

บทที่ 4

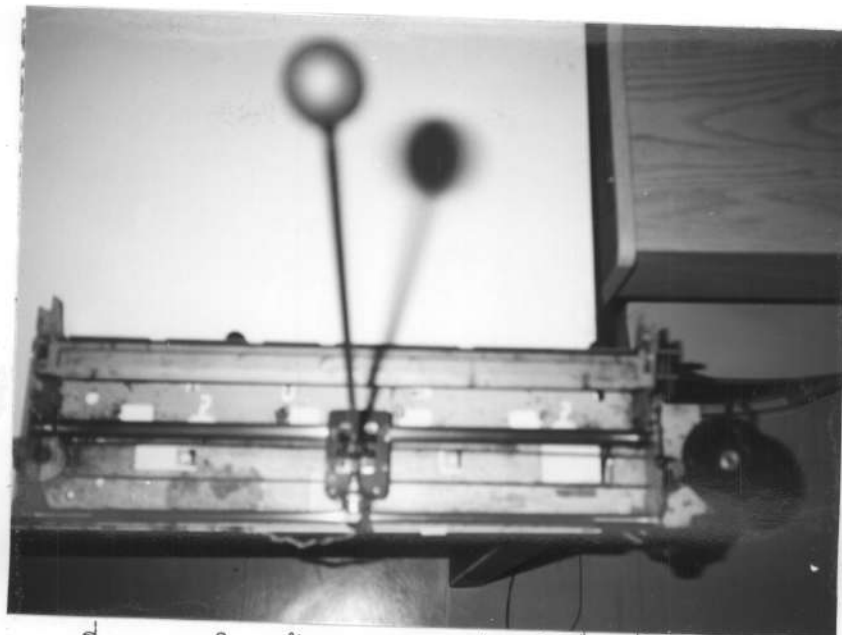
โครงสร้างของแบบจำลองลูกตุ้มผกผัน

4.1 โครงสร้างทางกลของลูกตุ้มผกผัน

โครงสร้างทางกลของลูกตุ้มผกผัน ในที่นี้จะหมายถึง อุปกรณ์ทั้งหมดที่ประกอบขึ้นเป็นระบบของลูกตุ้มผกผัน เช่น อุปกรณ์เคลื่อนที่ในแนวราบ, ลูกตุ้ม ตลอดจน เครื่องมือวัดตำแหน่งของมุมของลูกตุ้ม และตำแหน่งของตัวรถ โดยรายละเอียดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 อุปกรณ์เคลื่อนที่ในแนวราบ

ส่วนประกอบของอุปกรณ์เคลื่อนที่ในแนวราบ ประยุกต์ใช้ชุดการเคลื่อนที่ของพรีนเตอร์แบบหัวเข็ม (dot matrix) ซึ่งประกอบไปด้วย แท่นยึดหัวเข็ม สายพาน มู่เล่ และโครงของพรีนเตอร์บางส่วน โดยทำการเปลี่ยนมอเตอร์ จากที่ใช้เป็นสเต็ปมอเตอร์ มาเป็นดีซีมอเตอร์ และ ใช้แท่นยึดหัวเข็ม มาทำ ตัวรถเพื่อเป็นที่ยึดฐานของลูกตุ้ม จากนั้นทำเฟืองเกียร์มาติดตั้ง ที่เพลลาของมอเตอร์ เพื่อที่จะติดเครื่องมือวัดตำแหน่งของตัวรถ โดยเครื่องมือวัดตำแหน่งของตัวรถ ใช้โพเทนชิออมิเตอร์ (potentiometer) แบบขดลวด 10 รอบ โดยอุปกรณ์เคลื่อนที่ในแนวราบ แสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.1

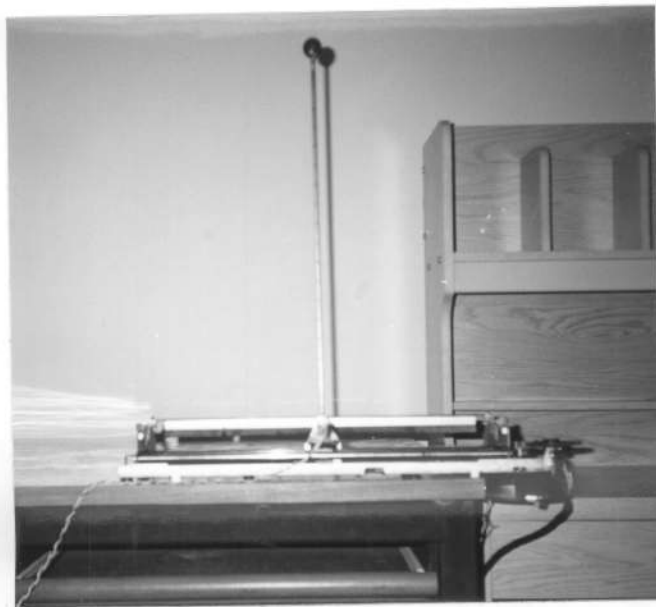


ภาพที่ 4.1 แสดงโครงสร้างทางกลของอุปกรณ์เคลื่อนที่ในแนวราบ

4.1.2 ลูกตุ้ม

ใช้ลูกเหล็กกลม ยึดติดกับแท่งเหล็ก แล้วสร้างแท่งยึดให้ลูกตุ้มตั้งขึ้น พร้อมจุดหมุนโดยลูกตุ้ม สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง ที่จุดหมุนจะติด เครื่องมือวัด คือ โพเทนชิออร์มิเตอร์เพื่อวัดมุมของลูกตุ้ม

