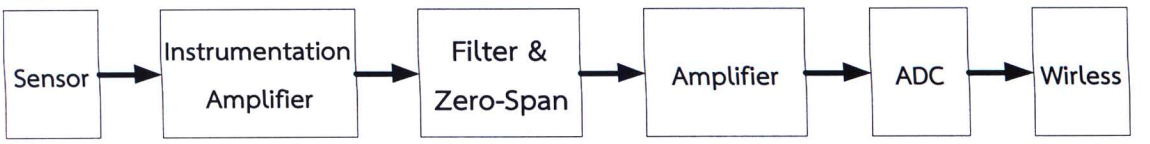
บทที่ 3

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดและบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

หลักการออกแบบระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดและบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ได้พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้ไดวงจรขยายสัญญาณคลื่นไฟฟาหัวใจ ที่มีขนาดเล็กอยูระหวาง 100 *μV ถึง 5000 μV ใหกลายเป็นระดับสัญญาณ 0 V ถึง 5V เพื่อการแสดงผลผานทางหน้าจอคอมพิวเตอร์โดยที่มี* รูปรางและความสัมพันธของระดับแรงดันกับชวงเวลาที่ถูกตอง จึงอาศัยหลักการทำงานตามบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สวนประกอบตางๆของวงจรเครื่องวัดสัญญาณคลื่นหัวใจ

3.1 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์

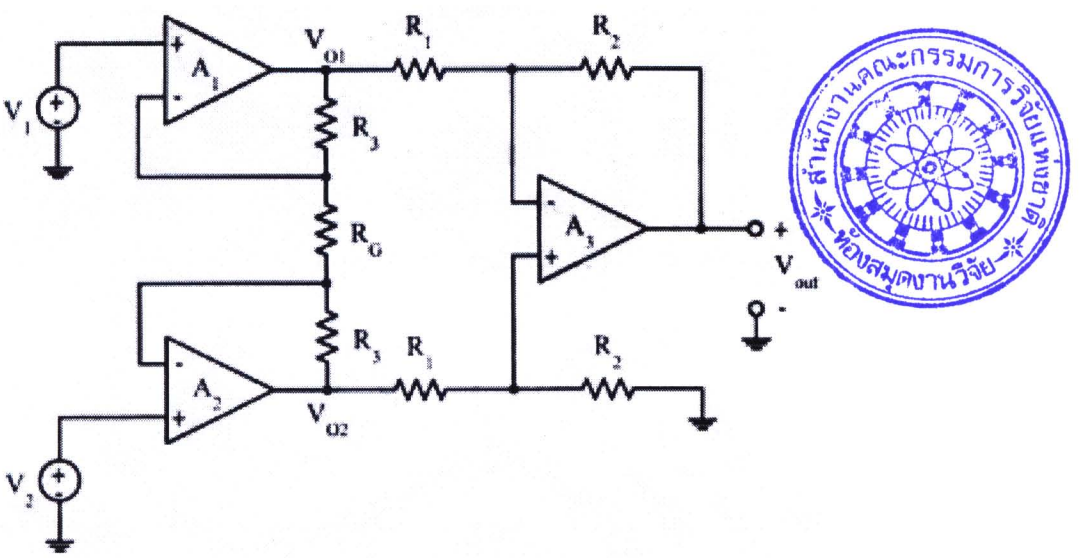
วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์ (Instrumentation Amplifier) เปนวงจรทำหนาที่ขยายสัญญาณผลต่างของสัญญาณอินพุตทั้งสองของวงจร ซึ่งพัฒนามาจากวงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier) โดยแรงดันเอาทพุทของวงจรจะมีความสัมพันธดังนี้ [10]

