

บทที่ ๔

หน่วยแสดงสัญญาณตัวเลข



๔.๑ บทนำ

การเปลี่ยนจากสัญญาณแอนาล็อกมาเป็นสัญญาณดิจิทัล มีหลายวิธีด้วยกันแต่วิธีนิยมกันเป็นแบบเปลี่ยนสัญญาณแอนาล็อกเป็นความกว้างของ pulse เพื่อให้วงจรนับ ๆ จำนวน pulses ออกมาเป็นตัวเลข การต่อวงจรแบบนี้ไม่ยุ่งยากนักและราคาก็ไม่แพงแต่ในปัจจุบันวงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีจำหน่ายในท้องตลาดแล้ว ทำงานเป็นแบบ ดี-ซี โวลท์มีเตอร์ มีชื่อทางการค้าว่า "3 $\frac{1}{2}$ digit single chip analog-to-digital converter" ของ INTERSIL เบอร์ ICL 7107 สามารถอ่านค่าได้ ± 1999 มิลลิโวลท์ ซึ่งได้เลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหน่วยแสดงสัญญาณตัวเลข

๔.๒ Pulse width modulator analog-to-digital converter

วิธีนี้เป็นแบบหนึ่งของการเปลี่ยนสัญญาณแอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายนิยมกันทั่วไป มีความเร็วในการทำงานค่อนข้างช้า แต่วงจรไม่ยุ่งยาก มีความแม่นยำในการอ่านค่าปานกลาง

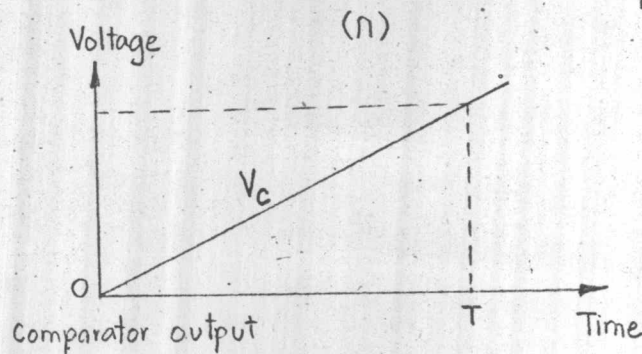
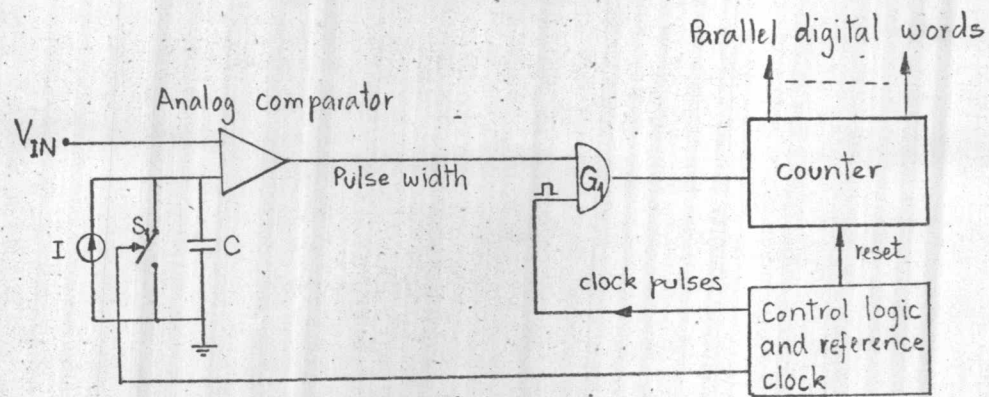
หลักการทำงานโดยการเปลี่ยนสัญญาณแอนาล็อกไปเป็นความกว้างของ pulse (ในช่วงของ time duration) หลังจากนั้นความกว้างของ pulse ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยการนับจำนวน clock pulses จากตัวกำเนิด clock pulses มาตรฐาน เริ่มจากจุดเริ่มต้นของความกว้างของ pulse ไปจนถึงสุดความกว้างของ pulse

โดยให้ V_{IN} = สัญญาณแอนาล็อกที่เข้ามาทาง input

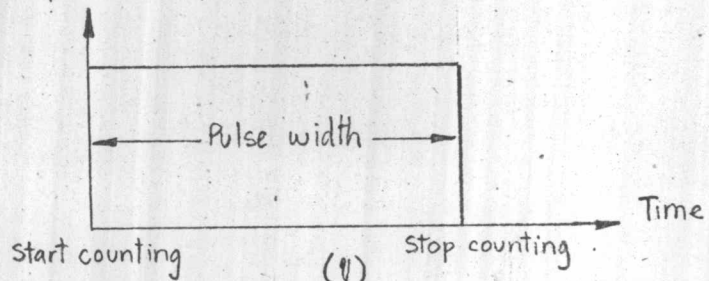
ดังนั้น V_{IN} จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความกว้างของ pulse

จากรูปที่ ๔.๑, รีเซตสวิทช์ (reset switch) S_1 ปกติจะปิดอยู่ตลอดเวลาจน

กระทั่งเริ่มการเปลี่ยนสัญญาณแอนาลอก เป็นสัญญาณดิจิทัล สวิตช์ S_1 จึงเปิดออก ดังนั้น คาปาซิเตอร์ C จะถูกประจุไฟฟ้าด้วยแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ (constant current source, I) ทำให้แรงดันคล่อมคาปาซิเตอร์ C มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นปฏิกภาคโดยตรงกับเวลาที่ประจุไฟฟ้าคาปาซิเตอร์ C จะถูกประจุไฟฟ้า ทำให้ V_C มีค่าเพิ่มจาก ๐ โวลต์ ขึ้นไปเรื่อย ๆ เมื่อ V_C มีค่าเป็น ๐ หรือมากกว่า ๐ เล็กน้อย output ของ comparator ก็จะเป็น '๑' gate G_1 จะยอมให้ clock pulse ผ่านเข้าไปในวงจรนับ (counter) เพื่อทำการนับแต่เมื่อ



$$\begin{aligned} \therefore V_C &= \frac{1}{C} \int_0^T i dt \\ &= \frac{I}{C} \cdot T \\ \therefore V_C &\propto \frac{T}{C} \end{aligned}$$



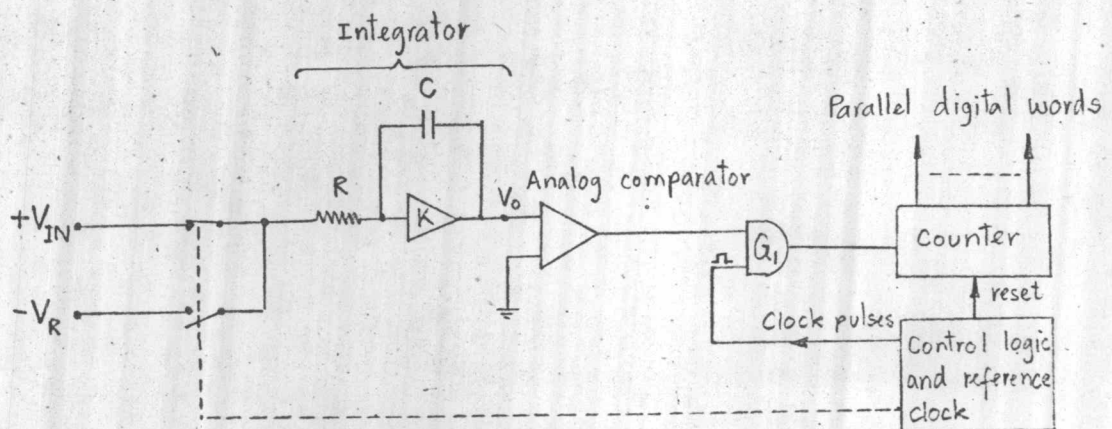
รูปที่ ๔.๑ (ก) แสดง Block diagram ของ pulse width modulator analog-to-digital converter

(ข) Timing diagram ของคาปาซิเตอร์ C และของ pulse width

ค่าปวซีเตอร์ C ถูกประจุไฟฟ้าจนมีขนาดเท่ากับสัญญาณแอนาล็อกที่เข้ามาทาง input คือ $V_c = V_{IN}$ output ของ comparator ก็จะเปลี่ยนจาก '๑' ลงมาเป็น '๐' เป็นผลให้ Gate G_1 ถูกปิด clock pulses จะไม่สามารถผ่าน gate G_1 เข้าไปในวงจรนับได้ การนับของวงจรก็หยุดลง ความกว้างของ pulse ก็หมดลงด้วย ดังนั้น ความกว้างของ pulse จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสัญญาณแอนาล็อกที่เข้ามาทาง input

๔.๓ Up-down integrator analog-to-digital converter

หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Dual slope integration analog-to-digital converter เป็นแบบหนึ่งของ pulse width modulator แต่มีการปรับปรุงเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างเข้าไปช่วยเพื่อให้มีความแม่นยำขึ้น