โครงสร้างของลูกตุ้มผกผันสามารถแสดงให้เห็น ได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างทางกลของลูกตุ้มผกผัน

4.1.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ นี้ ใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบแม่เหล็กถาวร ขนาด 24 โวลต์

4.1.4 โพเทนชิออร์มิเตอร์

เป็นเครื่องมือที่วัดตำแหน่ง โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วัด มุมของลูกตุ้ม และตำแหน่งของตัวรถ โดยโพเทนชิออร์มิเตอร์ที่ใช้ เป็นแบบความต้านทานปรับค่าได้แบบแกนหมุน โดยใช้ขนาด 25 กิโลโอห์ม

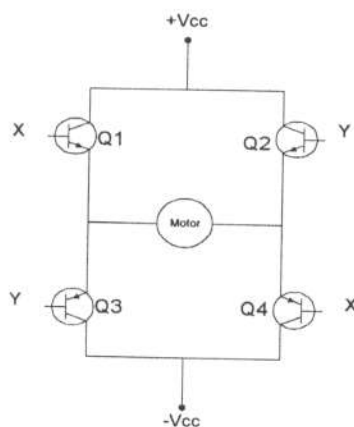
4.1.5 แหล่งจ่ายไฟ

ใช้แหล่งจ่ายไฟ ที่สามารถจ่ายแรงดันได้ ตั้งแต่ -15 โวลต์ ถึง 15 โวลต์ และจ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-3 แอมแปร์

4.2 วงจรขับมอเตอร์

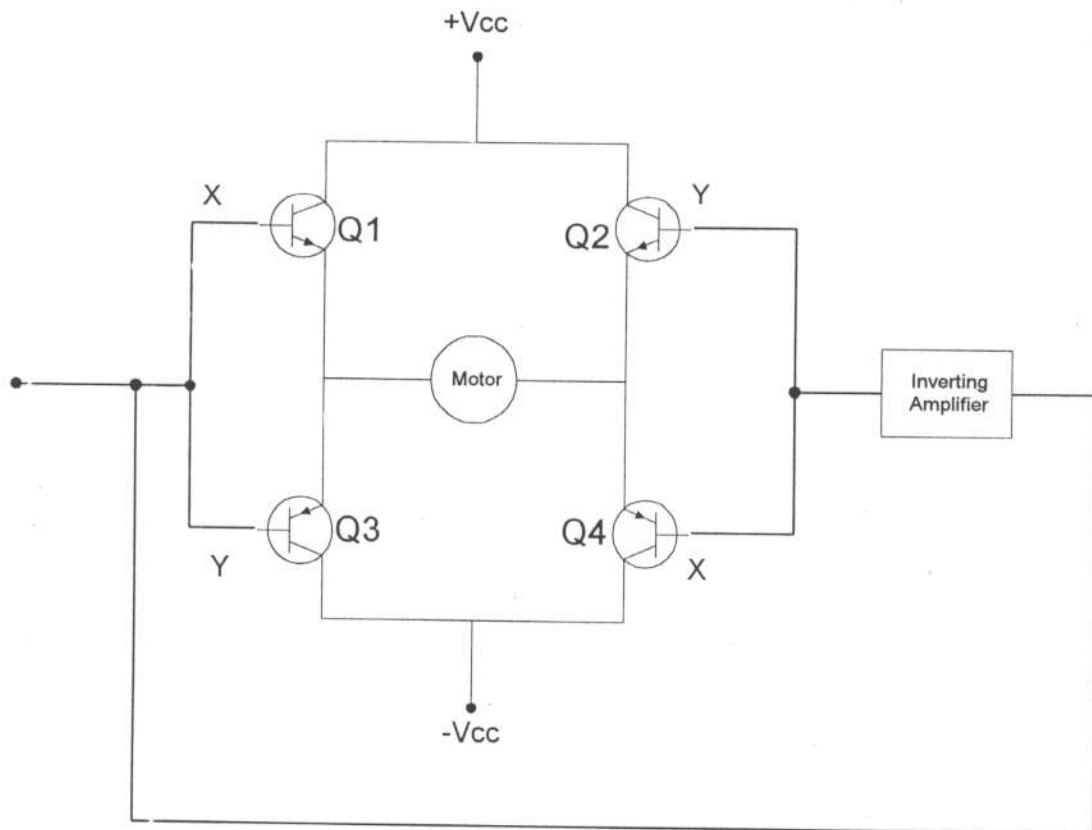
วงจรขับมอเตอร์เป็นวงจรที่มีความสำคัญมาก เพราะว่า ตัวควบคุม ไม่สามารถจ่ายกระแสทำให้มอเตอร์หมุนได้ ดังนั้นจึงใช้วงจรขับมอเตอร์ เป็นวงจรที่ใช้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ วงจรขับมอเตอร์ที่ให้นิยามนิพนธ์ นี้ใช้เป็นแบบ H-bridge ทำจากอุปกรณ์ bipolar และมีการป้องกันกลับภายในวงจร โดยสามารถควบคุมให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบวงจร สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