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \qquad (1)$$

โดยที่ A คือ อัตราขยายสัญญาณ (Gain) ของวงจร วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์ซึ่งถูกปรับปรุงขึ้นนี้มีขอดีเมื่อเทียบกับวงจรขยายผลต่าง คือ มีคาอินพุทอิมพิแดนซ อัตราขยายสัญญาณของวงจร และความสามารถในการขจัดสัญญาณรบกวน (Common Mode Rejection Ratio, CMRR) สูงมาก วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์ที่ใชในการวัดสัญญาณที่เราตองการทำการวัด Positive เทียบกับ Negative และคลื่นในที่นี้คือ คลื่นไฟฟาหัวใจ โดยวงจรนี้ราจะทำการขยายสัญญาณคลื่นไฟฟาหัวใจ วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์แบบใช้ออปแอมป์สามตัวแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยที่ออปแอมป A1 และ A2 ทำหนาที่เปนวงจรภาคอินพุทสวนหนา (First Stage หรือ

Input Stage) ขณะที่ออปแอมป A3 จะเปนวงจรเอาทพุทสวนที่สอง (Second Stage หรือ Output Stage) ของวงจร ถากำหนดให V_{O1} และ V_{O2} คือ แรงดันเอาทพุทของ A1 และ A2 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้แรงดันเอาทพุทของวงจร V_{out} มีคาเทากับ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_{02} - V_{o1}) \qquad (2)$$



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนทแบบใชออปแอมปสามตัว

และเนื่องจากคุณสมบัติของออปแอมปทำใหกระแสที่ไหลผาน R_3 และ R_G มีคาเทากัน ($I_{R3} \cong I_{RG}$) ทำให้

$$V_{o1} - V_{o2} = \frac{(2R_3 - R_G)}{R_G} \qquad (3)$$

เมื่อ $V_i = 0$ แลว กระแสที่ไหลผาน R_G มีคาเทากับ

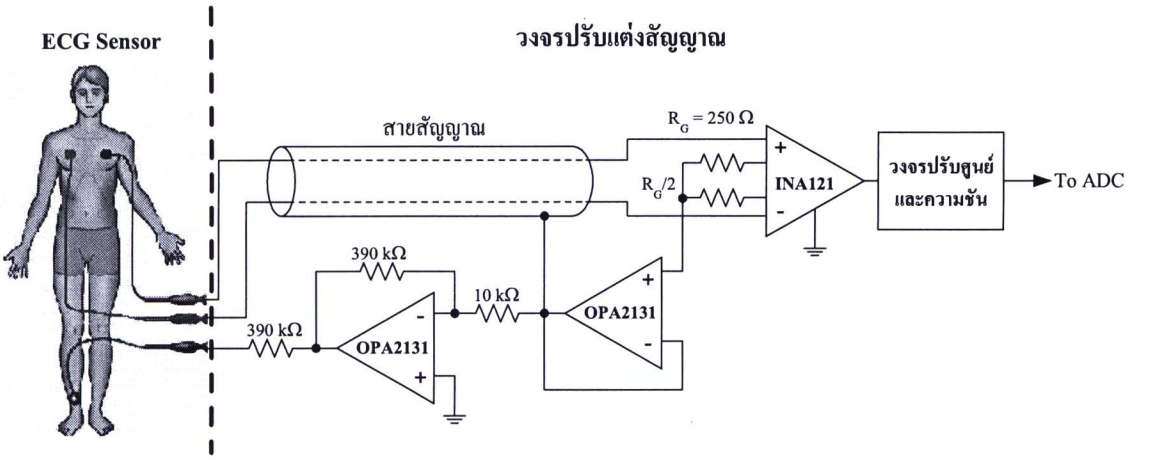
$$I_{RG} = \frac{(V_1 - V_2)}{R_G} \qquad (4)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 3 ม.ค. 2555
เลขทะเบียน 247228
เลขเรียกหนังสือ

และ $$V_{out} = (V_1 - V_2) \quad (5)$$

โดยที่ $$A = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right)\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (6)$$

