแรก

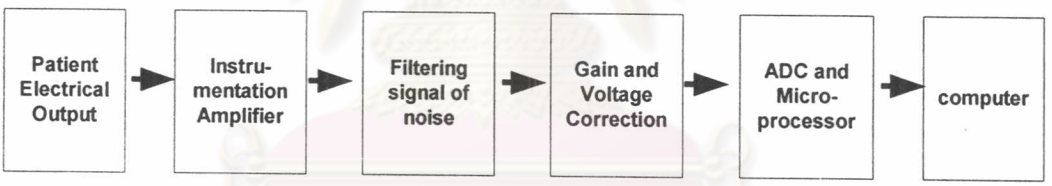
- **ตอบสนองความถี่ช่วงผ่านได้ดี**

เนื่องจากสัญญาณฟ้าหัวใจมีความถี่ต่ำถึง 0.05 Hz และไม่เกิน 100 Hz ดังนั้นวงจรขยายจะต้องตอบสนองช่วงความถี่ผ่านได้ดี และกำจัดสัญญาณไฟ 50 Hz ให้เหลือน้อยที่สุด

จากลักษณะและคุณสมบัติที่สำคัญนำมาออกแบบเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจดังนี้

1. มีสัญญาณขาเข้า (Input signal peak to peak) 10 μV ถึง 5 mV
2. มีความต้านทานเข้าอย่างต่ำ(Differential input impedance) 10 $M\Omega$
3. ต้องการ CMRR (Common Mode Rejection Radio) อย่างต่ำ 80 dB (10000:1)
4. วงจรกรองความถี่ผ่านช่วงความถี่ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบมอนิเตอร์ 0.05-100Hz
5. ขนาดสัญญาณรบกวนไม่เกิน 2 $\mu V(rms)$
6. วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล 12 บิต
7. ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 #AT89S53

3.2 บล็อคไดอะแกรมของเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ



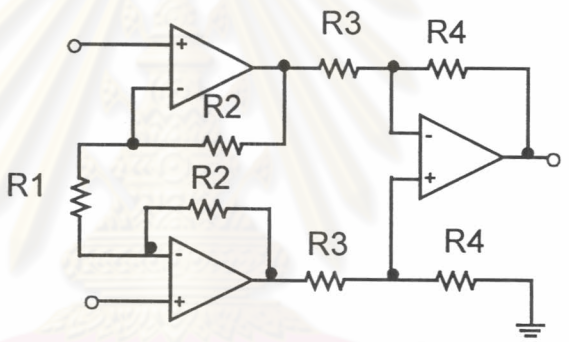
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

1. Patient Electrical output คือสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ได้จากเซนเซอร์หรือโพรบที่ติดบนผิวหนังบริเวณหน้าอกตามหลักวิธีการวัดของเครื่องECG
2. Instrumentation Amplifier คือส่วนที่ทำหน้าที่ขยายความต่างศักดิ์ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ
3. Filtering signal of noise คือส่วนที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณส่วนที่ไม่ต้องการออก
4. Gain and voltage correction คือส่วนที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีขนาดเหมาะสม
5. ADC and Microprocessor คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิตอลและส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์
6. Computer คือส่วนที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์และประมวลผลพร้อมทั้งแสดงผล

3.3 ส่วนประกอบของวงจรเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

3.3.1 วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier)

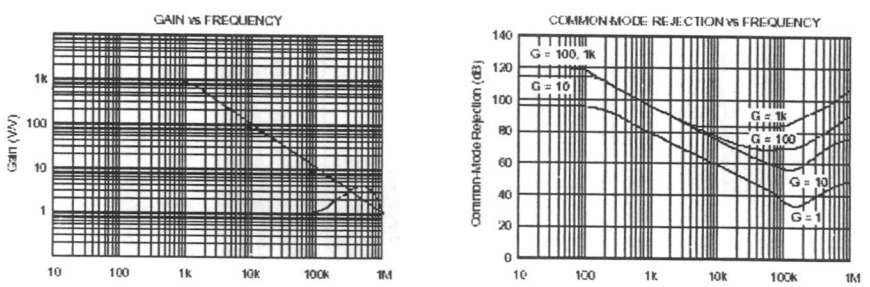
การใช้วงจรขยายทั่วไปในการตรวจจับสัญญาณขนาดเล็กจะเกิดปัญหาของสัญญาณรบกวน เนื่องจากแรงดันของสัญญาณรบกวนจะเสมือนต่ออนุกรมกับสัญญาณเข้า (จากตัวคนไข้) ทำให้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ เมื่อขนาดแรงดันสัญญาณรบกวนมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าสัญญาณเข้าเราจะไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณที่ถูกต้องได้ วิธีการแก้ปัญหาคือการต่อวงจรแบบดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งจะทำให้สัญญาณรบกวนที่เป็นสัญญาณคอมมอนโหมด ไม่ถูกนำมาขยายเฉพาะแรงดันที่วัดได้เท่านั้นที่ถูกขย เย การต่อนี้จะนำมาใช้ในการตรวจวัด หรือนำมาใช้ขยายสัญญาณขนาดเล็กก็ได้ โดยสัญญาณขนาดเล็กนี้อาจจะมีขนาดน้อยกว่า 10มิลลิโวลต์ลงไป รูปแสดงการต่อวงจรขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียลแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แสดงกราฟคุณสมบัติของตัวไอซีInstrumentation Amplifier