วงจรพื้นฐานที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์คือ ชุดของทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ซึ่งสลับกันทำงาน พร้อมกันทีละ 2 ตัว โดยแสดงดังภาพที่ 4.3



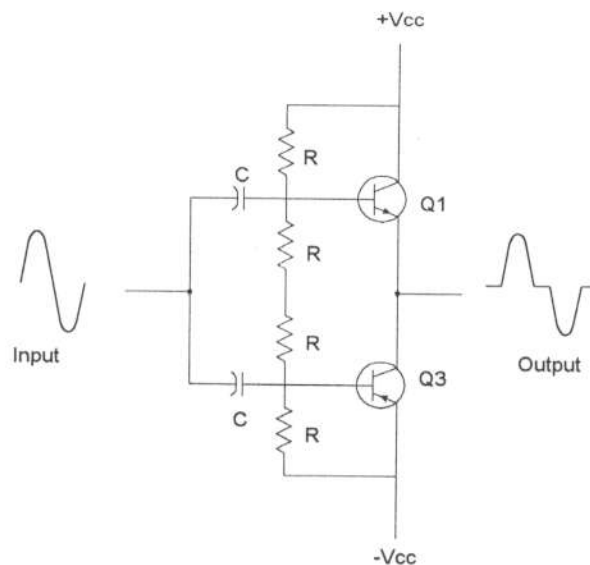
ภาพที่ 4.3 วงจร Bridge ทรานซิสเตอร์

ซึ่งการที่จะให้มอเตอร์หมุนได้นั้นจะต้องให้ ทรานซิสเตอร์ Q1 และ ทรานซิสเตอร์ Q4 หรือ ทรานซิสเตอร์ Q2 และ ทรานซิสเตอร์ Q3 ทำงานพร้อมกันทั้งคู่ สมมุติว่า เมื่อ ทรานซิสเตอร์ Q1 และ ทรานซิสเตอร์ Q4 ทำงาน มอเตอร์ จะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และเมื่อ ทรานซิสเตอร์ Q2 และ ทรานซิสเตอร์ Q3 ทำงาน มอเตอร์จะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา แรงดันเบส (Base Voltage) ของ ทรานซิสเตอร์ Q1 จะต้องมีความสูงพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ ทำงานได้ ในขณะเดียวกัน แรงดันเบส ของ ทรานซิสเตอร์ Q4 จะต้องมีความตลบสูงพอ ที่จะทำให้ ทรานซิสเตอร์ Q4 ทำงานได้ แต่ต้องการที่จะทำให้กระแสที่ไหลผ่าน ทรานซิสเตอร์ Q1 และ ทรานซิสเตอร์ Q4 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น แรงดันเบส ของ ทรานซิสเตอร์ ทั้งสองจะต้องมีค่าเท่ากัน เพียงแต่เครื่องหมายต่างกัน วิธีนี้จะทำให้อินพุตของ ทรานซิสเตอร์ Q1 และ ทรานซิสเตอร์ Q4 มีค่าเท่ากันแต่เครื่องหมายต่างกัน นั่นคือ อินพุตของ ทรานซิสเตอร์ ตัวใดตัวหนึ่งจะต้องผ่านวงจรที่ทำหน้าที่กลับเฟสสัญญาณก่อนที่จะเป็นอินพุตของทรานซิสเตอร์ แสดงได้ในภาพที่ 4.4



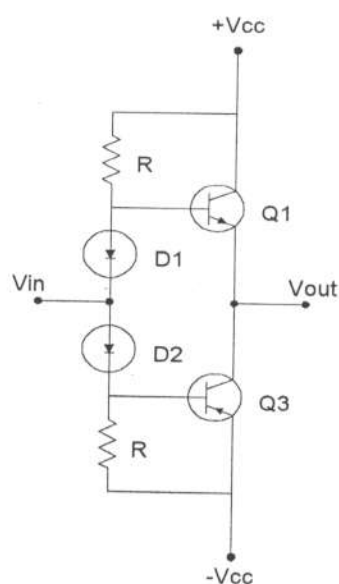
ภาพที่ 4.4 แสดงวงจรการต่อวงจรกลับเฟสเข้ากับวงจร Bridge ทรานซิสเตอร์