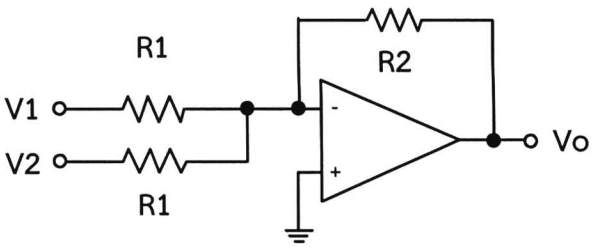
เนื่องจากแรงดันอินพุท V_1 และ V_2 ของวงจรถูกป้อนโดยตรงเข้าที่ขาอินพุทไม่กลับเฟสของออปแอมป์จึงทำให้วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์นี้มีค่าอินพุทอิมพิแดนซ์ของวงจรสูงมาก (ประมาณเท่ากับอินพุทอิมพิแดนซ์ของออปแอมป์) นอกจากนี้อัตราขยายสัญญาณ A ของวงจรสามารถปรับค่าได้อย่างสะดวกและอิสระด้วยการปรับค่าของ R_G สำหรับโครงการวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้ ไอซี Instrumentation Amplifier INA114 ของบริษัท BURR-BROWN® โดยภายในวงจรประกอบด้วย Over Voltage Protection เพื่อทำการตัดสัญญาณไฟฟ้าที่มีแรงดันมากเกินไปโดยจะตัดที่ ±40V จากนั้นจึงจะเข้ามาสู่ชวงของออปแอมป์ A1, A2 และ A3 ที่ต่อกันเป็นวงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์ โดยมีค่าความต้านทาน 25 kΩ ต่อในวงจรดังรูปที่ 3.3 เราสามารถจะเลือกค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจรได้ตามที่ต้องการโดยต่อความต้านทาน R_G ระหว่างขา 1 และ 8



รูปที่ 3.3 การนำ INA 114 มาประยุกต์ใช้งานในวงจรอีซีจี

3.2 วงจร RL Drive

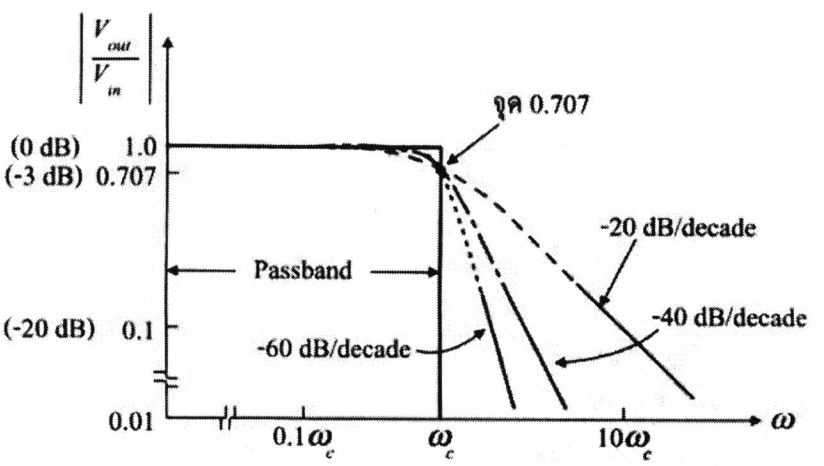
จะเปนการนำเอาสัญญาณกอนเขาสูภาคที่สองของวงจรขยายผลต่าง คือ V_{o1} และ V_{o2} เขาสู R_L เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ V_o ของในสวนของวงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนท์โดยวงจรนี้เปนวงจรในสวนของวงจรรวมสัญญาณโดยวงจรเปนดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 วงจร RL Drive (Summing Amplifier)