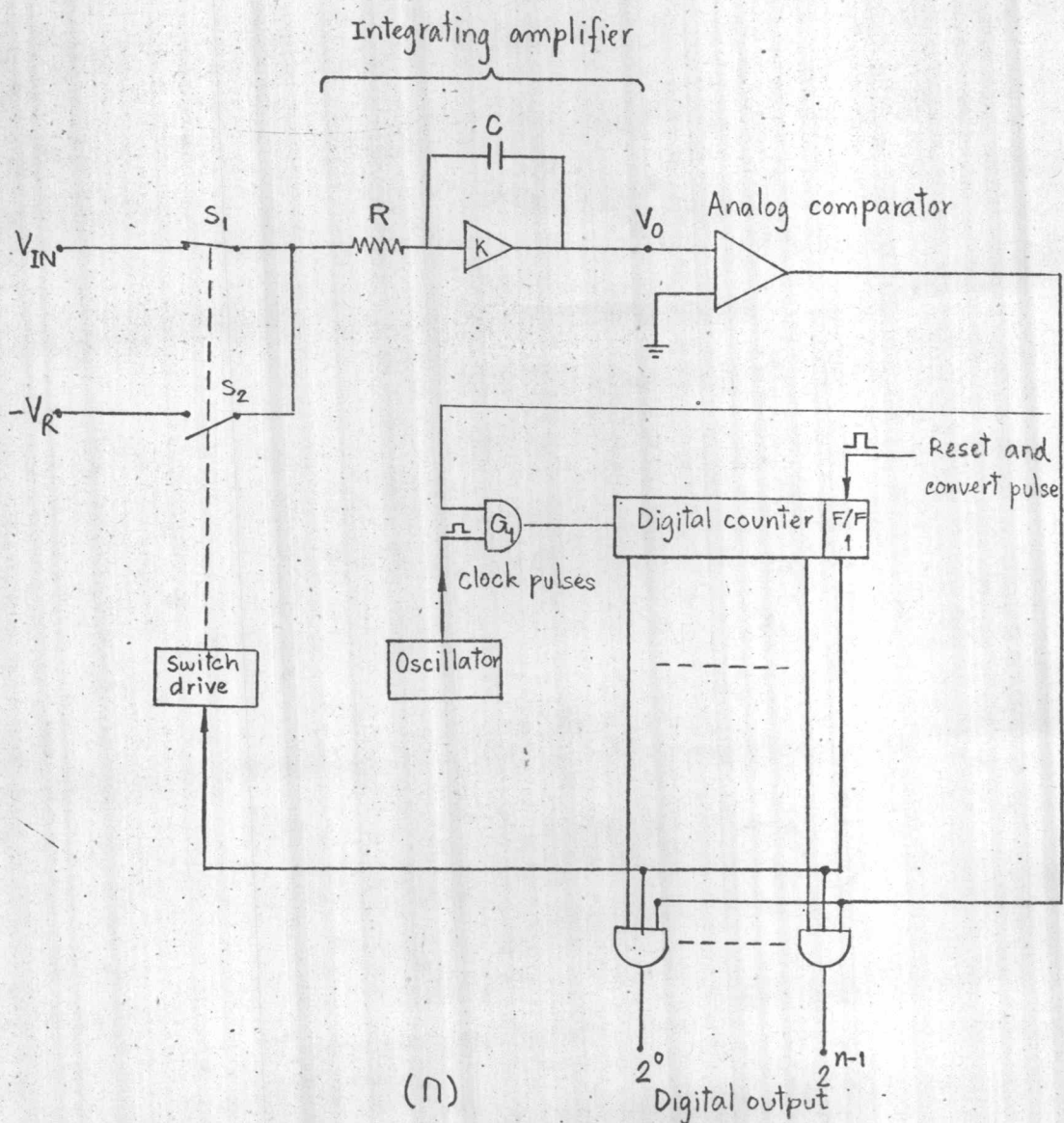


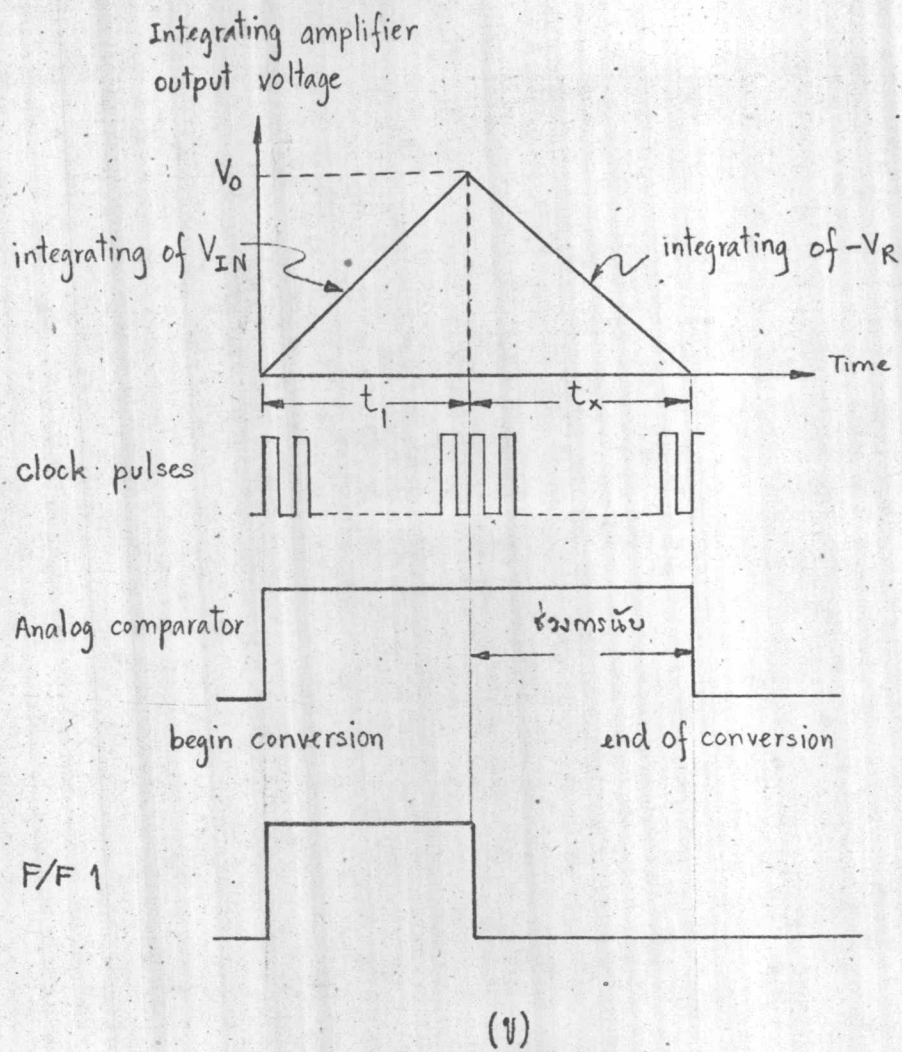
รูปที่ ๔.๒ แสดง Block diagram ของวงจร Up-down integrator analog-to-digital converter

หลักการทำงานโดยการสร้าง ความกว้างของ pulse ให้เป็นปฏิภาคโดยตรงกับสัญญาณแอนาล็อกที่เข้ามาทาง input ด้วยการเปรียบเทียบกับ integration ๒ ค่าเป็นแบบ ramp voltage ซึ่งมีความลาด (slope) เป็นบวกและลบ ตามลำดับ เป็นผลให้ absolute error ถูกหักล้างไปได้, integration แรกเกิดขึ้นกับสัญญาณแอนาล็อกที่เข้ามาทาง input (V_{IN}) ในช่วงเวลา t_1 แล้วจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ reference voltage ($-V_R$) ที่ทราบค่า

ในช่วงเวลา t_x ต่อมา ซึ่งในช่วงเวลา t_x นี้จะทำการนับจำนวน clock pulses ที่เข้าไปใน วงจรนับ ซึ่งจะเป็นค่าดิจิทัลที่ตรงกับค่าแอนาลอกที่ต้องการ

จากรูปที่ ๔.๓, เมื่อได้รับสัญญาณ reset and convert pulse, flip-flop ทุก ตัวในวงจรนับจะเป็น '๐' ทำให้สวิตช์ S_1 ปิด และสวิตช์ S_2 เปิด ดังนั้นจะรับ V_{IN} เข้ามา ทำให้แรงดันขาออกของ integrator มีค่าเพิ่มจาก ๐ โวลต์ ขึ้นไปเรื่อย ๆ comparator output ก็จะเปลี่ยนสถานะจาก '๐' เป็น '๑' gate G_1 จะถูกเปิดให้ clock pulses





รูปที่ ๔.๓ (ก) แสดง Block diagram ของ up-down integrater analog-to-digital converter

(ข) แสดง timing diagram ของการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

จาก reference oscillator ผ่าน gate G_1 ไปยังวงจรรนับ ในช่วงเวลา t_1 , F/F_1 จะเป็น '๑' วงจรรนับจะเป็น '๐' ทั้งหมด เมื่อหมดช่วงเวลา t_1 F/F_1 จะเป็น '๐' ทำให้สวิตช์ S_1 เปิด และสวิตช์ S_2 ปิด เป็นผลให้ตัดสัญญาณ V_{IN} ออกไป และต่อ $-V_R$ เข้ากับ integrator แทน แรงดันขาออกของ integrator ที่เวลา t_1 จะมีค่าลดลงเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเป็น ๐ โวลท์ ซึ่งจะต้องใช้เวลา t_x แล้ว comparator output จะเปลี่ยนจาก '๑' เป็น '๐' ทำให้ gate G_1 ถูกปิดลง clock pulses ไม่สามารถเข้าไปในวงจรรนับได้ขณะเมื่อ

F/F_1 เปลี่ยนจาก '๑' เป็น '๐' นั้น วงจรนับจะเริ่มนับจำนวน clock pulses ที่ผ่าน gate G_1 จนกระทั่งหมดช่วงเวลา t_x

จำนวน clock pulses ที่วงจรถับได้จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับเวลา t_x หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสัญญาณ V_{IN} เช่นค่าที่มากของ V_{IN} จะเป็นค่ามากที่สุดของ integrator output ที่เวลา t_1 ดังนั้น จะใช้เวลานานที่จะทำให้แรงดันขาออกของ integrator ลดลงเป็นเส้นตรงจนเป็น ๐ โวลต์ สามารถแสดงขบวนการเปลี่ยนสัญญาณด้วยสมการง่าย ๆ ได้โดยตัดค่า error บางอย่างเกี่ยวกับการเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกมาเป็นความกว้างของ pulse

ช่วงเวลา t_1 , แรงดันขาออกของ integrator จะเป็น

$$\begin{aligned}\Delta V_{o,t_1} &= \frac{1}{RC} \int_0^{t_1} V_{IN} dt \\ &= \frac{t_1}{RC} V_{IN} + K_1 \quad \text{----- (๑)}\end{aligned}$$

ซึ่ง K_1 = ค่าคงที่มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ initial offset voltage ของ integrator มีค่าน้อยมาก

$$\therefore \Delta V_{o,t_1} = \frac{t_1}{RC} V_{IN} \quad \text{----- (๒)}$$

ช่วงเวลา t_x , แรงดันขาออกของ integrator จะมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

$$\begin{aligned}\Delta V_{o,t_x} &= \frac{1}{RC} \int_0^{t_x} (-V_R) dt \\ &= \frac{-t_x}{RC} V_R \quad \text{----- (๓)}\end{aligned}$$

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในช่วงเวลา t_1 จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในช่วงเวลา t_x คือมีค่าเริ่มจาก ๐ โวลต์ไปจนถึงค่า ๆ หนึ่ง แล้วลดลงมาเป็น ๐ โวลต์อีก