ซึ่งในวงจรนี้เราจะให้ ทรานซิสเตอร์ ที่อยู่ด้านเดียวกันใช้ อินพุตเหมือนกัน เพราะไม่ว่ากรณีใด ๆก็ตามทรานซิสเตอร์ ที่อยู่ฝั่งเดียวกันจะไม่มีทางทำงาน พร้อมกันได้เพราะเป็นทรานซิสเตอร์ คนละชนิดกันคือ ทรานซิสเตอร์ Q1 และ ทรานซิสเตอร์ Q2 เป็นชนิด NPN ส่วน ทรานซิสเตอร์ Q3 และ ทรานซิสเตอร์ Q4 เป็นชนิด PNP ถ้าทรานซิสเตอร์ที่อยู่ด้านเดียวกันทำงานพร้อมกัน จะทำให้เกิดการลัดวงจร มีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟ 15 โวลต์ ไปถึง -15 โวลต์ ซึ่งกระแสจะไหลมากไหลน้อยขึ้นอยู่กับการทำงานของ ทรานซิสเตอร์ ว่าทำงานมากน้อยขนาดไหน จะขึ้นอยู่กั กระแสเบส (Base Current) ของ ทรานซิสเตอร์ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้น คือเมื่อขาเบสของทรานซิสเตอร์ ที่อยู่ฝั่งเดียวกันต่อร่วมกัน จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการ Distortion หรือที่เรียกว่า Cross Over Distortion ซึ่งแสดงให้เห็นโดยภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แสดง Cross Over Distortion

Cross Over Distortion เกิดจากช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ ทรานซิสเตอร์ ทั้งสองตัวอยู่ในสภาวะไม่ทำงาน จะทำให้ แรงดันทางด้านเอาต์พุต ลดลงเป็นศูนย์ ในการที่จะแก้ไขปัญหาการเกิด Cross Over Distortion นั้น ทรานซิสเตอร์ ทั้งสองจะต้องมีการ Bias ให้อยู่เหนือระดับที่เรียกว่า Out off area เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้ เอาต์พุต มีความสัมพันธ์กับ อินพุต แบบเชิงเส้น ได้มากที่สุด ซึ่งการที่จะแก้ไขโดยวิธีดังกล่าว นั้น ต้อง Bias โดยใช้ไดโอด ใช้ไดโอด 2 ตัววางในตำแหน่งดังภาพที่ 4.6

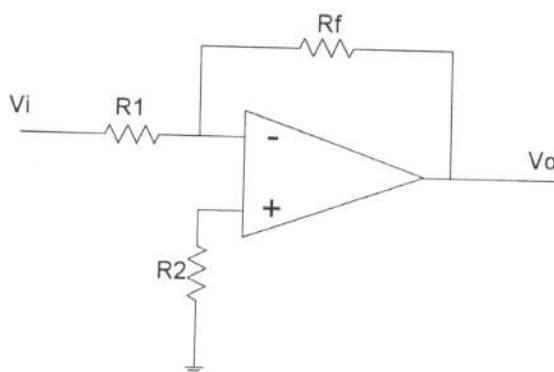


ภาพที่ 4.6 แสดงการต่อ Diode เพื่อลด Cross Over Distortion

ไดโอดที่ใช้ ต้องเลือกให้เหมาะสม กับค่าของ V_{be} ของ ทรานซิสเตอร์ ทั้งสองตัว ถ้าส่วนบนและส่วนล่างของวงจร เข้ากันได้กันพอดี จะทำให้ตำแหน่ง V_{in} มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ เมื่อยังไม่มีอินพุต ซึ่ง แรงดันไบแอส ของทรานซิสเตอร์ ทั้งสองตัว จะอยู่ ในสภาวะไบแอส ที่อยู่นิ่ง Out off area ขึ้นไปเล็กน้อย ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเกิด Cross Over distortion ได้ เนื่องจาก ทรานซิสเตอร์ สามารถนำกระแสได้เล็กน้อย ซึ่งการที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ อยู่ในสภาวะถูก ไบแอส เพียงเล็กน้อยนี้จะทำให้ กระแสคอลเลกเตอร์ (collector current) สามารถไหลได้ ทรานซิสเตอร์ จะนำกระแสจนกระทั่ง แรงดันเบส และ แรงดันอิมิตเตอร์ (Emitter Voltage) มีค่าเท่ากัน