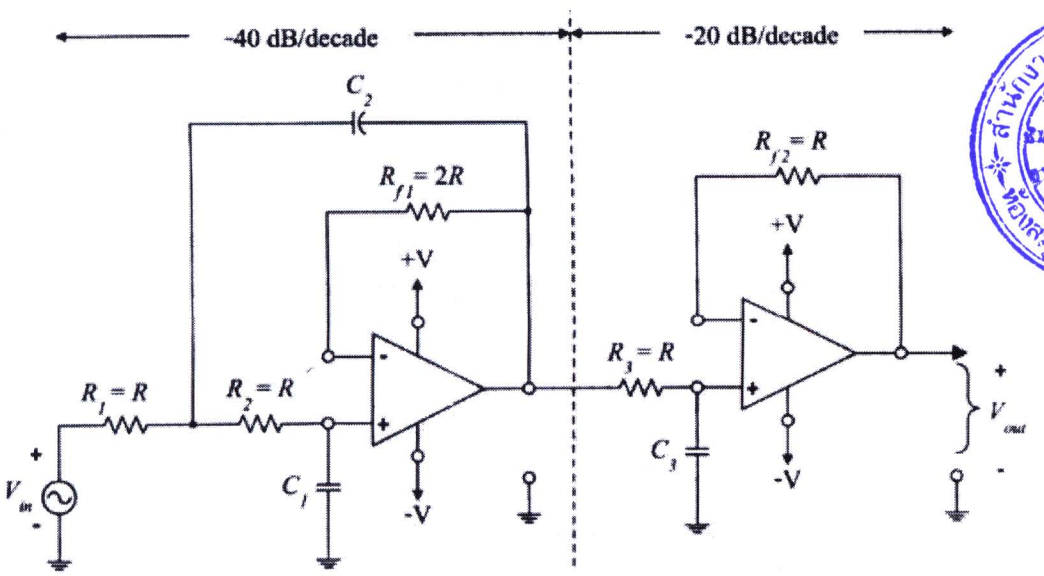
3.3 วงจรกรองผานความถี่ต่ำ

วงจรกรองผานความถี่ต่ำ (Low-pass Filter) ที่ใชในโครงการวิจัยนี้เปนแบบบัทเทอรเวอรท (Butterworth Filter) ซึ่งเปนวงจรกรองผานความถี่ชนิดหนึ่งซึ่งมีอัตราขยายสัญญาณในชวงแถบผานมีคาใกลเคียงกับหนึ่งมากที่สุด วงจรผานความถี่บัทเทอรเวอรทนี้บางครั้งเรียกวา "วงจรผานความถี่แบบราบเรียบสูงสุด (maximally flat)" ทั้งนี้เนื่องจากวงจรกรองผานประเภทนี้จะใหผลตอบสนองทางความถี่ใกลเคียงกับอุดมคติมากที่สุด เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงชวงความถี่สูง (ความชัน) มีคาสูงขึ้นดังรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผานความถี่ต่ำทั้งสามแบบ โดยที่กราฟเสนทึบ แทนถึง ผลตอบสนองในทางทฤษฎี ในขณะที่กราฟเสนประแทนถึงผลตอบสนองที่ไดจากวงจรในทางปฏิบัติ



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผานความถี่ต่ำแบบบัทเทอรเวอรท

วงจรกรองผานความถี่ต่ำแบบบัทเทอรเวอรท –60 dB/decade (-60 dB/decade Low-pass Butterworth Filter) วงจรกรองผานความถี่ต่ำแบบบัทเทอรเวอรท ดังรูปที่ 3.5 จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเปน –60 dB/decad หลังจากคาความถี่ตัด ซึ่งจะเห็นวาสามารถกระทำไดโดยนำวงจรกรองผานความถี่ต่ำ -40 dB/decade มาตอคาสเคด (cascade) กับวงจรผานความถี่ต่ำ -20dB/decade อัตราขยายแรงดันลูปปดทั้งหมดของวงจร A CL (Overall closed-loop voltage gain) จึงมีคาเทากับ



รูปที่ 3.6 วงจรกรองผานความถี่ต่ำแบบบัทเทอรเวอรท –60 dB/decade

ในการออกแบบในที่นี้เราจะใชอัตราการขยายเทากับหนึ่งเทา โดยใชไอซีเบอร TL 072 เนื่องจากคลื่นไฟฟาหัวใจมีความถี่อยูในชวง 0-100 Hz ดังนั้นจึงออกแบบใหความถี่ตัดเท่ากับ 200 Hz ขั้นตอนการออกแบบวงจรสามารถสรุปไดดังนี้คือ