รูปที่3.2 วงจรขยายผลต่าง

$$A_d = -\frac{R_4}{R_3}(1+\frac{2R_2}{R_1}) \qquad (3.1)$$

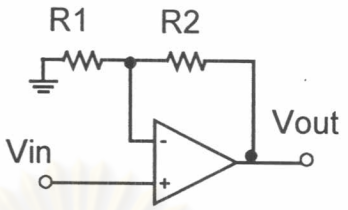
ในโครงงานเลือกใช้ไอซีเบอร์ INA114 ที่อัตราขยาย 3 –5 เท่า ในช่วงความถี่ 0.05-100 Hz ซึ่งมีค่า CMRR อยู่ในช่วง 95-115 dB



รูปที่3.3 กราฟคุณสมบัติของไอซี INA 114 ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราขยาย กับความถี่ ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง Common Mode Rejection กับความถี่

3.3.2 วงจรขยายไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส เป็นวงจรที่ให้สัญญาณเอาต์พุตมีเครื่องหมายเหมือนกับแรงดันด้านอินพุตรูปที่ 3.4 แสดงการต่อวงจรขยายไม่กลับเฟส และอัตราขยายของวงจรมีค่าดังสมการที่ (3.2)

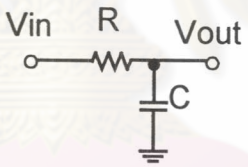


รูปที่ 3.4 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

$$A = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \tag{3.2}$$

3.3.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) อันดับ 1

วงจรกรองความถี่ต่ำจะกันไม่ให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟ f_c ผ่านออกไปได้ รูปที่ 3.5 แสดงการต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ และความถี่ตัด (cut off frequency) ของวงจรมีค่าดังสมการที่ (3.3)

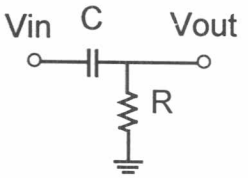


รูปที่ 3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำ

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \tag{3.3}$$

3.3.4 วงจรกรองความถี่สูง

วงจรกรองความถี่สูงจะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟ f_c ผ่านออกไปได้ และกันไม่ให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คัทออฟ f_c ผ่านออกไปได้ รูปที่ 3.6 แสดงการต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ และความถี่ตัด (cut off frequency) ของวงจรมีค่าดังสมการที่ (3.4)

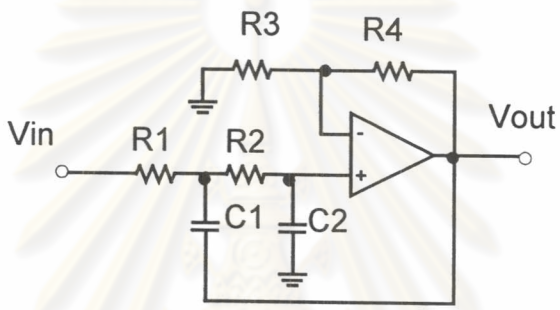


รูปที่ 3.6 วงจรกรองความถี่สูง

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \tag{3.4}$$

3.3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth low pass filter) อันดับ 2

วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ อันดับ 2 เป็นวงจรที่ใช้กันความถี่สูงกว่าความถี่ที่ต้องการเหมือนกรณีของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 แต่จะมีผลดีในเรื่องของการแยกความถี่ที่ไม่ต้องการออกได้อย่างถูกต้องและชัดเจนมากยิ่งขึ้น รูปที่ 3.7 แสดงการต่อวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ อันดับ 2 และความถี่คัตออฟของวงจรมีค่าดังสมการที่ (3.5)