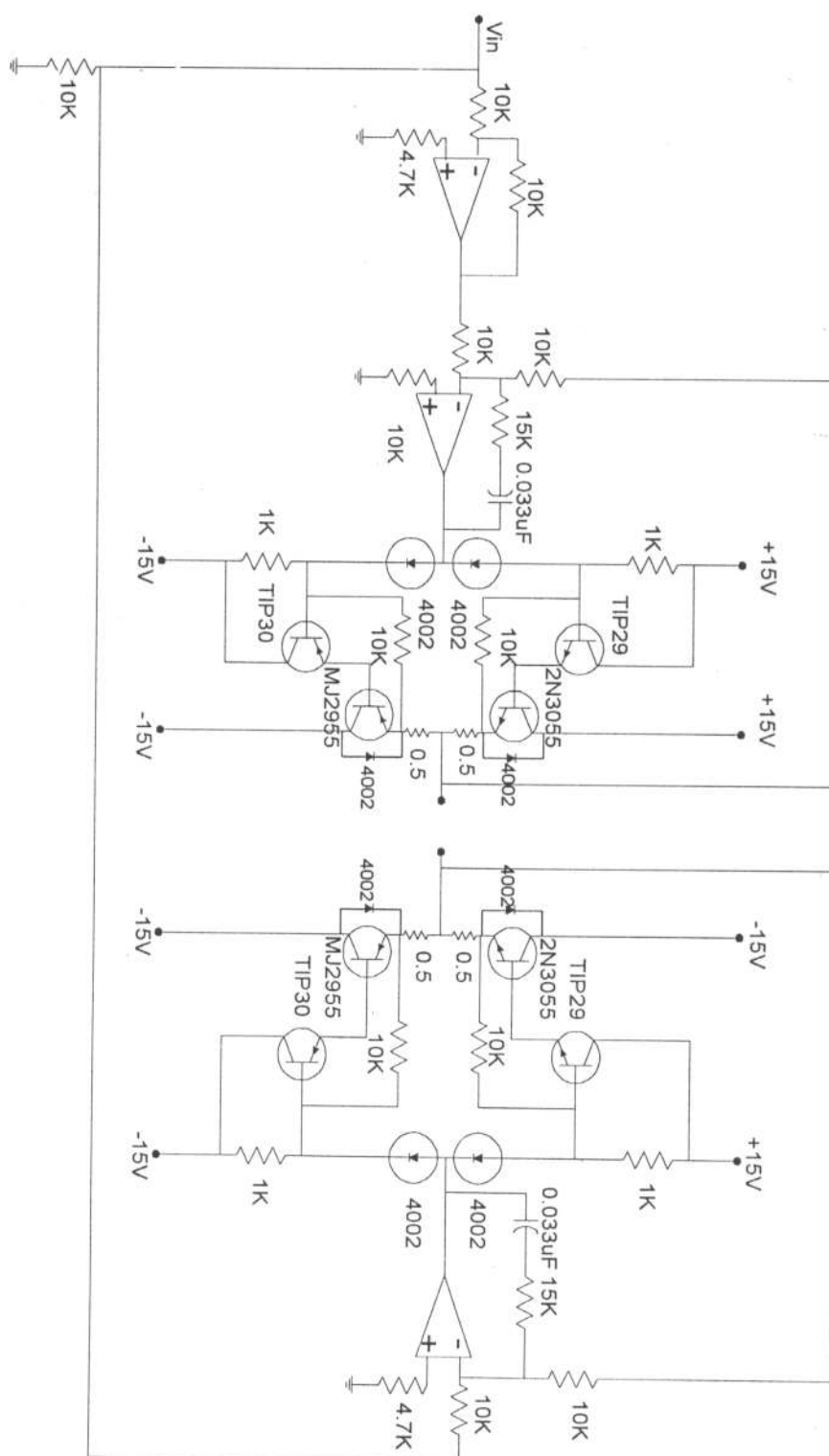
ซึ่งหลักการนี้จะใช้เป็นหลักการสร้างวงจรขับมอเตอร์ คือ ทำให้ $V_{out} \approx V_{in}$ ซึ่งจะใช้ควบคุมแรงดัน ที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์ นอกจากนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้ การแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ในการ ไบแอส วงจรนั้นจะเกิดปัญหา Thermal Runaway ซึ่งก็คือเมื่ออุณหภูมิของ ทรานซิสเตอร์ เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า β เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้ กระแสคอลเลกเตอร์ เพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งวนเวียนเป็นลูกโซ่ ซึ่งไดโอดสามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้เหมือนกัน

เนื่องจากอินพุต ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ ทรานซิสเตอร์ Q_4 หรือ ทรานซิสเตอร์ Q_2 และ ทรานซิสเตอร์ Q_3 จะต้องมีความเท่ากันแต่กลับเฟส (Phase) กัน ดังนั้นจึงต้องอาศัยวงจรกลับเฟสช่วย ซึ่งวงจร กลับเฟสที่เราเลือกใช้เป็นวงจร Inverting Amplifier ที่มีอัตราขยายเป็น -1 ออปแอมป์ จะมีคุณสมบัติอย่างหนึ่งคือจะมี Input Bias Current ซึ่งก็หมายความว่า ในขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุต แต่จะมีกระแสไหลผ่านความต้านทาน R_1 และ R_f อยู่เล็กน้อยดังนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุต $V_o = I_b R_f$ ซึ่งจะทำให้ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) มีคุณสมบัติ ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถทำการแก้ไขได้ โดยการต่อ R_2 ระหว่างขา Non inverting Input และ Ground ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 แสดงการต่อ R_2 เพื่อแก้ Output Voltage Offset เนื่องจากมี Input Bias Current โดยค่าของ R_2 มีค่าเท่ากับ R_1 ต่อขนานกับ R_f