1) เลือกคาความถี่ตัด f_c ของวงจร
2) ทำการเลือกคา C_3 ที่ใชในวงจร โดยทั่วไปควรมีคาระหวาง 0.001μF ถึง 0.1μF
3) เลือกคา

$$C_1 = \frac{C_3}{2} \qquad \text{และ} \qquad C_2 = 2C_3 \tag{7}$$

4) คำนวณคา R จากสมการ

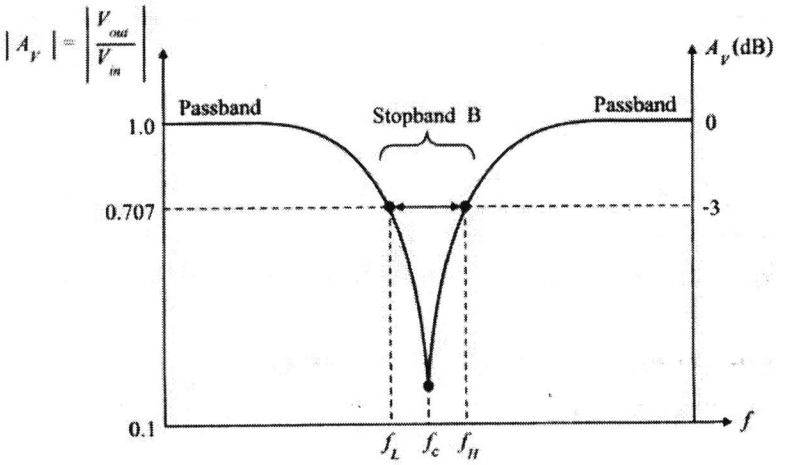
$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_c C_3} \tag{8}$$

5) เลือกคา $R_1 = R_2 = R_3 = R$ ซึ่งโดยทั่วไปควรมีคาระหวาง 10 kΩ ถึง 100 kΩ

6) ทำการเลือกคา $R_{f1} = 2R$ และ $R_{f2} = R$

3.4 วงจรกรองผานความถี่แบบชองบาก หรือวงจรนอตชฟลเตอร

เนื่องจากปญหาจากสัญญาณไฟฟากระแสสลับ 50Hz ที่จะเขามารบกวนอุปกรณ ทำใหสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจผิดเพี้ยนไป วงจรกรองผานความถี่บาก (Band-stop filter) หรือวงจรนอตชฟลเตอร (Notch filter) จะทำหนาที่ตัดความถี่ที่ไมตองการนี้ออกไป โดยวงจรกรองสัญญาณประเภทนี้จะมีคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรดังรูปที่ 3.6 สังเกตไดวาสัญญาณความถี่ที่ไมตองการจะถูกลดทอนในชวงความถี่หยุด (Stopband, B) และสัญญาณความถี่ที่ตองการจะถูกสงผานไปในชวงแถบผาน (Passband) ซึ่งอยูดานขางของแถบหยุดนั่นเอง

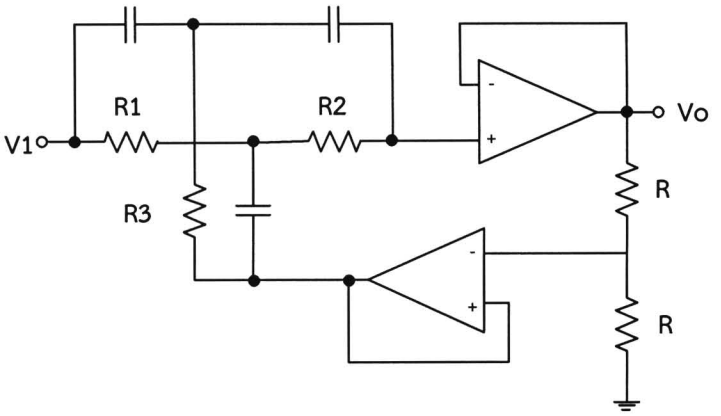


รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรนอตชฟลเตอร์

ในโครงการวิจัยนี้เลือกใชวงจรนอตชฟลเตอรแบบตัวทีแฝด (Twin-T Notch filter) ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถขจัดสัญญาณความถี่ที่ไมตองการไดอยางประสิทธิภาพ ใหคาตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) ที่ดี ซึ่งเราสามารถคำนวณหาตัวประกอบคุณภาพไดจากสมการ

$$Q = \frac{F_c}{B} \tag{9}$$

จากคาตัวประกอบคุณภาพ แสดงถึง วงจรกรองผานแถบความถี่แบบแถบแคบ มีกราฟตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่รูปรางแหลมและคม และ แบนดวิดทของวงจรมีคาความถี่ตัดทิ้ง f_c เปนตำแหนงกึ่งกลาง