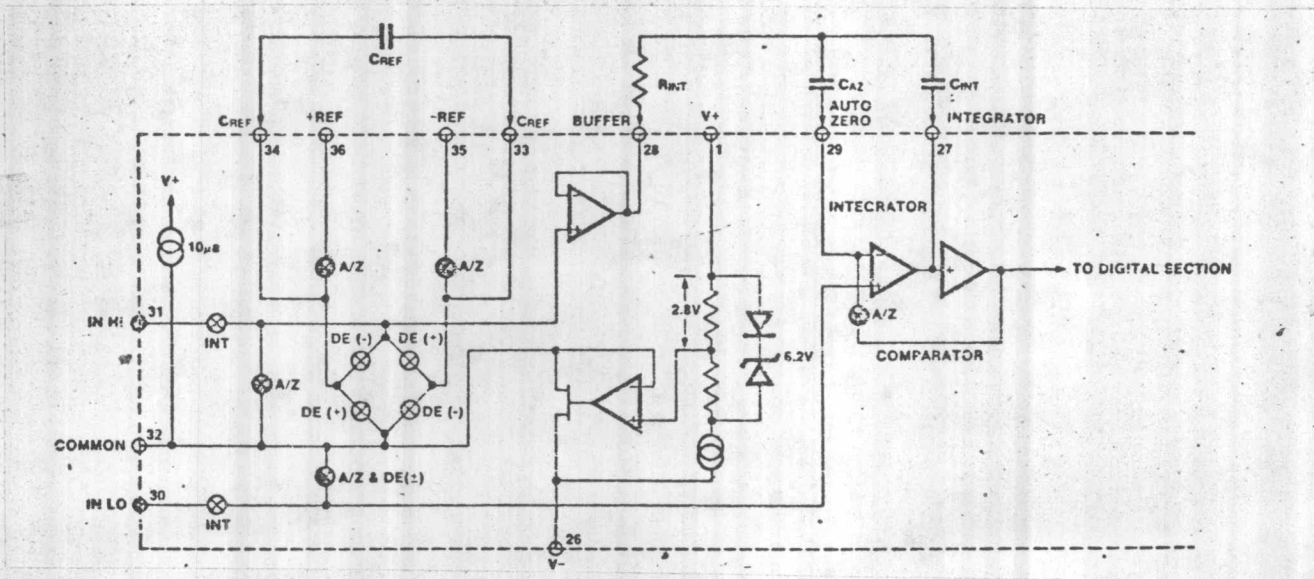
$$\begin{aligned} \Delta v_{o_{t_1}} + \Delta v_{o_{t_x}} &= 0 \\ \Delta v_{o_{t_1}} &= - \Delta v_{o_{t_x}} \\ \frac{t_1}{RC} V_{IN} &= \frac{t_x}{RC} V_R \\ t_x &= \frac{V_{IN}}{V_R} t_1 \quad (๔) \\ \text{หรือ} \quad V_{IN} &= \frac{t_x}{t_1} V_R \quad (๕) \end{aligned}$$

๔.๔ 3 1/2 digit single chip analog-to-digital converter

ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแอนาลอกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ทำงานแบบ dual slope integration ซึ่งแบ่งออกได้เป็น ๓ ภาค คือภาคแอนาลอก, ภาคดิจิทัล และภาคสัญญาณนาฬิกา (clock pulses)

๔.๔.๑ ภาคแอนาลอก เมื่อมีสัญญาณแอนาลอกเข้ามาทาง input การทำงานของภาคแอนาลอกจะเกิดการ ทำงานเป็น ๓ ช่วงคือ

๔.๔.๑.๑ ช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติ (auto-zero phase, A/Z) การทำงานในช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติ A/Z ซึ่งแสดงในรูปที่ ๔.๔ จะต้องวงจรทำให้ขั้ว input high และ input low (ขั้ว ๓๑ และ ๓๐) ไม่ถูกต่อเข้ากับวงจรโดยการเปิดวงจรของ INT แต่ A/Z จะต่อขั้ว IN HI และ IN LO ภายในเข้ากับ COMMON (ขั้ว ๓๒) ตัวเก็บประจุ C_{REF} จะถูกประจุให้มีแรงดันเป็น V_{REF} เนื่องจาก A/Z ทำงานต้องวงจรทำให้มีการบ่อนกลับครบรอบเพื่อประจุ C_{AZ} ให้มีแรงดันชดเชยกับผลของค่า offset ในภาค buffer, integrator และ comparator นั่นคือก่อนทำการวัดจะต่อขั้ว input ลง ground เพื่อให้ output เป็นศูนย์จริง ๆ แล้วดูผลแรงดัน offset ต่าง ๆ ที่ทำให้ output คลาดเคลื่อนไป แล้วบ่อนกลับมาเก็บไว้ที่ C_{AZ} เพื่อสร้างผลหักล้างกับค่า offset เมื่อทำการวัดจริง



รูปที่ ๔.๔ แสดง Block diagram ของภาคแอนาล็อกของ analog-to-digital converter

๔.๔.๑.๒ ช่วง integrate สัญญาณ (signal integrate phase, INT)

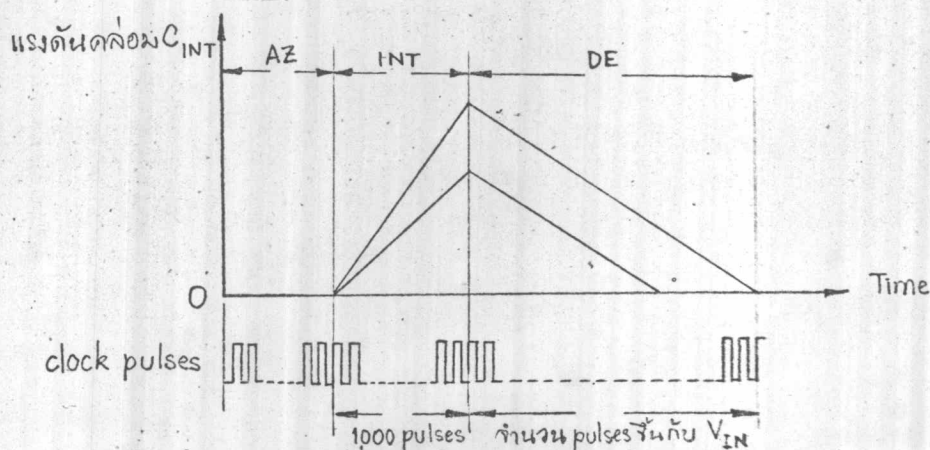
ในช่วงนี้ A/Z จะเปิดวงจรทำให้การบ่อนกกลับยุติลง และ INT จะปิดวงจรเพื่อต่อสัญญาณ input เข้ามาทางขั้ว IN HI และ IN LO ขณะนี้วงจร integrator จะทำงานโดย C_{INT} จะถูกประจุตามความแตกต่างของสัญญาณแรงดันขาเข้า คือระหว่าง IN HI และ IN LO ในช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งคงที่ กำหนดมาจากสัญญาณ clock pulses (โดยทั่วไปจะใช้ clock pulses จำนวน ๑,๐๐๐ ลูก) แล้ววงจร integrator ก็จะหยุดทำงาน ดังนั้น แรงดันคล่อม C_{INT} จะมีค่าเป็นปฏิภาคกับสัญญาณแรงดันขาเข้า และที่รู้ขั้วของสัญญาณคล่อม C_{INT} ด้วยว่าเป็นบวกหรือลบ

๔.๔.๑.๓ ช่วง deintegrate (deintegrate phase, DE) ในช่วงนี้

DE จะปิดวงจรเพื่อต่อ IN LO เข้ากับขั้ว COMMON อย่างภายใน และจะต่อ C_{REF} คล่อม

ระหว่างช่วง IN HI และ IN LO วงจร integrator จะเริ่มทำงานในทิศทางที่จะให้ output ค่อย ๆ ลดลงอย่างเป็นเส้นตรงจนเป็น ๐ โวลต์ คือทำให้แรงดันคล่อม C_{INT} ลดลงเป็น ๐ โวลต์ เวลาที่ทำให้ output เป็น ๐ โวลต์นั้นจะเป็นอัตราส่วนกับสัญญาณแรงดันขาเข้าจำนวน clock pulses ในช่วงนี้จะถูกแปลงไปปรากฏเป็นตัวเลข ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น $1,000 \frac{V_{IN}}{V_{REF}}$

การทำงานของ dual slope integration นี้จะทำให้แรงดัน offset ในภาคต่าง ๆ ถูกหักล้างหมดไป เพราะในช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติค่า offset ที่เกิดในภาคต่าง ๆ จะถูกนำไปเก็บไว้ใน C_{AZ} เพื่อหักล้างกับค่า offset เมื่อทำการวัดจริง ดังนั้นความแม่นยำของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าของ V_{REF} และเสถียรภาพของ clock pulses.