แต่วงจรมีปัญหาคือ ทรานส์ซิสเตอร์ ที่ใช้อาจจะไม่สามารถขับมอเตอร์ได้ หรือถ้าเลือกใช้ Power ทรานส์ซิสเตอร์ จะทำให้อุปกรณ์ ไม่สามารถขับ ทรานส์ซิสเตอร์ ได้ ซึ่งการแก้ปัญหานี้ก็คือการเลือกใช้ ทรานส์ซิสเตอร์ ที่ต่อแบบ Darlington ซึ่งถูกสร้างขึ้นจาก ทรานส์ซิสเตอร์ สองตัว ซึ่ง ทรานส์ซิสเตอร์ ที่ต่อแบบ Darlington จะมีอัตราขยายกระแสสูงกว่า ทรานส์ซิสเตอร์ แยกตัวเดียว โดย Q_1 เป็น Input หรือ ทรานส์ซิสเตอร์ ขับ (Driver) ส่วน Q_2 คือ Output หรือ ทรานส์ซิสเตอร์ หลัก(Main) ในการทำงานจริงๆ Darlington (เฉพาะ Q_2) จะทำงานแบบกึ่งอิ่มตัว(Quasi Saturation) เมื่อได้รับ Forward Bias จะทำให้มีการสูญเสียต่ำ บางครั้งเรียกวงจรมันว่า Baker Clamp คุณสมบัติการนำกระแสของ ทรานส์ซิสเตอร์ แบบ Darlington จะเหมือนกับ Power ทรานส์ซิสเตอร์ แต่มีข้อดี 2 ประการคือ เมื่อ Darlington ได้รับการไบแอส (Bias) แบบ Forward Bias ค่าของ V_{CE} จะกึ่งอิ่มตัว และอีกประการหนึ่งก็คือ ช่วงเวลาการให้ on (t_{on}) จะเร็วขึ้น ในการนำ ทรานส์ซิสเตอร์ แบบ Darlington ไปใช้งานมักจะพบปัญหาการเกิด Oscillate ขึ้นทั้งทางด้าน Input และ Output สามารถแก้ไขได้โดยการใส่ตัวต้านทานระหว่างขาเบส (Base) ของ ทรานส์ซิสเตอร์ ขับ และขาอิมิตเตอร์ (Emitter) ของ ทรานส์ซิสเตอร์ หลัก และ วงจรขับมอเตอร์ ที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์ นี้จะมีวงจรดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 แสดงวงจรของวงจรรับมอดูเลเตอร์

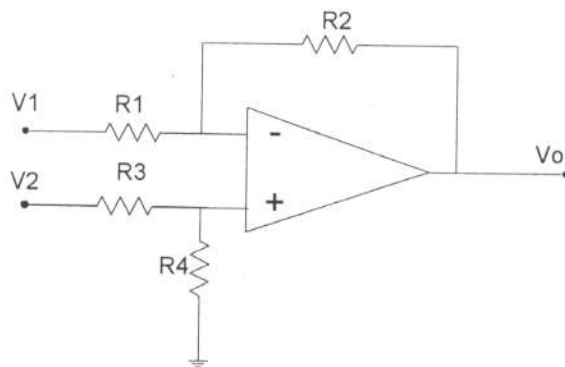
4.3 วงจรของตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมลูกตุ้มผกผัน ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic controller) โดยใช้ ออปแอมป์ (Operational amplifiers) วงจรที่ใช้เป็นส่วนประกอบของตัวควบคุมนี้ ประกอบไปด้วย วงจรขยายสัญญาณผลต่าง (Differential amplifier) วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting amplifier) วงจรรวมสัญญาณ (Summing amplifier) และ วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator) โดยรายละเอียดของวงจรต่าง ๆ แสดงได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

ในวงจรของตัวควบคุม จะใช้วงจรนี้สำหรับเปรียบเทียบแรงดัน จากแรงดัน ที่ได้จาก โพลเทโนมิเตอร์ กับแรงดันอ้างอิงที่ตั้งไว้ เพื่อเป็นการกำหนด จุดอ้างอิงให้กับระบบนั่นเอง โดยปรกติแล้วจุดอ้างอิงนี้ จะกำหนดไว้ที่ศูนย์ นั่นก็หมายความว่า กำหนดให้ มุมของลูกตุ้มให้ตั้งฉากกับแนวราบ และตำแหน่งของตัวรถให้อยู่กึ่งกลาง ในการใช้วงจรขยายสัญญาณผลต่างนี้ ทำให้เพื่อ ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนจุดอ้างอิง ก็สามารถทำได้

วงจรขยายสัญญาณผลต่าง แสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 แสดงรูปวงจรวจรขยายสัญญาณผลต่าง