รูปที่ 3.8 วงจรนอตซฟลเตอร์

ขั้นตอนการออกแบบวงจรสามารถสรุปไดดังนี้คือ

1) เลือกคาความถี่ตัดทิ้ง f_c = 50Hz

2) เลือกคา C ที่ใชในวงจร โดยทั่วไปควรมีคาระหวาง 0.001μF ถึง 0.1μF

3) คำนวณคา R จากสมการ

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{2\pi f_c C} \tag{10}$$

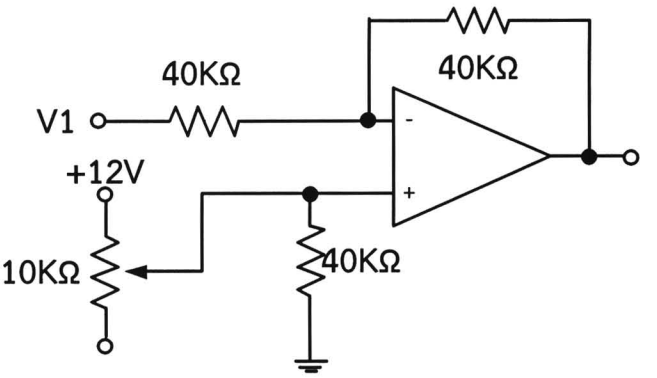
4) เลือกค่า

$$R_3 = \frac{R_1}{2} \tag{11}$$

5) คำนวณคา Feedback factor, $k = 1 - \frac{1}{4Q}$ จาก Q-factor ที่ตองการ

3.5 วงจรปรับออฟเซต

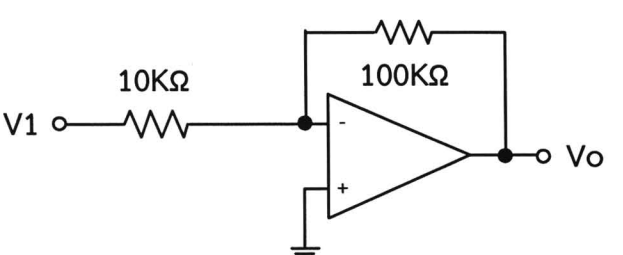
วงจรปรับออฟเซตนี้ เราตองการปรับระดับของสัญญาณที่ออกมานั้นอยูในชวง 0-5V เพื่อนำไปแสดงผลทางคอมพิวเตอร จากวงจรเราจะพบวาเปนการนำเอาวงจรขยายผลต่างเขามาในการทำวงจรปรับออฟเซตนั่นเอง โดยลักษณะการทำงานของวงจร คือ การที่เรานำเอาคาของกราฟคลื่นไฟฟาหัวใจที่เราไดนั้นมาทำการเขาที่ V_{in} ของวงจรซึ่งจะอยูทางดานขาอินพุตบวกของออปแอมป์ และทางดานขาอินพุตลบของออปแอมป์ จะมีตัวตานทานที่ปรับคาได เพื่อคอยควบคุมคาของแรงดันลบที่เราตองการนำเขามาทำการปรับออฟเซตโดยในโครงงานนี้เราใช IC Op Amp INA 132 ซึ่งเปนวงจรขยายผลต่าง และโดยตอความตานทานที่ปรับคาไดขนาด 10 kΩ