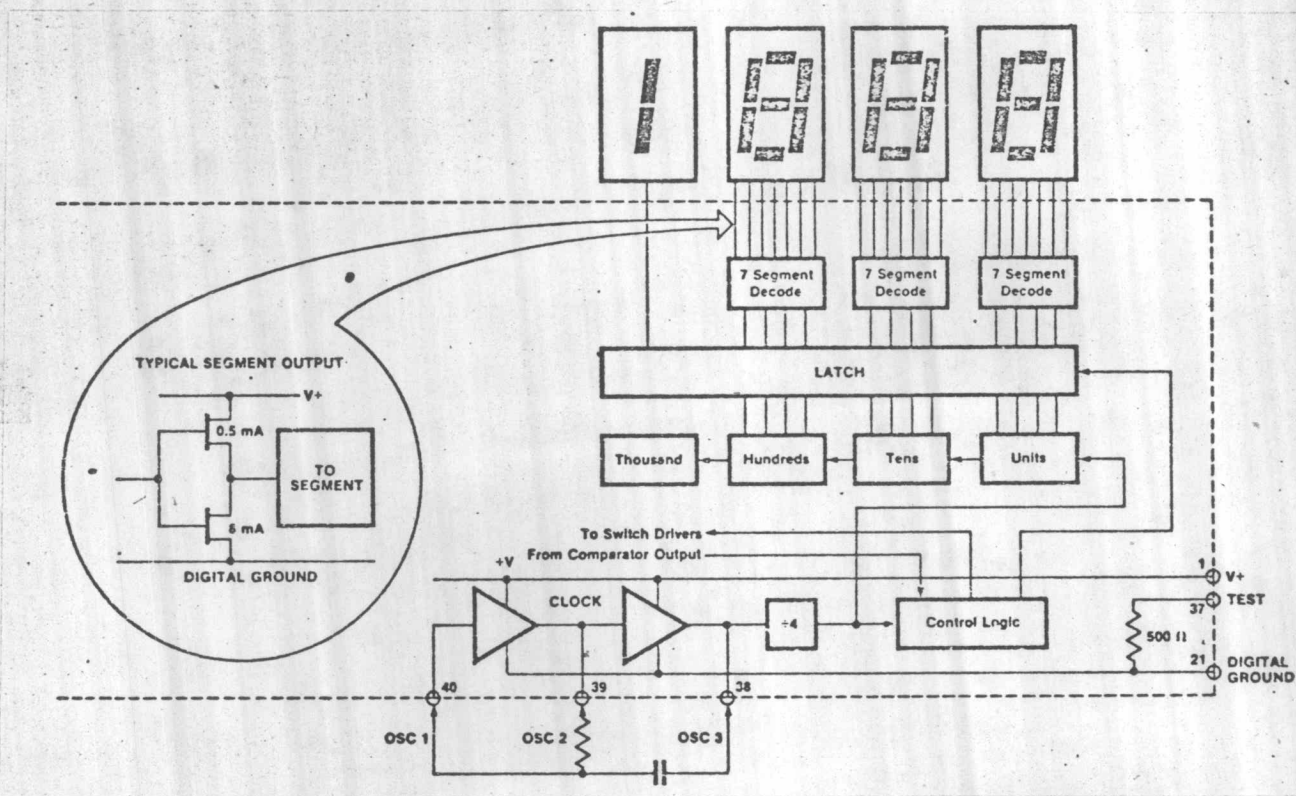


รูปที่ ๔.๔ แสดงแรงดันคล่อม C_{INT} ในช่วงเวลาทั้ง ๓ ช่วง และจำนวน clock pulses

๔.๔.๒ ภาคดีจิตอล ภาคดีจิตอลนี้จะเป็นวงจรนับจำนวน clock pulses ที่เกิดในช่วง deintegrate แล้วแปลงจากจำนวน clock pulses ไปเป็นตัวเลข แสดงออกมาเป็นตัวเลข ๔ หลัก ถ้าสัญญาณที่เข้ามาทาง input มีค่าสูงกว่าค่าเต็มสเกลของวงจรภาคดีจิตอล จะแสดงตัวเลขออกมาเป็นเลข ๑ ส่วนอีก ๓ หลักด้านขวามือจะดับหมด

๔.๔.๓ ภาคสัญญาณนาฬิกา เป็นภาคที่สร้างความถี่ด้วยวงจร astable multivibrator เป็น clock pulses ขนาด ๕ โวลต์ แล้วหารด้วย ๔ เพื่อเป็นสัญญาณให้แกภาคดีจิตอล เช่นถ้าผลิตความถี่ของ clock pulses ออกมา ๔๔ กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อผ่านวงจรหาร ๔ ก็จะได้ clock pulses ที่มีความถี่ ๑๑ กิโลเฮิร์ตซ์ นั่นคือในเวลา ๑ วินาที จะมี

clock pulses ออกไป ๑๒,๐๐๐ ลูก ซึ่งจำนวน clock pulses จะเป็นตัวกำหนดการทำงาน
 ในภาคแอนาล็อกในแต่ละช่วง ถ้าสัญญาณที่เข้ามาทาง input มีค่าเต็มสเกลพอดี ช่วง integrate
 สัญญาณจะใช้ clock pulses ๑,๐๐๐ ลูก, ช่วง deintegrate สัญญาณจะใช้ clock pulses
 ๒,๐๐๐ ลูก และช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติจะใช้ clock pulses ๑,๐๐๐ ลูก



รูปที่ ๔.๖ แสดง Block diagramของภาคดิจิทัล และภาคสัญญาณนาฬิกา

ดังนั้น การอ่านค่าสัญญาณที่เข้ามาทาง input ให้ปรากฏเป็นตัวเลขครั้งหนึ่ง ๆ ต้องใช้จำนวน
 clock pulses ๔,๐๐๐ ลูก แต่ใน ๑ วินาทีจะมี clock pulses ๑๒,๐๐๐ ลูก นั่นคือ
 สามารถอ่านค่าได้ ๓ ครั้งใน ๑ วินาที จำนวน clock pulses ในช่วง integrate สัญญาณ
 จะมีค่าคงที่เสมอไม่เปลี่ยนแปลง จึงทำให้จำนวน clock pulses ในช่วง deintegrate สัญ-
 ญาณและช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติเปลี่ยนแปลงไป ถ้าขนาดสัญญาณที่เข้ามาทาง input น้อยกว่าค่า
 เต็มสเกล จะทำให้จำนวน clock pulses ในช่วง deintegrate น้อยกว่า ๒,๐๐๐ ลูก แต่

ช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติจะมากกว่า ๑,๐๐๐ จุก ถ้าขนาดสัญญาณที่เข้ามาทาง input เป็นศูนย์ช่วง integrate สัญญาณจะใช้ clock pulses ๑,๐๐๐ จุก, ช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติจะใช้ clock pulses ๓,๐๐๐ จุก ส่วนช่วง deintegrate จะไม่มี ดังนั้นการอ่านค่าสัญญาณที่เข้ามาทาง input ให้เป็นตัวเลข สามารถอ่านได้ ๓ ครั้งใน ๑ วินาที เช่นกัน

๔.๔.๔ ค่าต่าง ๆ ของวงจรภายนอกที่เลือกใช้ สำหรับค่าเต็มสเกลของสัญญาณ input ๒ โวลต์

R_{INT} หรือ R_2 เป็นค่าความต้านทาน output ของ buffer และเป็นความต้านทาน input ของ integrator ต้องมีขนาดใหญ่พอสำหรับค่าเต็มสเกลของสัญญาณ input ขนาด ๒ โวลต์

$$R_{INT} = 470 \text{ k}\Omega$$

C_{INT} หรือ C_3 ต้องมีค่าที่จะทำให้ voltage swing ได้มากที่สุดโดยไม่ทำให้ output ของ integrator เกิดการอิ่มตัว (saturated) สำหรับแหล่งจ่ายไฟ ± 5 โวลต์ โดยต่อขั้ว analog common เข้า ground ค่าที่ swing ได้ควรเป็น ± 3.5 ถึง ± 4 โวลต์ สำหรับการอ่านค่า ๓ ครั้งใน ๑ วินาที (48 kHz clock pulses)

$$C_{INT} = 0.22 \text{ }\mu\text{F}$$

C_{AZ} หรือ C_2 เป็นตัวเก็บค่า offset รวมทั้ง noise ที่เกิดขึ้นในวงจร

$$C_{AZ} = 0.047 \text{ }\mu\text{F}$$

C_{REF} หรือ C_1 เป็นตัวเก็บประจุจากแรงดันอ้างอิงไปเปรียบเทียบกับสัญญาณ input จึงต้องมีความแม่นยำพอสมควร

$$C_{REF} = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$$

วงจรสร้างเวลาที่ (R_3 และ C_4) เป็นวงจร astable multivibrator ซึ่งมี

R_3 และ C_4 เป็นตัวกำหนดความถี่ด้วยสมการ

$$f = \frac{0.45}{RC} \text{ Hz}$$

สำหรับ clock pulse 48 kHz เลือกค่าความต้านทาน $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$

จากสมการข้างบน $\therefore C = 100 \text{ pf}$

แรงดันอ้างอิง (R_1 และ R_4) แรงดันอ้างอิงได้มาจากแหล่งจ่ายไฟ โดยใช้ความต้านทาน R_1 และ R_4 เป็นตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (potential divider) เนื่องจากความสัมพันธ์ของสัญญาณ input เต็มสเกลกับแรงดันมาตรฐานเป็น

$$V_{in} = 2 V_{REF}$$

สำหรับแรงดัน input เต็มสเกลเป็น ๒ โวลต์ ดังนั้น

$$V_{REF} = \frac{V_{in}}{2} = 1 \text{ โวลต์}$$

เลือกค่าความต้านทานแบ่งแรงดันได้

$$R_1 = 1.5 \text{ k}\Omega$$

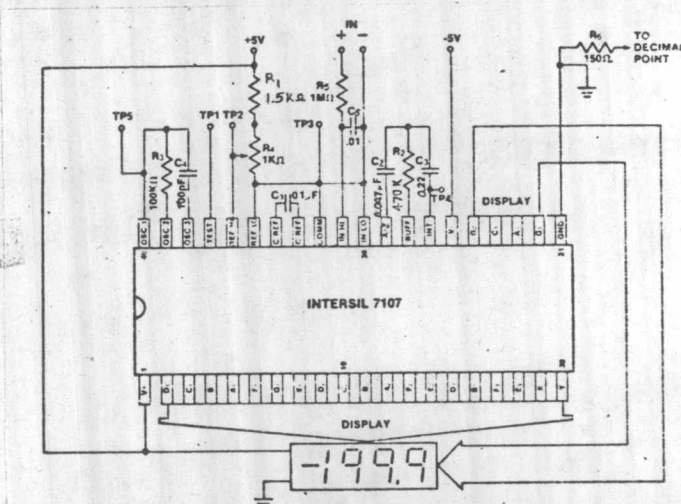
$$R_4 = 1 \text{ k}\Omega \text{ (ปรับค่าความต้านทานได้)}$$

R_5 และ C_5 ทำหน้าที่ตัดสัญญาณรบกวนไฟสลับที่อาจแทรกเข้ามาบนทางด้าน input

$$R_5 = 1 \text{ M}\Omega$$

$$C_5 = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$$

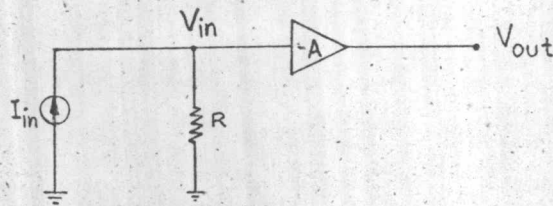
๔.๔.๔ วงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ICL 7107)



รูปที่ ๔.๗ แสดงการต่อวงจรของ ICL 7107

๔.๕ วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้า

วงจรที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันอย่างเส้นตรงที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ Operational amplifier หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ออปแอมป์ (op-amp) ด้วยการใช้ความต้านทานต่อทางค่าน input ของออปแอมป์ เพื่อให้เกิดแรงดันขึ้น ดังแสดงในรูปที่ ๔.๘