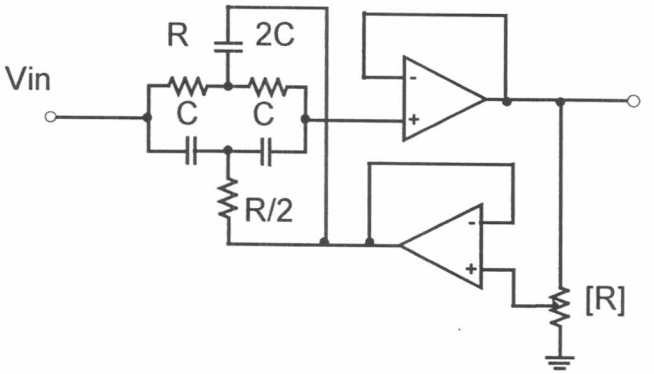


รูปที่ 3.7 วงจรกรองความถี่ต่ำ แบบ บัตเตอร์เวิร์ธ

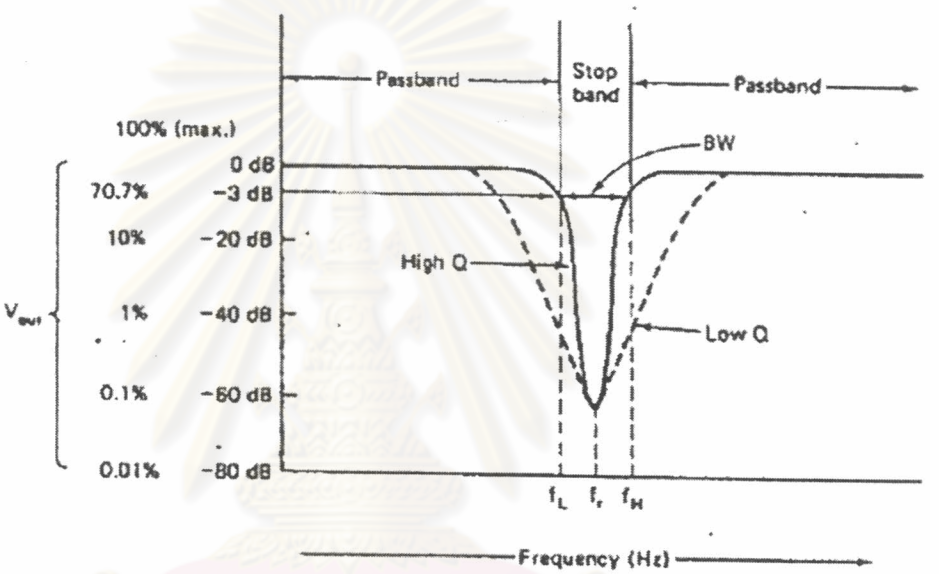
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_4C_1C_2}} \tag{3.5}$$

3.3.6 วงจรนอท์ชฟิวเตอร์ (Notch filter)

วงจรนี้จะยอมให้ความถี่ทุกๆค่าผ่านยกเว้นความถี่ช่วงหนึ่งซึ่งได้กำหนดเอาไว้ เนื่องจากสายไฟต่างๆที่ใช้ในวงจรขยายสัญญาณเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่ของไฟฟ้า 50 Hz เพื่อเป็นการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนเฉพาะค่าที่มีอยู่กระจัดกระจายรอบๆตัวคือที่ความถี่ 50 Hz ให้เหลือน้อยที่สุด จึงใส่วงจรกรองความถี่เฉพาะค่าคือ วงจรนอท์ชฟิวเตอร์ ดังแสดงรูปที่ 3.8 และการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรนอท์ชฟิวเตอร์อสดงดังรูปที่ 3.9 ความถี่ f_r ซึ่งเป็นความถี่หยุดแถบ (Stop band)ของวงจรมีค่าดังสมการที่ (3.6)



รูปที่ 3.8 วงจรนอท์ชฟิวเตอร์



รูปที่ 3.9 การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรนอท์ชฟิวเตอร์

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \tag{3.6}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital converter)