รูปที่ 3.9 วงจรปรับออฟเซต

3.6 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

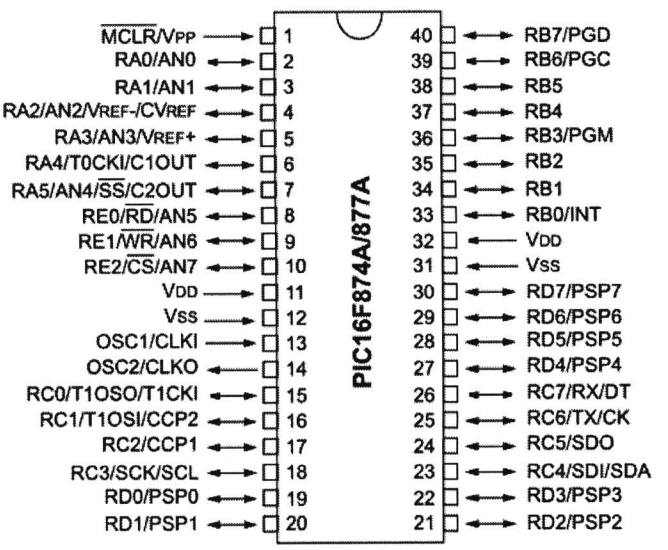
วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณหลัก โดยมีอัตราการขยายเทากับ $A_v = (R_f/R)$ เนื่องจากสัญญาณที่ไดกอนหนานี้มีขนาดสัญญาณที่ต่ำมาก เราจึงตองปรับคาสัญญาณใหอยูในชวง 0-5V ตามที่ตองการ โดยในโครงการวิจัยนี้เลือกใช IC Op Amp เบอร์ TL 072 และเลือกใชตัวตานทาน R = 10 kΩ และ R_f = 100 kΩ ซึ่งเปนตัวตานทานแบบปรับคาได เพื่อให้สามารถปรับคาอัตราการขยายสัญญาณใหอยูในชวงที่เหมาะสม



รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

3.7 วงจร ADC (Analog to Digital converter)

โครงการวิจัยนี้เลือกใช Microcontroller PIC16f877A ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีวงจรแปลงสัญญาญแอนะล็อกเปนสัญญาณดิจิตอลขนาด 10 บิท 8 ช่องสัญญาณอยู่ภายในตัวมันเอง



รูปที่ 3.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16f877A

3.8 ส่วนการติดต่อสื่อสารไร้สาย

ในส่วนนี้จะเป็นการส่งข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้ไปยังห้องแสดงผลส่วนกลางผ่านโพรโทคอล Zigbee ของบริษัท Digi International Inc. โดยมีขั้นตอนการส่งข้อมูลดังรูปที่ 6 ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

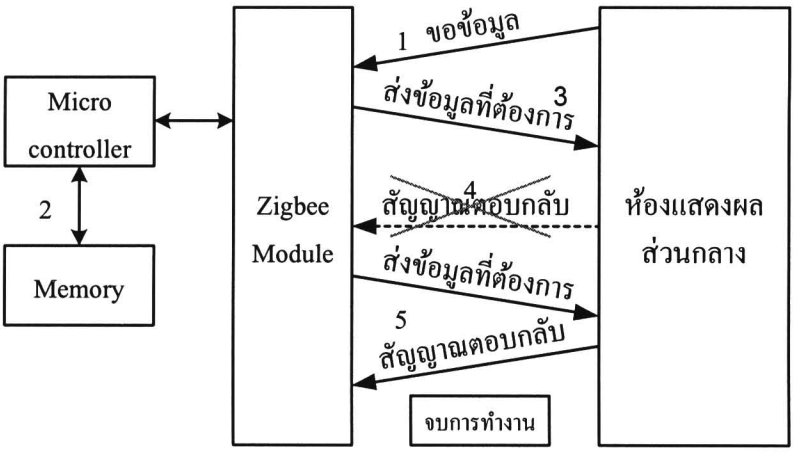
1) รอรับการร้องขอข้อมูลจากห้องแสดงผลส่วนกลางผ่านทางโมดูล Zigbee

2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ อ่านข้อมูลที่เก็บได้ในหน่วยความจำ

3) ส่งข้อมูลกลับไปที่ห้องแสดงผลส่วนกลาง

4) ไมโครคอนโทรลเลอร์ รอรับสัญญาณตอบกลับจากห้องแสดงผลส่วนกลาง

5) หากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่ได้รับสัญญาณตอบกลับจากห้องแสดงผลส่วนกลางภายในเวลาที่กำหนด ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะส่งข้อมูลออกไปอีกครั้งจนกว่าจะได้รับสัญญาณตอบกลับจากห้องแสดงผล



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทำงานในส่วนการติดต่อสื่อสารไร้สาย