รูปที่ ๔.๘ แสดงการต่อวงจรขยายแรงดัน

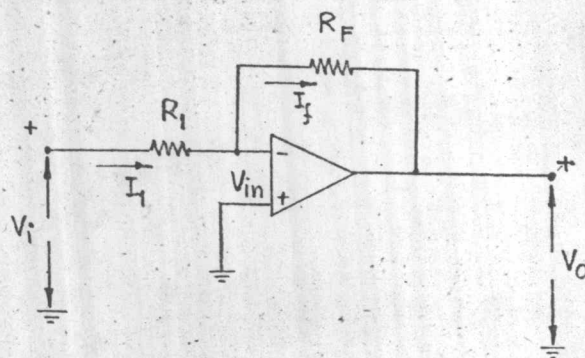
จากรูปที่ ๔.๘, ออปแอมป์มีอัตราขยาย = $-A$ และมีค่า input impedance สูงมาก กระแส I_{in} ไหลครบวงจรด้วยความต้านทาน R ทำให้เกิดแรงดันขาเข้าของออปแอมป์เป็น $I_{in} \cdot R$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_{out} &= (-A) I_{in} R \\ &= -(A \cdot R) I_{in} \end{aligned}$$

$$\therefore V_{out} \propto I_{in}$$

๔.๕.๑ ออปแอมป์ มีลักษณะการทำงานเป็นวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า มีค่า input impedance สูงมาก แต่ output impedance ต่ำ และมีอัตราขยายสัญญาณสูงมาก การต่อวงจรออปแอมป์ แบ่งออกได้เป็น ๓ แบบใหญ่ ๆ คือ วงจรขยายแบบ inverting, วงจรขยายแบบ non-inverting และวงจรขยายความแตกต่าง

๔.๕.๑.๑ วงจรขยายแบบ inverting เป็นการต่อวงจรขยายโดยต่อ input ขั้วบวกของออปแอมป์ ลง ground โดยตรงและสัญญาณ V_i ป้อนเข้า input ขั้วลบ โดยผ่านความต้านทาน R_1 มีการป้อนสัญญาณย้อนกลับ (feedback) จาก output มาเข้าที่ input ขั้วลบ ด้วยความต้านทาน R_F ดังแสดงในรูปที่ ๔.๙



รูปที่ ๔.๔ การต่อออปแอมป์แบบ inverting

input ขั้วลบของออปแอมป์เปรียบเสมือน ground ($V_{in} = 0$) ดังนั้น

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1}$$

และ

$$I_f = \frac{-V_o}{R_F}$$

แต่ $I_1 = I_f$ เพราะออปแอมป์มี input impedance สูงมากจนถือได้ว่าเป็น อนันต์ ดังนั้นจะไม่มีกระแสไหลเข้าขั้ว input ของออปแอมป์

$$\therefore \frac{V_i}{R_1} = \frac{V_o}{R_F}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

นั่นคือ, อัตราขยายแรงดันของ inverting ออปแอมป์ (A_v)

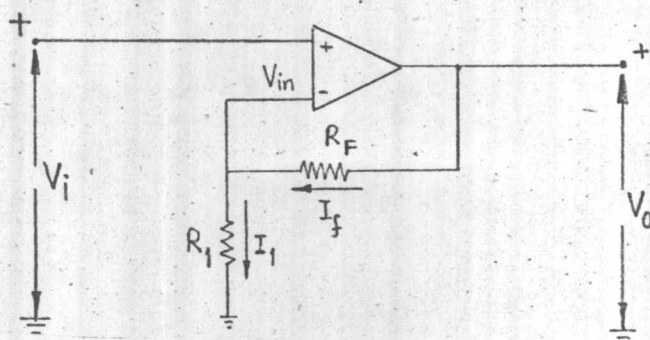
$$A_v = \frac{-R_F}{R_1}$$

เครื่องหมายลบแสดงว่าสัญญาณที่ input และ output ของออปแอมป์จะมีขั้วตรงข้ามกัน เนื่องจากขั้ว input ของออปแอมป์เปรียบเสมือนเป็น ground เมื่อมีความต้านทาน R_1 ต่อกับขั้ว input ลบ จึงทำให้สัญญาณ V_i มองเห็นความต้านทาน R_1 เพียงตัวเดียวดังนั้น input impedance ของออปแอมป์แบบ inverting จึงเป็น

$$Z_{in} = R_1$$

๔.๔.๑.๒ วงจรขยายแบบ non-inverting เป็นการต่อวงจรขยายโดยสัญญาณ

ญาณ V_i เข้าทาง input ขั้วบวก โดยตรง input ขั้วลบต่อกับความต้านทาน R_1 ลง ground มีการป้อนสัญญาณย้อนกลับจาก output โดยผ่านความต้านทาน R_F ดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๐



รูปที่ ๔.๑๐ การต่อออปแอมป์แบบ non-inverting

เนื่องจากไม่มีกระแสไหลเข้าที่ขั้ว input ของออปแอมป์ และ $V_{in} = 0$ ดังนั้น

V_i เปรียบเสมือนคล่อม R_1 อยู่

$$\therefore I_1 = \frac{V_i}{R_1}$$

และ V_o เป็นแรงดันตกคล่อม R_1 และ R_F

$$\therefore V_o = I_1 R_1 + I_f R_F$$

แต่ $I_1 = I_f$ (ไม่มีกระแสไหลเข้าขั้ว input ของออปแอมป์)

$$\therefore V_o = I_1 (R_1 + R_F)$$

แทนค่า $I_1 = \frac{V_i}{R_1}$ จะได้

$$V_o = \frac{V_i}{R_1} (R_1 + R_F)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

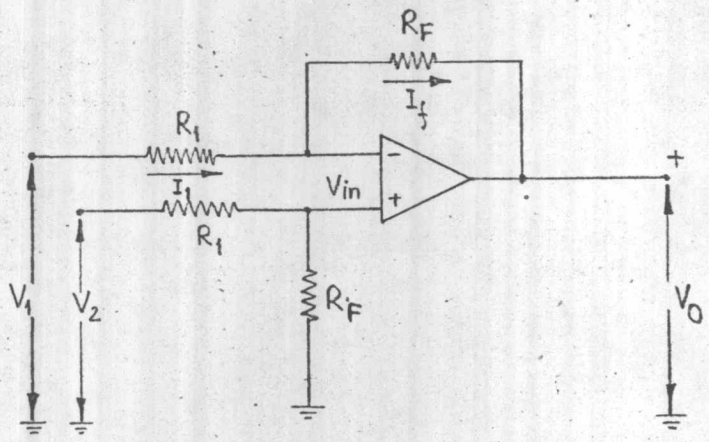
นั่นคืออัตราขยายแรงดันของ non-inverting ออปแอมป์ (A_v)

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

สำหรับวงจรขยายแบบ non-inverting นี้สัญญาณ input และ output จะมี
 ขั้วเหมือนกัน มีอัตราขยายต่ำสุดเป็น ๑ สัญญาณ V_i จะมองเห็น input impedance เป็นอนันต์
 เพราะขั้ว input ไม่ได้ดึงกระแสจากสัญญาณ input เลย แต่ในทางปฏิบัติ input impedance
 สำหรับออปแอมป์แต่ละตัวจะมีค่าต่างกัน แล้วแต่ค่าที่โรงงานผลิตออกมา

$$Z_{in} = \infty$$

๔.๕.๑.๓ วงจรขยายความแตกต่าง เป็นการรวมวงจรขยายแบบ inverting เข้า
 กับ non-inverting ด้วยการป้อนสัญญาณ input ๒ ขุด เข้าที่ input ขั้วบวก และ input
 ขั้วลบของออปแอมป์ เพื่อให้วงจรขยายความแตกต่างของสัญญาณที่ขั้วทั้งสองของออปแอมป์ไปอยู่ที่
 output ดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๑



รูปที่ ๔.๑๑ การต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่าง

ลักษณะการต่อวงจรแบบขยายความแตกต่าง ความต้านทาน R_F ที่ต่อระหว่าง out-
 put กับ input ขั้วลบ ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณ output กลับมา ในลักษณะของการต่อวงจรแบบ
 inverting ส่วน R_F ที่ต่อระหว่าง input ขั้วบวกกับ ground ทำหน้าที่แบ่งแรงดัน V_2
 จากรูปที่ ๔.๑๑, ความต่างศักย์ไฟฟ้าของแรงดันระหว่างขั้ว input ทั้งสองเป็น $(V_1 - V_2)$ ดังนั้น
 อัตราขยายแรงดันของวงจรขยายความแตกต่างจะได้

$$A_v = \frac{V_o}{(V_1 - V_2)} = \frac{-R_F}{R_1}$$

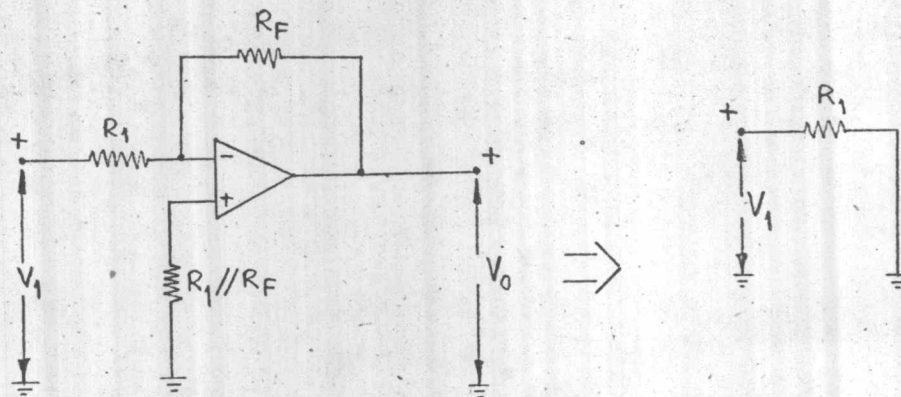
$$V_o = \frac{R_F}{R_1} (V_2 - V_1)$$

และ $Z_{in} = 2R_1$

วงจรขยายความแตกต่างมีข้อได้เปรียบตรงที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาทาง input ทั้งสองได้ ถ้ามีสัญญาณไฟสลับ 50 Hz เข้ามารบกวนวงจรก็จะมี noise เข้ามาทั้งสอง input เท่า ๆ กัน และมีขนาดเท่า ๆ กัน ซึ่งในที่สุดจะหักล้างกันเอง เพราะขั้วทั้งสองมีขั้วตรงข้ามกัน แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวนก็อาจจะถูกหักล้างไม่หมด เนื่องจากค่าความต้านทาน R_1 ที่ต่อเข้าที่ขั้ว input ทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันพอดี

อย่างไรก็ตาม, ค่า input impedance ของวงจรขยายความแตกต่างจะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันที่ป้อนเข้ามาทาง input ดังนี้

เมื่อ $V_2 = 0$ คือเมื่อต่อ V_2 ลง ground

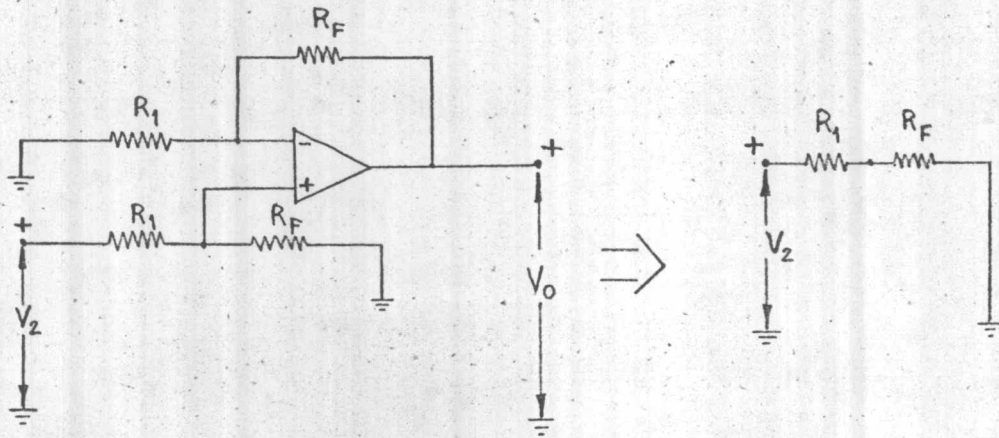


รูปที่ ๔.๑๒ รูปแสดงการต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่างเมื่อ $V_2 = 0$ และวงจรสมมูลย์ของ input impedance

ถ้าป้อนสัญญาณ input V_1 เข้าทาง input ขั้วลบเพียงสัญญาณเดียว, $V_2 = 0$ วงจรก็จะกลายเป็นวงจรขยายแบบ inverting ค่าความต้านทาน R_1 ขนานกับ R_F จะเป็นตัวช่วยลดสัญญาณรบกวนทาง input ได้

$$\therefore Z_{in} = R_1$$

เมื่อ $V_1 = 0$ คือเมื่อต่อ V_1 ลง ground

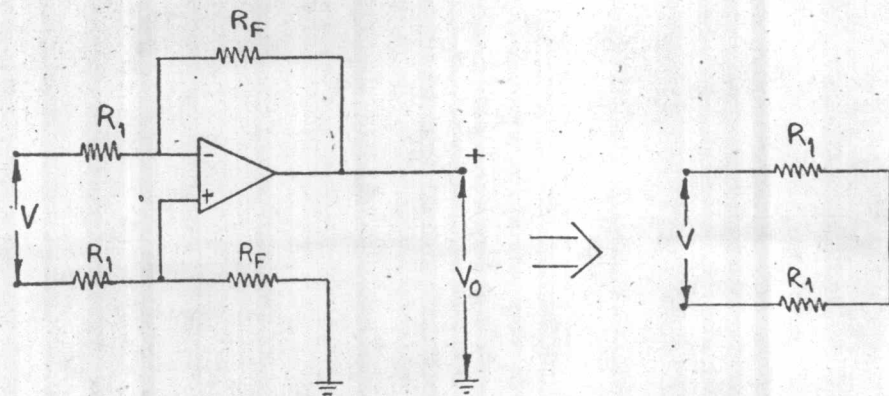


รูปที่ ๔.๑๓ รูปแสดงการต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่าง เมื่อ $V_1=0$ และวงจรสมมูลย์ของ input impedance

ถ้าป้อนสัญญาณ input V_2 เข้าทาง input ขั้วบวกเพียงสัญญาณเดียว, V_1 ต่อลง ground เนื่องจาก input ของออปแอมป์เปรียบเสมือน ground คือจะไม่ถึงกระแส ดังนั้น R_1 และ R_F จะเป็นตัวดึงกระแสจากสัญญาณ input

$$\therefore Z_{in} = R_1 + R_F$$

เมื่อแรงดัน input เป็น V



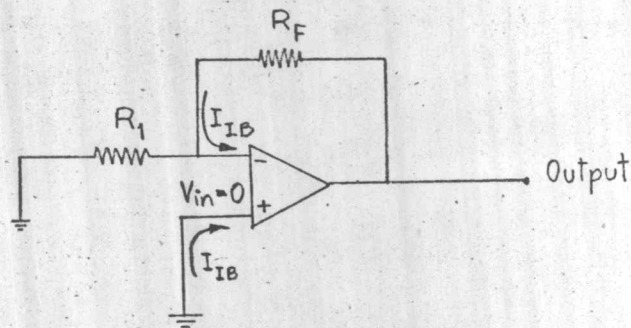
รูปที่ ๔.๑๔ รูปแสดงการต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่าง และวงจรสมมูลย์ของ input impedance

เมื่อป้อนสัญญาณเข้าทั้งสองขั้วของออปแอมป์ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันที่ขั้วของออปแอมป์เป็น V เนื่องจาก input ของออปแอมป์เปรียบเสมือน ground ก็จะไม่ดึงกระแส ดังนั้น ความต้านทาน R_1 ที่ input ขั้วลบและความต้านทาน R_1 ที่ input ขั้วบวกจะเป็นตัวดึงกระแสจากสัญญาณ input V นั่นคือ

$$Z_{in} = 2 R_1$$

๔.๕.๒ ความคลาดเคลื่อนของแรงดัน output (output offset voltage, V_{oo})
ความคลาดเคลื่อนของแรงดัน output มีสาเหตุเกิดได้ ๔ ประการ คือกระแสไบแอสที่ input (input bias current, I_{IB}) , กระแส offset ที่ input (Input offset current, I_{IO}) , แรงดัน offset ที่ input (Input offset voltage, V_{IO}) และการ drift

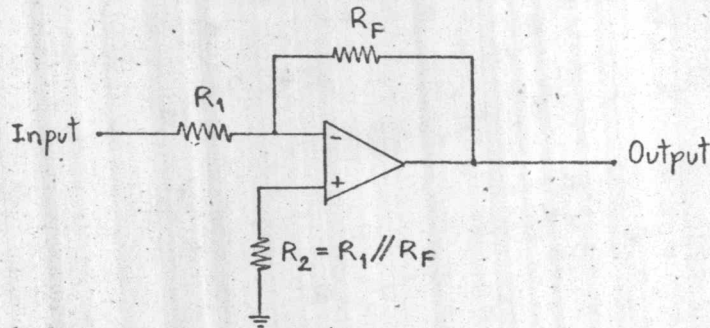
๔.๕.๒.๑ กระแสไบแอสที่ input (I_{IB}) กระแส I_{IB} เป็นกระแสรั่วไหลที่เข้าทางขั้ว input ของออปแอมป์ มีค่าประมาณ ๐.๑ - ๒,๐๐๐ นาโนแอมป์



รูปที่ ๔.๑๕ การต่อวงจรแบบ inverting เมื่อสัญญาณ input ต่อลง ground
จากรูปที่ ๔.๑๕, สัญญาณ input ของวงจรเป็น ๐ โวลต์ แต่ขั้ว input บวกและขั้ว input ลบจะดึงกระแส I_{IB} กระแส I_{IB} ที่เข้า input ขั้วลบจะไหลผ่านความต้านทาน R_F แต่ไม่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 เพราะปลายทั้งสองข้างของความต้านทาน R_1 เป็น ๐ โวลต์เหมือนกัน เป็นเหตุให้แรงดันทาง output สูงขึ้นจาก ๐ โวลต์ เป็น $I_{IB} \cdot R_F$ นั่นคือเกิดความคลาดเคลื่อนของแรงดันทางด้าน output

การเลือกค่า R_F จึงจำเป็นเพราะจะมีผลให้ V_{oo} มีค่าสูงขึ้น ค่า I_{IB} สำหรับ

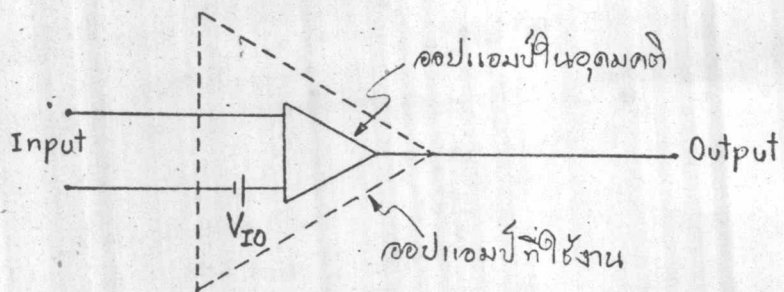
ออปแอมป์แต่ละตัวไม่สามารถจะลดลงได้ จึงต้องลดผลของ I_{IB} ลงโดยพยายามทำให้ I_{IB} ที่ไหลเข้า input ขั้วบวก และขั้วลบมีค่าเท่ากัน จะได้หักล้างกันไป ด้วยการต่อความต้านทาน R_2 เข้าที่ input ขั้วบวก ซึ่งมีค่าเท่ากับความต้านทาน R_1 ขนานกับ R_F



รูปที่ ๔.๑๖ วงจรขยายแบบ inverting เมื่อต่อความต้านทาน R_2 ที่ input ขั้วบวก

๔.๕.๒.๒ กระแส offset ที่ input (I_{IO}) เนื่องจากไม่สามารถทำให้ input ขั้วบวก และขั้วลบดึงกระแส I_{IB} ได้เท่ากันพอดี ดังนั้นจึงยังคงมีความแตกต่างระหว่าง I_{IB} ที่ไหลเข้า input ขั้วบวก และขั้วลบ กระแสนี้เรียกว่า "กระแส offset ที่ input" ซึ่งมีค่าประมาณ ๑๐-๓๐% ของ I_{IB}

๔.๕.๒.๓ แรงดัน offset ที่ input (V_{IO}) เนื่องจากภายในตัวออปแอมป์ มีความแตกต่างกันภายในทางด้านแรงดัน ความแตกต่างนี้สามารถเขียนแทนด้วยเซลล์แบตเตอรี่ แรงดันที่แตกต่างนี้เรียกว่า "แรงดัน offset ที่ input"

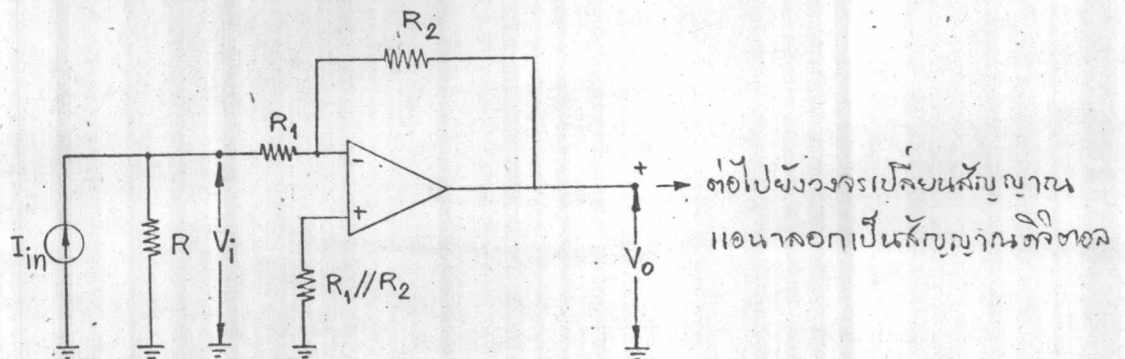


รูปที่ ๔.๑๗ แสดงการแทนออปแอมป์ที่ใช้จริงด้วยออปแอมป์ในอุดมคติ และเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งแทนค่า V_{IO}

การใส่ V_{IO} จะใส่ที่ input ขั้วบวก หรือขั้วลบก็ได้ ใส่ทาง input ขั้วบวกง่ายกว่า เพราะไม่ต้องวุ่นวายกับวงจรบ้อนสัญญาณกลับ ขั้ว V_{IO} จะกลับขั้วบวกหรือลบก็ได้ ถ้าเราวัด V_{oo} ออกมาเป็นบวก เมื่อเทียบกับ ground ก็แสดงว่า V_{IO} มีทิศทางการต่อเหมือนในรูปที่ ๔.๑๗ ผลของ V_{IO} ก็เหมือนกับว่ามีสัญญาณ V_{IO} บ้อนเข้ามาทาง input ขั้วบวก ดังนั้น V_{IO} ก็จะถูกขยายแบบ non-inverting ไปออกที่ output ด้วย อัตราขยายเท่ากับ $(1 + \frac{R_F}{R_1})$ อัตราขยายของ V_{IO} นี้เรียกว่า "Noise gain"

๔.๕.๒.๔ การ drift คือการเปลี่ยนแปลงค่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ค่า I_{IB} , I_{IO} และ V_{IO} จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าได้ รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟที่ไม่คงที่ ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ไม่สามารถแก้ไขได้ แต่ทำให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดได้ ด้วยการควบคุมอุณหภูมิทำงานให้คงที่ และสร้างแหล่งจ่ายไฟให้แรงดันไฟฟ้าคงที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ก็เลือกออปแอมป์ที่มีสัมประสิทธิ์ การเปลี่ยนแปลงค่าของ I_{IB} , I_{IO} และ V_{IO} ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปให้มิต้านน้อยที่สุด

๔.๕.๓ วงจรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบสร้าง เนื่องจากสัญญาณที่ต้องการวัดได้มาจากแหล่งกำเนิดกระแส แต่เครื่องมือวัดใช้กับแรงดันไฟฟ้า จึงต้องเปลี่ยนสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า โดยต่อความต้านทานคล่อมแหล่งกำเนิดกระแส เพื่อสร้างแรงดันแล้วบ้อนเข้าไปในวงจรขยายแรงดันแบบ inverting เพื่อขยายสัญญาณแรงดันออกทาง output ไปยังวงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนาลอก เป็นสัญญาณดิจิทัลอีกทีหนึ่ง ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสจากแหล่งกำเนิดกระแสจะเป็นปฏิภาคกับสัญญาณแรงดันขาออกของออปแอมป์ ดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๘



รูปที่ ๔.๑๘ วงจรเปลี่ยนกระแส I_{in} เป็นแรงดัน V_o

จากรูปที่ ๔.๑๘ $V_i = I_{in} R.$

เนื่องจากเป็นวงจรขยายแบบ inverting ดังนั้น

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

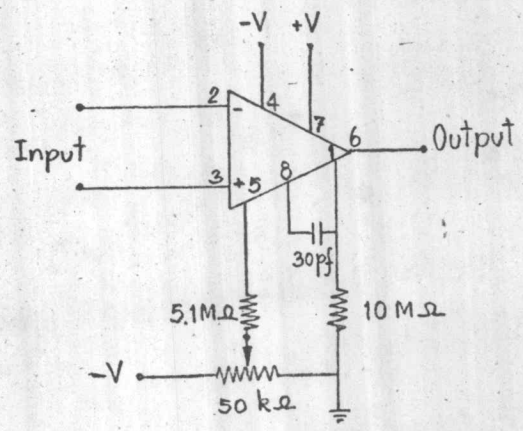
$$= -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) I_{in} R$$

$$\therefore V_o \propto I_{in}$$

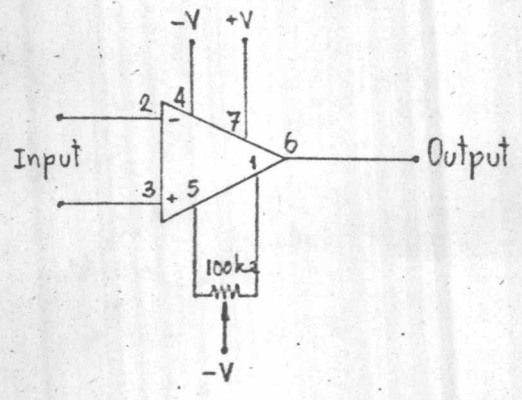
เมื่อต่อความต้านทาน R_1 ขนานกับความต้านทาน R_2 เข้าที่ input ขั้วบวกของออปแอมป์ จึงถือได้ว่าผลของ I_{IB} ถูกแก้ไขได้หมดแล้ว จึงเหลือแต่ผลของ I_{IO} และ V_{IO} เท่านั้น ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนของแรงดัน output สูงสุดจะเป็น

$$\therefore V_{oo(max)} = I_{IO(max)} R_2 + V_{IO(max)} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน output จะแก้ไขให้เป็นศูนย์ได้โดยต่อวงจรภายนอกเพื่อแก้ค่า offset นี้ ซึ่งออปแอมป์ทั่วไปจะมีขั้วสำหรับต่อให้



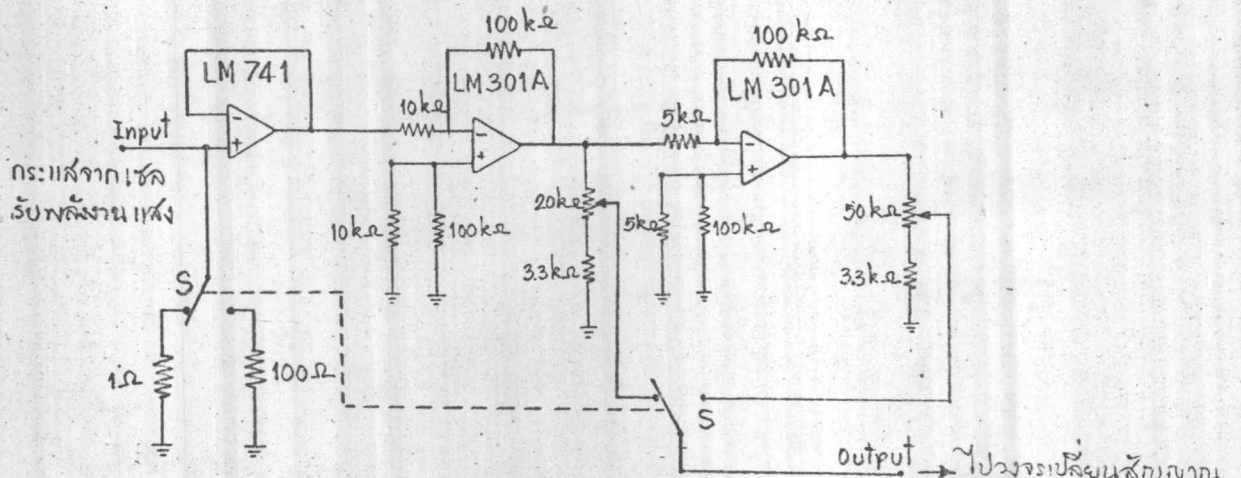
(ก) LM 301A



(ข) LM 741

รูปที่ ๔.๑๘ แสดงการต่อวงจรภายนอกเพื่อแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน output

เครื่องมือวัดพลังงานแสงที่ออกแบบสร้างนี้สามารถอ่านค่ากระแส input ได้ ๒ ช่วง คือ ขนาดของกระแส input มีขนาดเป็นไมโครแอมป์ และขนาดของกระแส input มีขนาดเป็นมิลลิแอมป์ ด้วยการโยกสวิตช์ S จากรูปที่ ๔.๒๐, เมื่อสวิตช์ S อยู่ในตำแหน่ง



รูปที่ ๔.๒๐ แสดงวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้า

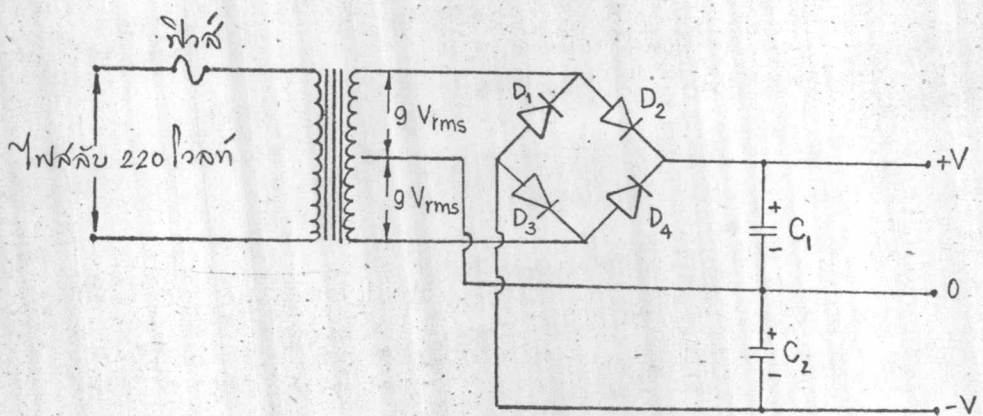
โหนดออกเป็นสัญญาณดิจิตอล

ต่อกับความต้านทาน ๑ โอห์ม กระแส input ที่วัดจะมีขนาดเป็นมิลลิแอมป์ ซึ่งจะไหลครบวงจรกับความต้านทาน ๑ โอห์ม เกิดแรงดันผ่าน buffer แล้วขยายแรงดันด้วยออปแอมป์ตัวแรก ซึ่งมีอัตราขยาย ๑๐ เท่า ผ่านออกไปทาง output และถ้าโยกสวิตช์ S ไปต่อกับความต้านทาน ๑๐๐ โอห์ม กระแส input ที่วัดจะมีขนาดเป็นไมโครแอมป์ ซึ่งจะไหลครบวงจรกับความต้านทาน ๑๐๐ โอห์ม เกิดแรงดันผ่าน buffer แล้วขยายแรงดันด้วยออปแอมป์ ๒ ตัว ตัวแรกมีอัตราขยาย ๑๐ เท่า ตัวที่สองมีอัตราขยาย ๒๐ เท่า ดังนั้น แรงดันนี้จะถูกขยายด้วยอัตราขยาย ๒๐๐ เท่า นอกจากนี้ความต้านทานปรับค่าได้ ๒๐kΩ และ ๕๐kΩ มีไว้สำหรับปรับค่า output ของขนาดกระแสเป็นมิลลิแอมป์ และไมโครแอมป์ตามลำดับ

๔.๖ แหล่งจ่ายไฟตรง

ใช้วงจร bridge rectifier ในการแปลงกระแสสลับขนาด ๒๒๐ โวลต์ ความถี่ ๕๐ เฮิร์ตซ์ ให้เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด + ๕ โวลต์ โดยทำงานร่วมกับวงจรควบคุมแรงดันคงที่ (voltage regulator)

๔.๖.๑ วงจร bridge rectifier ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด ๒๒๐ โวลต์ ทางด้าน input และ ๙ โวลต์ ทางด้าน output พร้อม center tap ต่อไดโอด ๔ ตัว ทำเป็นวงจร bridge rectifier ทางด้าน output ของวงจร bridge rectifier มีคาปาซิเตอร์ ต่อคล่อมอยู่เพื่อลดค่า ripple ดังแสดงในรูปที่ ๔.๒๑

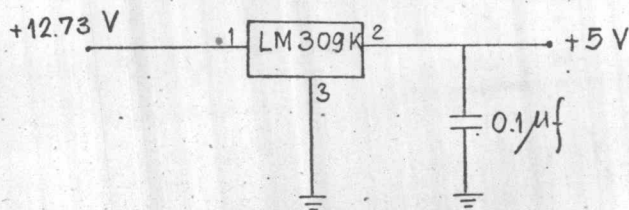


รูปที่ ๔.๒๑ แสดงการต่อวงจร bridge rectifier

จากรูปที่ ๔.๒๑ , $V = \sqrt{2} \cdot V_{rms}$
 $= \sqrt{2} \times 9 = 12.73$ โวลต์

๔.๖.๒ วงจรควบคุมแรงดันคงที่ เป็นวงจรควบคุมแรงดัน output ที่จ่ายไปให้ วงจรทั้งหมดมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

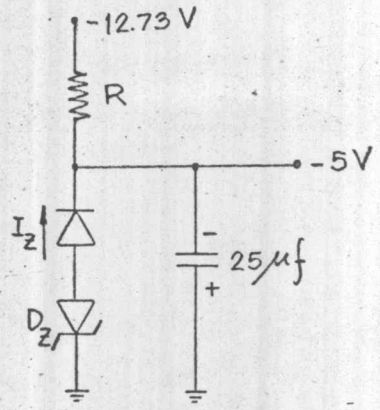
๔.๖.๒.๑ วงจรควบคุมแรงดัน +๕ โวลต์



รูปที่ ๔.๒๒ วงจรควบคุมแรงดัน +๕ โวลต์

เลือกใช้ IC (Integrated Circuit) เบอร์ LM 309 K ซึ่งให้แรงดัน output มีค่าคงที่ +๕ โวลต์ กระแส output ประมาณ ๑ แอมป์ จากการวัดกระแสใช้งานสูงสุดในวงจรมีค่า ๒๐๐ มิลลิแอมป์ โดยจ่ายไฟให้หลอด LED และวงจรต่าง ๆ

๔.๖.๒.๒ วงจรควบคุมแรงดัน -๕ โวลต์



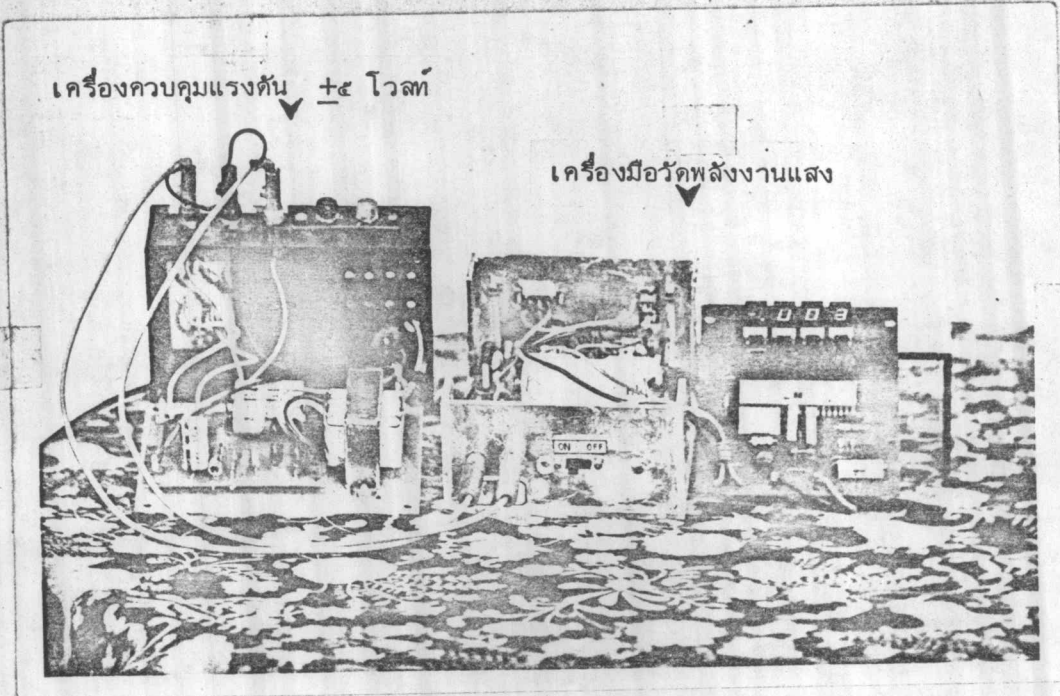
รูปที่ ๔.๒๓ วงจรควบคุมแรงดัน -๕ โวลต์

เลือกใช้ Zener diode ขนาด ๕ โวลต์ ทนกระแสไหลกลับ (I_Z) ได้ ๒๕ มิลลิแอมป์ ขนาด ๑/๒ วัตต์

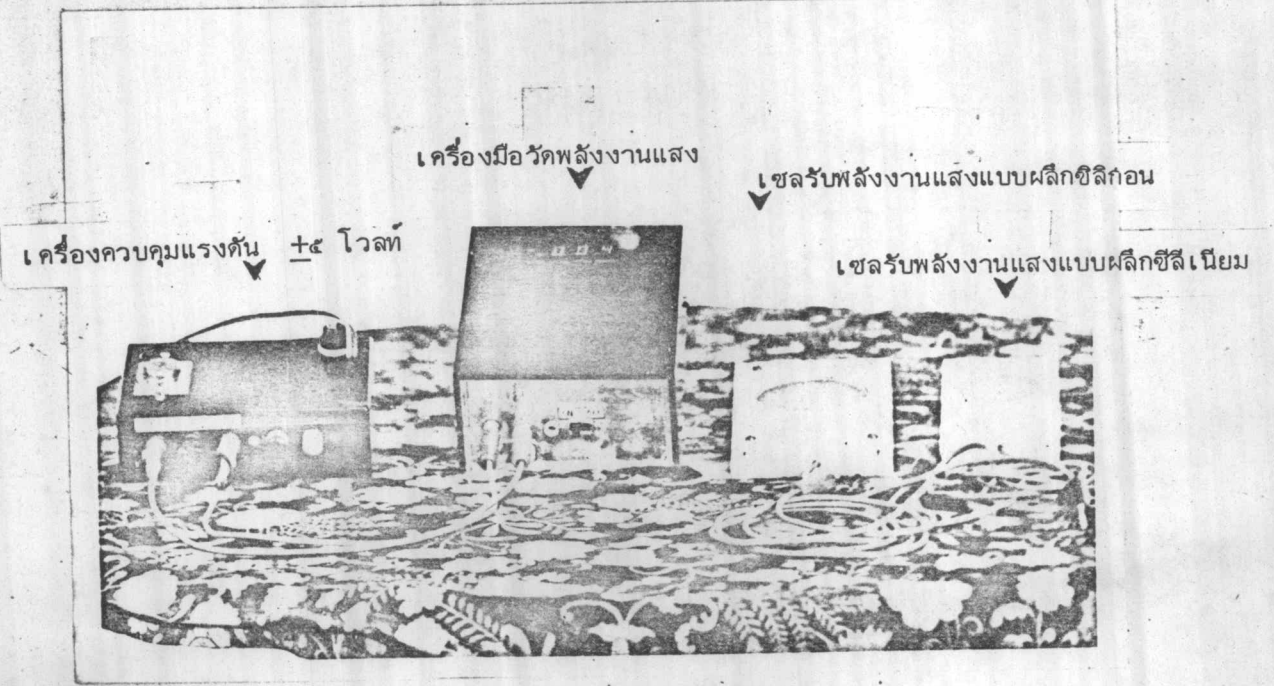
$$\begin{aligned} \therefore R &= \frac{V}{I_Z} = \frac{12.73 - 5}{25 \times 10^{-3}} \\ &= \frac{7.73 \times 10^3}{25} = 309.2 \text{ โอห์ม} \\ &\approx 300 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

เลือกค่าคาปาซิเตอร์ต่อคล่อม output ขนาด ๒๕ ไมโครฟารัด, แรงดันทำงาน ๑๐ โวลต์ จากการวัดกระแสใช้งานสูงสุดในวงจรมีค่า ๐.๗๔ มิลลิแอมป์

๔.๖.๓ เชลแบตเตอรี ประกอบด้วยเชลแบตเตอรีขนาด ๑.๕ โวลต์ ๔ ก้อน ๒ ชุด เพื่อจ่ายแรงดันขนาด +๖ โวลต์ ให้แก่เครื่องมือวัด เมื่อไม่ต้องการใช้จากแหล่งจ่ายไฟสลับ ๒๒๐ โวลต์ เชลแบตเตอรีทั้ง ๒ ชุดนี้ จะติดตั้งอยู่ในเครื่องมือวัด



รูปที่ ๔.๒๔ รูปวงจรภายในของเครื่องมือวัดพลังงานแสง



รูปที่ ๔.๒๕ รูปเครื่องมือวัดพลังงานแสงและเซลรับพลังงานแสง