จากภาพที่ (4.9) หาค่าแรงดันเอาต์พุต ได้ดังนี้

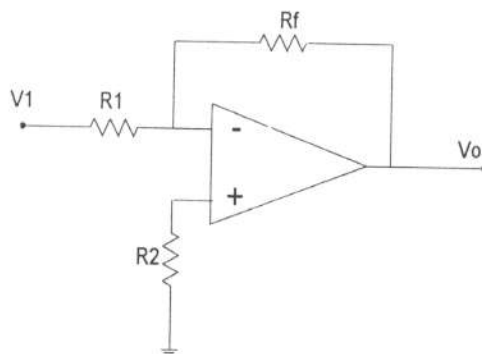
$$V_o = \frac{R_3}{R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ แรงดันเอาต์พุต จะกลายเป็น

$$V_o = V_2 - V_1$$

4.3.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส

เนื่องจากวงจรของตัวควบคุม ส่วนมากอาศัยการป้อนกลับด้วยอัตราขยาย ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วงจรขยายแบบกลับเฟส โดยแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ (4.10)



ภาพที่ 4.10 แสดงรูปของวงจรขยายแบบกลับเฟส

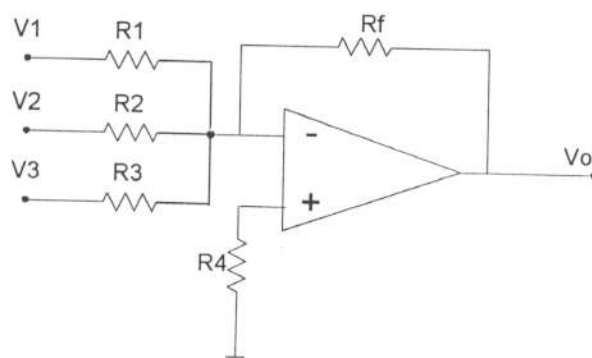
จากภาพที่ 4.10 หาค่าของแรงดันทางด้านเอาต์พุต ได้ดังต่อไปนี้

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1$$

ในทางปฏิบัติค่าของ $R_3 \approx R_1 // R_f$ เพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันออฟเซต ซึ่งเกิดจากกระแสไบแอส

4.3.3 วงจรรวมสัญญาณ

เนื่องจากในวงจรของตัวควบคุม มีการนำค่าสัญญาณ จากที่ต่างๆ มารวมกัน การทำแบบนี้ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการใช้ วงจรรวมสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 แสดงรูปของวงจรรวมสัญญาณ

จากภาพที่ 4.11 หาค่าของแรงดันเอาต์พุต ได้ดังต่อไปนี้

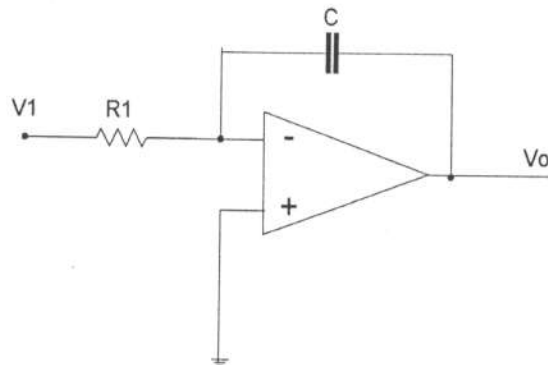
$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

ในกรณีที่มียอนพุทมากกว่า 3 ก็สมารถทำได้ โดยสมการของแรงดันเอาต์พุท จะกลายเป็น

$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

4.3.4 วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แสดงรูปของวงจรอินทิเกรเตอร์

จากภาพที่ 4.12 หาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ของวงจรอินทิเกรเตอร์ โดยใช้ผลรวมของกระแส ที่ขา inverting ของออปแอมป์ สมมุติให้เป็น idea จะได้ว่าไม่มีกระแสไหลเข้าออปแอมป์ จะได้

$$\frac{V_1(s)}{R_1} = \frac{V_o(s)}{1/Cs}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_1(s)} = \frac{1/Cs}{R_1}$$

ดังนั้น ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ของวงจรอินทิเกรเตอร์ คือ

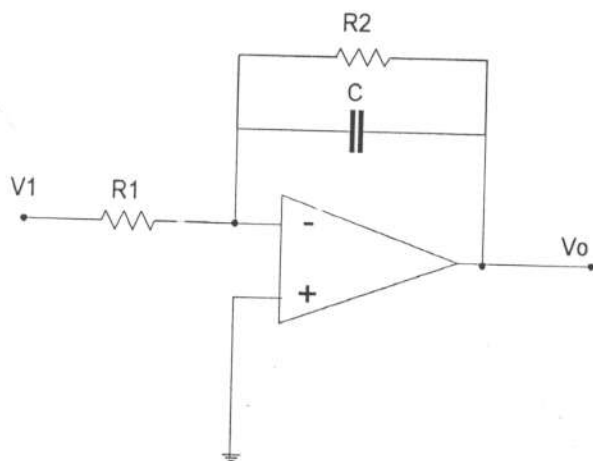
$$\frac{V_o(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{R_1 Cs}$$

ถ้าสัญญาณอินพุท V_1 เป็นรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal) สามารถวิเคราะห์ในรูปของความถี่ ได้

$$\frac{V_o(j\omega)}{V_1(j\omega)} = \frac{1}{j\omega R_1 C}$$

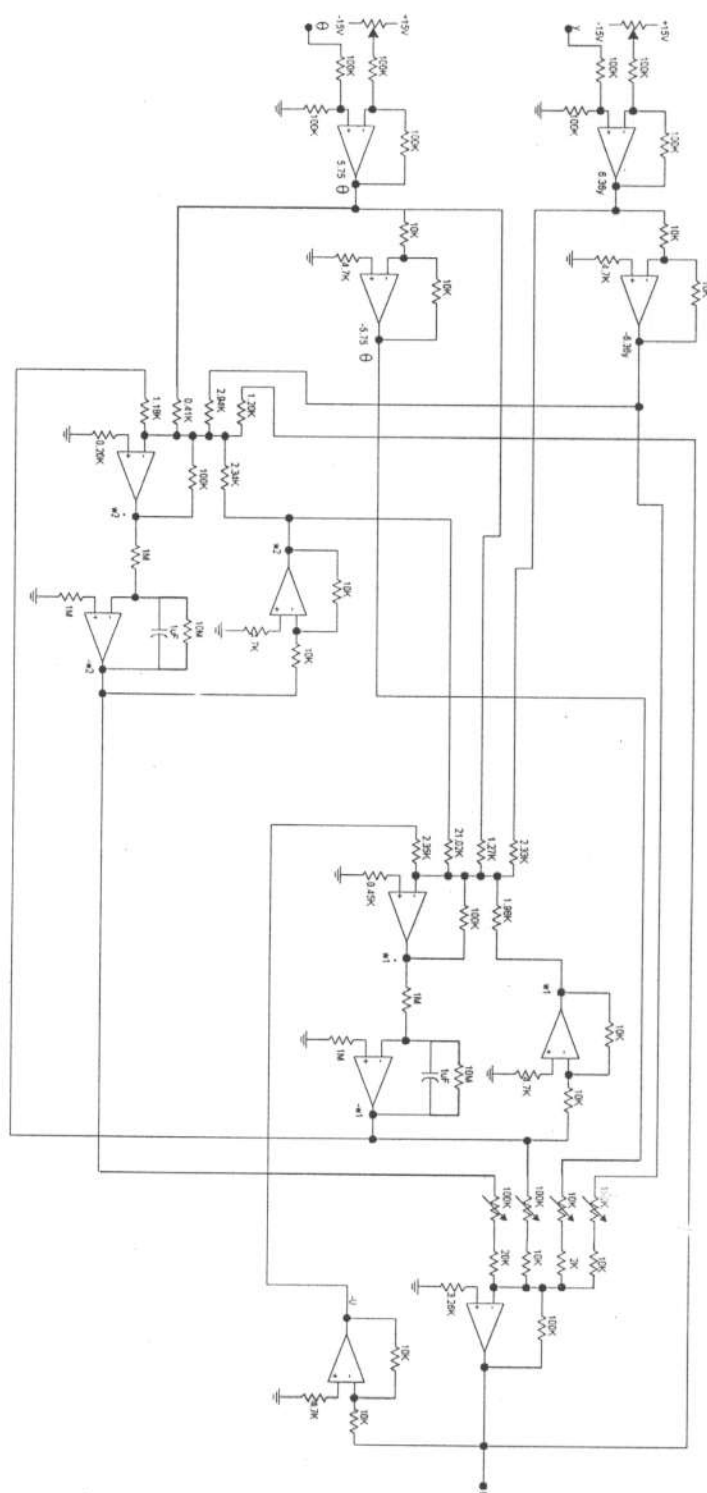
จากสมการข้างบนจะเห็นว่า อัตราขยายของวงจรขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ V_1 ถ้าความถี่ต่ำมากอัตราขยายก็จะสูงมาก ถ้าความถี่เป็นศูนย์ (หมายถึงแรงดันอินพุท มีค่าคงที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลง หรือ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง) อัตราขยายจะเป็นอนันต์ นั่นก็คือ หากมีสัญญาณ แปลกปลอมเข้ามาเพียงนิดเดียว แรงดันเอาต์พุทก็จะอึดตัวไปในทางใดทางหนึ่งทันที (ทางค่า

บวกหรือทางค่าลบ) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องใส่ตัวต้านทาน R_2 ขนานกับ C เพื่อจำกัดอัตราขยายด้านไฟตรงให้มีค่าไม่สูงมากเกินไป ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 แสดงรูปของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ในทางปฏิบัติ แต่เพื่อไม่ให้มีผลกับการคายประจุ และประจุของ C ค่า R_2 ควรจะมีค่าสูง โดยทั่วไปค่า R_2 มักจะถูกเลือกให้มีค่ามากกว่า 10 เท่าของ R_1

ดังนั้น จาก Signal flow graph ในภาพที่ 3.9 สามารถสร้างวงจรของตัวควบคุม โดยใช้ อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้ดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.15 แสดงวงจรของตัวควบคุมที่ใช้สำหรับควบคุมลูกตุ้มผกผัน แบบเปลี่ยนอัตราขยายได้