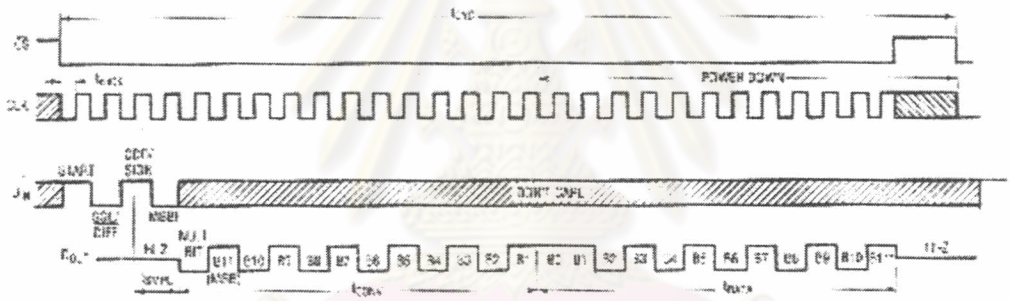
วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล จะใช้อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณไอซีเบอร์ LTC1298 เป็น ADC แบบ Serial ADC 2 Channel 12 บิต

รายละเอียดของ LTC1298

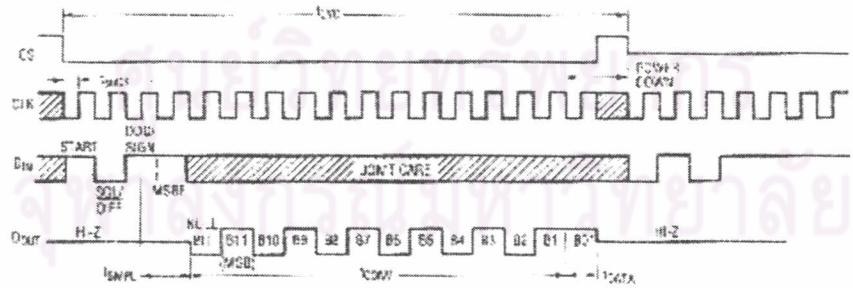
*** Data Transfer**

การสื่อสารข้อมูลระหว่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ กับ ไอซี LTC1298 จะเป็นลักษณะแบบประสานเวลา (Synchronous) ระหว่างสัญญาณนาฬิกากับข้อมูล ซึ่งเวลาการทำงานของการสื่อสารข้อมูล แสดงดังในรูปที่ 3.10

MSB-First Data (MSBF = 0)



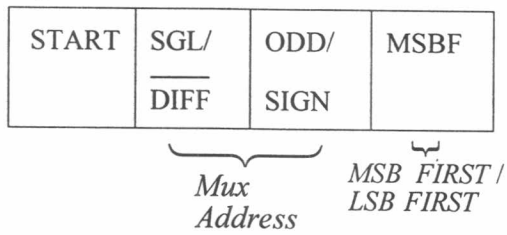
MSB-First Data (MSBF = 1)



รูปที่ 3.10 เวลาการทำงานของการสื่อสารข้อมูลของ LTC1298

* **Input Data Word**

LTC1298 จะต้องส่ง Input Data Wordเข้าที่ขา Din จำนวน 4 บิต ต่อจากบิต Start โดยมีรูปแบบของ Input Data Word ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปแบบของ Input Data Word

* **Start Bit**

คือบิตแรกที่เข้ามาใน Din หลังจากที่ขา CS มีค่า Low

* **Multiplexer (MUX) Address**

บิตที่เลื่อนเข้ามาต่อจากบิต Start จะเป็นบิตที่ใช้ในการเลือก ช่องการอ่านสัญญาณอนาลอก ซึ่งในรูปด้านล่างจะแสดงตารางเงื่อนไขของ ช่องอินพุตทั้ง 2 ช่องโดยสามารถกำหนดให้ LTC1298 ทำงานในลักษณะ Single-ended หรือ Diffential อีกทั้งสามารถที่จะกำหนดให้ แต่ละช่องใดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกกับอีกช่องหนึ่งได้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของ ช่องอินพุตทั้ง 2 ช่อง

LTC1298 Channel Selection

MUX ADDRESS		CHANNEL		
SGL/$\overline{\text{DIFF}}$	ODD/Sign	0	1	GND
1	0	+		-
1	1		+	-
0	0	+	-	
0	1	-	+	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เบอร์ AT89S8252 มีโครงสร้างภายในดังนี้

- 8K Byte of In-System Reprogrammable Downloadable Flash Memory (1,000 Write/Erase Cycles by Atmel Specification)
- Full Static Operation :0 Hz to 24 MHz
- Three-Level Program Memory Lock
- 256 Byte Internal RAM
- 32 Programmable I/O Line
- Three 16-bit Timer/Counter
- Nine Interupt Sources
- SPI Serial Interface
- Programmable Watchdog Timer
- Dual Data Pointer
- 2K Byte EEPROM(100,000 Write/Erase Cycles by Atmel Specification)
- Low Power Idel and Power Down Mode
- Interupt Recovery From Power Down
- Power Off Flag
- Programmable UART Serial Channel

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย