

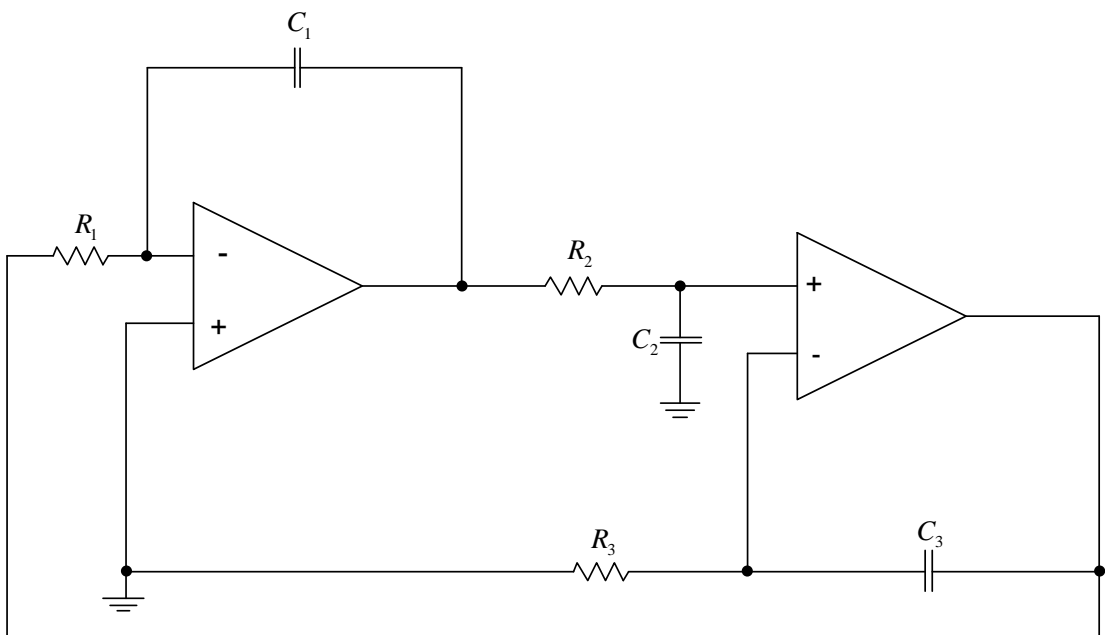
บทที่ 3

การดำเนินการสร้าง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอวงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์ที่ใช้โอปแอมป์และวงจรสายพานกระแสรุ่นที่ 2 เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักรวมทั้งหมด 4 วงจร โดยใช้อุปกรณ์พาสซีฟเป็นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ซึ่งหลักการทำงานและรายละเอียดของวงจรจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

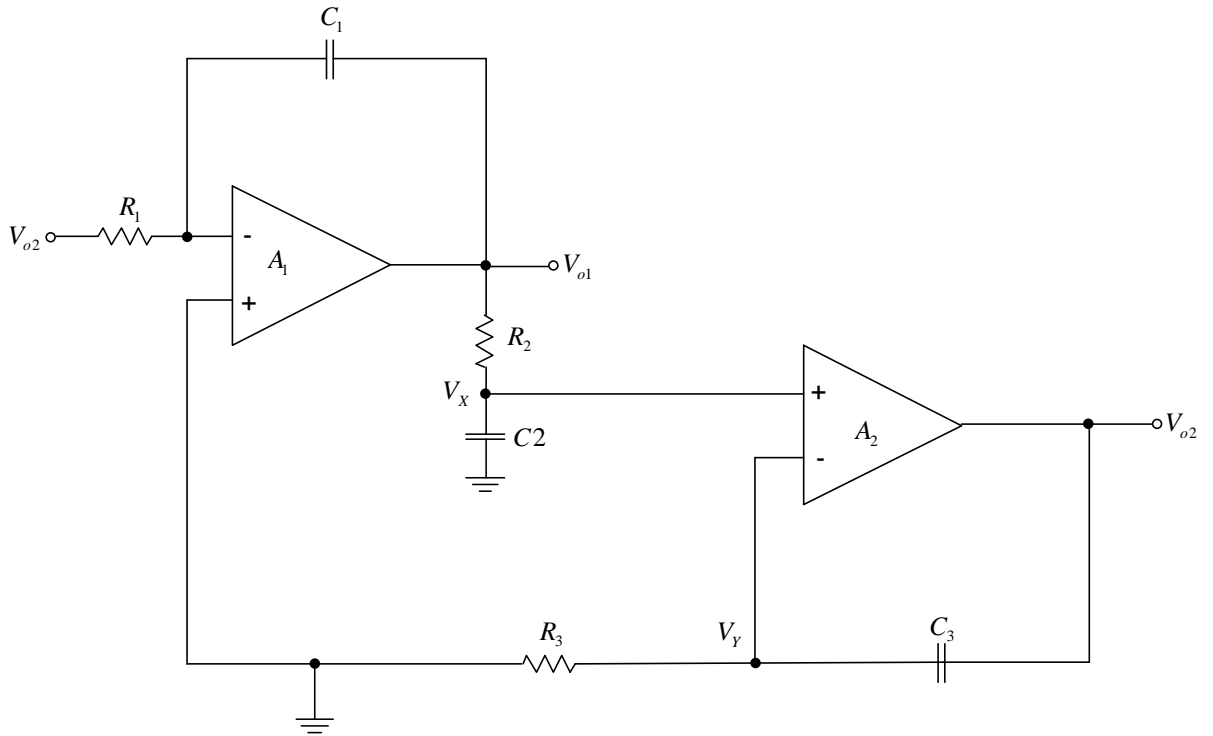
3.1 วงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในรูปแบบที่ 1

วงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์แบบนี้ประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ตัว และอุปกรณ์แบบพาสซีฟซึ่งได้แก่ตัวต้านทาน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 3 ตัวต่อกันในลักษณะป้อนกลับแบบบวก วงจรแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในรูปแบบที่ 1

จากวงจรในรูปที่ 3.1 เขียนวงจรใหม่ได้ดังรูปที่ 3.2 อธิบายหลักการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมแรงดันออสซิลเลเตอร์ในรูปแบบที่ 1 ที่ใช้วิเคราะห์วงจร

พิจารณาที่ออปแอมป์ตัวแรก A_1 หากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตทั้งสองได้เป็นดังนี้

$$V_{o1} = -\frac{1}{sC_1R_1}V_{o2} \quad (3.1)$$

พิจารณาที่ออปแอมป์ตัวแรก A_2 ใช้การแบ่งแรงดันที่โหนด V_x และ V_y ได้ความสัมพันธ์ตามลำดับดังนี้

$$V_x = \left(\frac{Z_{C2}}{Z_{C2} + R_2} \right) V_{o1} = \frac{1}{R_2C_2s + 1} V_{o1} \quad (3.2)$$

$$V_y = \frac{R_3}{R_3 + Z_{C3}} V_{o2} = \frac{R_3}{R_3C_3s + 1} V_{o2}$$

$$V_y = \frac{R_3C_3s}{R_3C_3s + 1} V_{o2} \quad (3.3)$$

จากคุณสมบัติของออปแอมป์แรงดันที่ขาบวกจะเท่ากับแรงดันที่ขาลบของออปแอมป์ ดังนั้นสมการ (3.2) และ (3.3) เท่ากัน

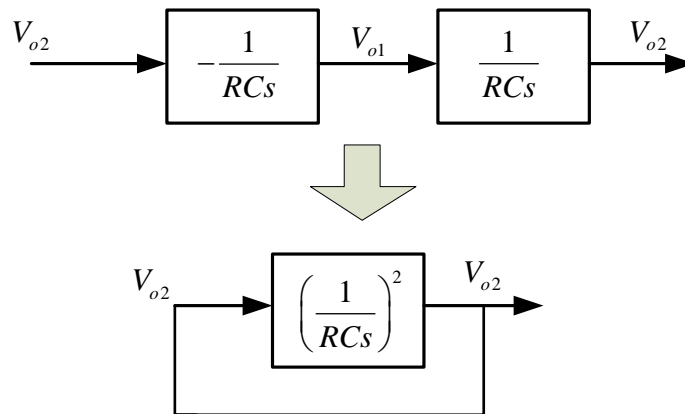
$$\left(\frac{R_3 C_3 S}{R_3 C_3 S + 1} \right) V_{o2} = \frac{1}{R_2 C_2 S + 1} V_{o1} \quad (3.4)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2 = R_3 C_3 = RC$

$$V_{o2} = \left(\frac{1}{RCS + 1} \right) \left(\frac{RCS + 1}{RCS} \right) V_{o1}$$

$$V_{o2} = \frac{1}{RCS} V_{o1} \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.1) และ (3.5) เขียนแทนด้วยบล็อกไดอะแกรมเป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรม ของวงจรในรูปที่ 3.2

จากรูปที่ 3.3 จะได้ค่าอุปนัยเป็น

$$A(s)\beta(s) = \left(\frac{1}{RCS} \right)^2 \quad (3.6)$$

ได้สมการคุณลักษณะเป็น

$$1 + A(s)\beta(s) = 1 + \left(\frac{1}{RCS} \right)^2 = 0$$

$$1 + (RCs)^2 = 0$$

$$s^2 = -\frac{1}{(RC)^2} \quad (3.7)$$

$$s = \pm j \frac{1}{RC}$$

ได้ผลตอบสนองทางเวลาชั่วคราวเป็นดังนี้

$$v_{o2}(t) = \sin \frac{1}{RC} t \quad (3.8)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้แรงดัน $v_{o1}(t)$ ตามสมการ (3.1) ที่มีมุมเฟสหน้าหน้าอยู่ 90 องศา เป็นดังนี้

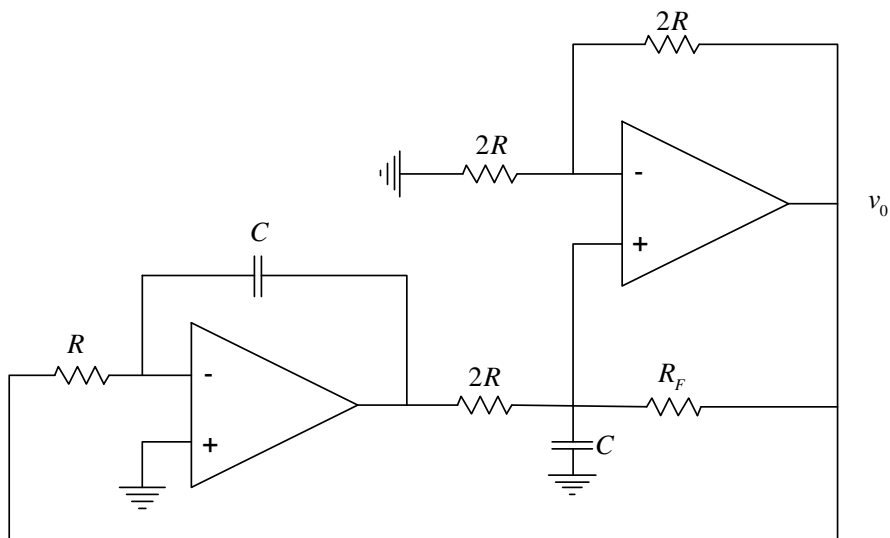
$$v_{o1}(t) = \cos \frac{1}{RC} t \quad (3.9)$$

เมื่อความถี่ที่ออกสซิสเลท $\omega_o = \frac{1}{RC}$ โดยที่ขนาดของสัญญาณทั้งสองนี้มีค่าเป็นหนึ่งและมุมเฟส

ต่างกันอยู่ 90 องศา

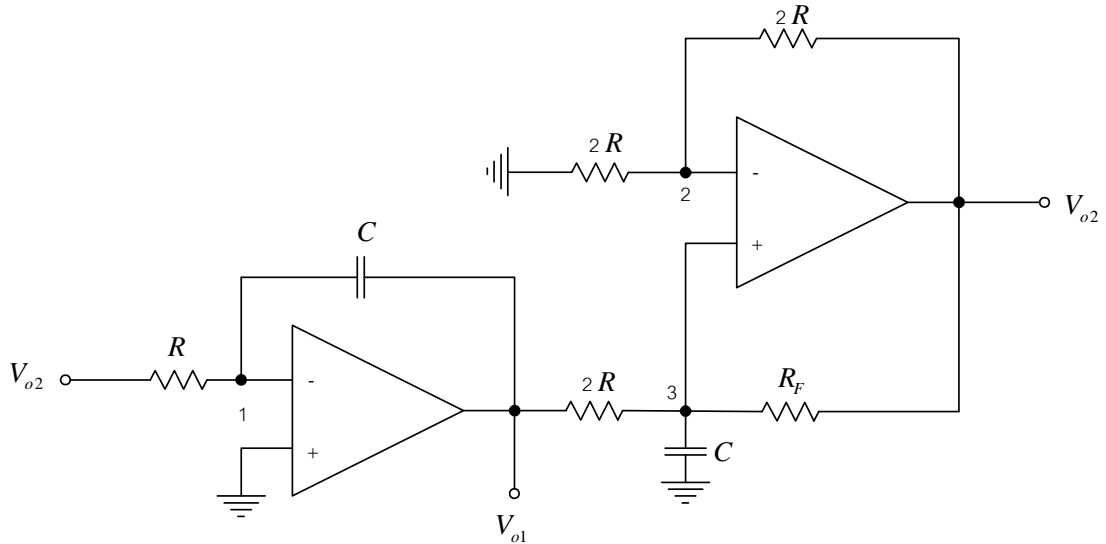
3.2 วงจรควอเทรเจอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 2

วงจรควอเทรเจอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 2 ประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์สองชุดต่อกันในลักษณะป้อนกลับแบบบวก โดยให้มีเฟสของสัญญาณตรงข้ามกัน สังเกตได้จากสัญญาณเข้าที่ออปแอมป์ ทั้งสองตัวที่ตรงขาอินพุตที่มีเครื่องหมายต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรควอเทรเจอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 2

เขียนวงจรจากรูปที่ 3.4 ใหม่ได้ดังรูปที่ 3.5 แล้วทำการวิเคราะห์ห้วงจรหาความสัมพันธ์หาแรงดัน V_1 และ V_0 ได้ดังนี้โดยมีเงื่อนไข $R_F < 2R$ และ $f = \frac{1}{2\pi RC}$



รูปที่ 3.5 วงจรควอเตอร์เจอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 2 ที่ใช้วิเคราะห์ห้วงจร

KCL ที่ โหนด 1 กระแสไหลเข้าหรือไหลออกรวมกันมีค่าเป็นศูนย์

$$i_R = i_C$$

$$\frac{V_{o2} - 0}{R} = \frac{0 - V_{o1}}{Z_C}$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = -\frac{Z_C}{R} = \frac{-1}{RCs} \quad (3.10)$$

KCL ที่ โหนด 2 กระแสไหลเข้าหรือไหลออกรวมกันมีค่าเป็นศูนย์

$$i_{2R} + i_{2R} = 0$$

$$\frac{V_2 - 0}{2R} + \frac{V_2 - V_{o2}}{2R} = 0$$

$$\left(\frac{1}{2R} + \frac{1}{2R} \right) V_2 - \frac{V_{o2}}{2R} = 0$$

$$\frac{2}{2R}V_2 = \frac{V_{o2}}{2R}$$

$$V_2 = \frac{V_{o2}}{2} \quad (3.11)$$

KCL ที่โหนด3กระแสไหลเข้าหรือไหลออกรวมกันมีค่าเป็นศูนย์

$$i_{2R} + i_C + i_{Rf} = 0$$

$$\frac{V_3 - V_{o1}}{2R} + \frac{V_3 - 0}{Z_C} + \frac{V_3 - V_{o2}}{R_f} = 0$$

$$\left(\frac{1}{2R} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{R_f} \right) V_3 - \frac{V_{o1}}{2R} - \frac{V_{o2}}{R_f} = 0 \quad (3.12)$$

เนื่องจาก $V_2 = V_3$ ตามคุณสมบัติของออปแอมป์

แทนสมการ (3.11) ใน (3.12)

$$\left(\frac{2RR_fCs + 2R + R_f}{2RR_f} \right) \frac{V_{o2}}{2} - \frac{V_{o1}}{2R} - \frac{V_{o2}}{R_f} = 0$$

$$\left[\frac{2RR_fCs + 2R + R_f}{2RR_f} - \frac{1}{R_f} \right] V_{o2} = V_{o1}$$

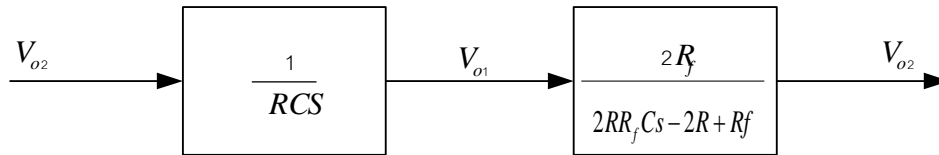
$$\left[\frac{2RR_fCs + 2R + R_f}{2R_f} - \frac{2R}{R_f} \right] V_{o2} = V_{o1}$$

$$\left[\frac{2RR_fCs + 2R + R_f - 4R}{2R_f} \right] V_{o2} = V_{o1}$$

$$\left[\frac{2RR_fCs - 2R + R_f}{2R_f} \right] V_{o2} = V_{o1}$$

$$\frac{V_{o2}}{V_{o1}} = \frac{2R_f}{2RR_fCs + 2R + R_f} \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.12) และ (3.13) เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรูปแบบที่ 2

เขียนสมการคุณลักษณะได้เป็นดังนี้

$$1 + \left(\frac{1}{RCs} \right) \left(\frac{2R_f}{2RR_fCs - 2R + R_f} \right) = 0$$

ถ้า R เท่ากันจะได้

$$s^2 + \left[-\frac{1}{RC} + \frac{1}{2RC} \right] s + \frac{1}{R^2C^2} = 0 \quad (3.14)$$

ระบบจะเกิดการออสซิลเลทเมื่อพจน์ของ s หายไปนั่นคือ

$$-\frac{1}{RC} + \frac{1}{2RC} = 0 \quad (3.15)$$

จะได้ $2RC = RC$ (3.16)

หรือทำการวิเคราะห์วงจรตามรูปที่โดยตรง แทนที่จะใช้เกณฑ์ของ Barkhausen จากรูปที่ 3.6 ได้ว่าสัญญาณออกของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่หนึ่งที่อยู่ด้านซ้ายมือ คือ

$$V_{o1}(t) = -\frac{1}{RC} \int v_{o2}(t) dt \quad (3.17)$$

หรือแปลงลาปลาซได้เป็น

$$V_{o1}(s) = -\frac{1}{sRC} V_{o2}(s) \quad (3.18)$$

ส่วนสัญญาณออกของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่สองอยู่ด้านขวามือคือ

$$V_{o2}(t) = \frac{1}{RC} \int v_{o1}(t) dt \text{ หรือ } V_o(s) = \frac{1}{sRC} V_1(s) \quad (3.19)$$

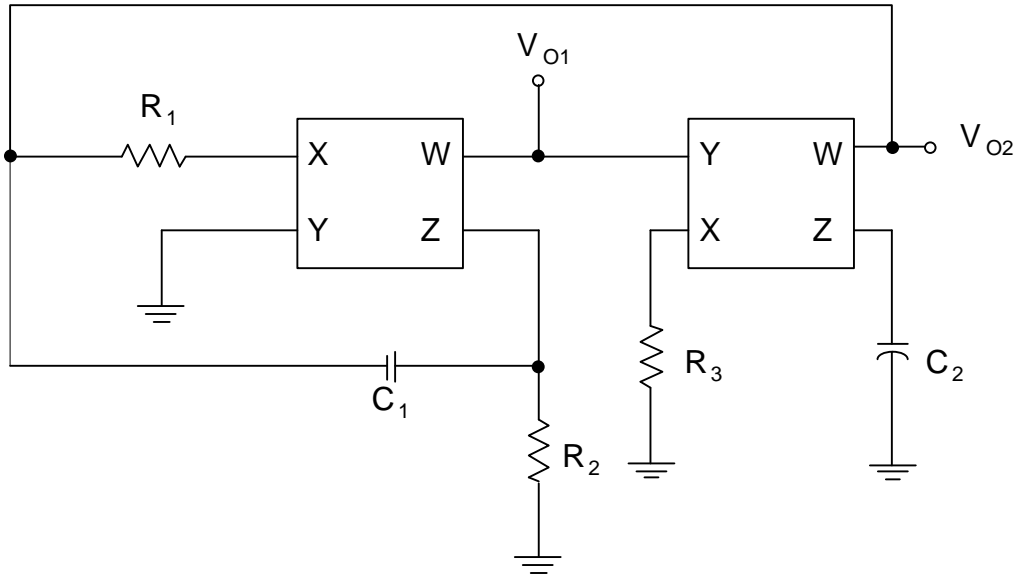
ดังนั้น จะได้ว่า
$$V_{o2}(s) = -\frac{1}{(sRC)^2} V_{o2}(s) \text{ หรือ } (1 + \frac{1}{(sRC)^2}) V_{o2}(s) = 0 \quad (3.20)$$

รากของสมการนี้คือ $s = \pm j \frac{1}{RC}$ จึงได้ว่าความถี่ของการแกว่ง (Oscillating Frequency), $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ เพื่อให้มั่นใจว่าการแกว่งจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอน ค่าความต้านทาน R_f ต้องมีค่าน้อย $2R$, $R_f < 2R$ เพื่อให้เกิดการป้อนกลับแบบบวกที่แรงพอ สังเกตว่า v_1 และ v_0 เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา (ตั้งฉากกัน)

ดังนั้นถ้าให้ $v_1 = V \sin(\omega_0 t)$ แล้ว $v_0 = V \sin v(\omega_0 t + 90^\circ) = V \cos(\omega_0 t)$ สัญญาณตั้งฉาก (Quadrature signals)

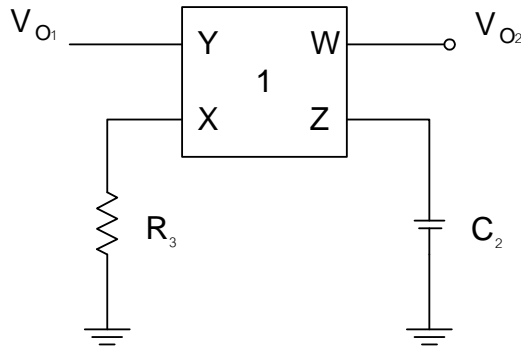
3.3 วงจรควอเดรเจอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 3

วงจรควอเดรเจอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 3.6 ประกอบด้วยวงจรขยาย Current-feedback Operation Amplifiers: CFOAs ที่มีวงจรสมมูลประกอบด้วยวงจรสายพานกระแส และวงจรแรงดันบัฟเฟอร์ [5] และอุปกรณ์พาสซีฟได้แก่ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.7 วงจรควอเทรเจอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 3

การวิเคราะห์ห้วงจรประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นวงจรอินทิเกรตเตอร์และส่วนที่เป็นวงจรกรองความถี่ผ่าน จะได้วงจรอินทิเกรตเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรอินทิเกรตเตอร์วงจรย่อยของรูปที่ 3.7

จากคุณสมบัติของ AD844 จะได้

$$i_y = 0, V_x = V_{y1}, i_z = i_z, V_w = V_z \tag{3.21}$$

ดังนั้นวงจรที่ 3.8 จะได้

$$V_{o2} = V_z = I_{z2}, Z_{c2} = I_x Z_{c2} \tag{3.22}$$

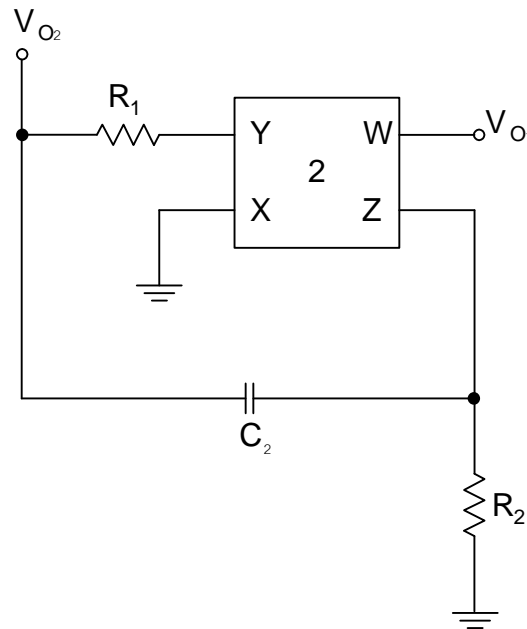
แต่

$$I_x = \frac{V_x}{R_3} = \frac{V_{o_1}}{R_3} \quad (3.23)$$

แทนสมการที่ (3.21) ใน (3.22)

$$V_{o_2} = \left(\frac{1}{C_2 s}\right) \left(\frac{1}{R_3}\right) V_{o_1}$$

$$V_{o_2} = \frac{1}{C_2 s R_3} V_{o_1} \quad (3.24)$$



รูปที่ 3.9 วงจรกรองความถี่ผ่านวงจรร้อยส่วนที่สองของรูปที่ 3.7

KCL ที่โหนด V_{o_2} ผลรวมกระแสรวมกันมีค่าเป็นศูนย์

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{Z_{c1}}\right)V_{o_2} - \frac{1}{Z_{c1}}V_{o_1} = 0$$

$$\left(\frac{sC_1 R_1 + 1}{R_1}\right)V_{o_2} - sC_1 V_{o_1} = 0$$

$$\left[\frac{sC_1 R_1 + 1}{R_1} + sC_1\right]V_{o_2} = 0$$

$$\left[\frac{sC_1R_1 + 1 - C_1R_1s}{R_1} \right] V_{o2} = 0 \quad (3.24)$$

KCL ที่โหนด V_{o1} ผลรวมกระแสรวมกันที่โหนดนี้มีค่าเป็นศูนย์

$$\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{sC_1} \right) V_{o1} - \frac{1}{ZC_1} V_{o2} = 0$$

$$\left(\frac{R_2C_1s + 1}{R_2} \right) V_{o1} - sC_1V_{o2} = 0$$

$$\left[\frac{R_2C_1s + 1}{R_2} + sC_1 \right] V_{o1} = 0$$

$$\left[\frac{sC_1R_2 + R_2C_1s + 1}{R_2} \right] V_{o1} = 0 \quad (3.25)$$

นำสมการ (3.24) เท่ากับ (3.25)

$$\left(\frac{C_1R_1s + 1 + C_1R_1s}{R_1} \right) V_{o2} = \frac{C_1R_2s + 1 + R_2C_1s}{R_2} V_{o1}$$

$$R_2 \left[\frac{2C_1R_1s + 1}{R_1} \right] V_{o2} - \left[\frac{2R_2C_1s + 1}{R_2} \right] R_1R_3C_2sV_{o2} = 0$$

$$2C_1R_1R_2s + R_2V_{o2} - [2R_2R_1R_3C_1C_2s^2 + R_1R_2R_3sV_{o2}] = 0$$

$$-2R_1R_2R_3C_1C_2s^2 + [2C_1R_1R_2 + R_1R_3C_2s]V_{o2} + R_2 = 0 \quad (3.26)$$

เขียนสมการคุณลักษณะได้เป็นดังนี้

$$s^2 + s \left[\frac{1}{R_2C_1} - \frac{1}{R_3C_2} \right] + \frac{1}{R_1R_3C_1C_2} = 0 \quad (3.27)$$

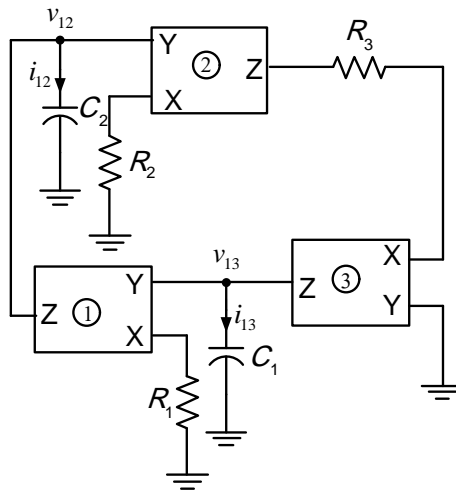
วงจรจะเกิดออสซิลเลทได้ก็ต่อเมื่อพจน์ของ s มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$R_2C_1 = R_3C_2$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_1 C_1 C_2}} \quad (3.28)$$

3.4 วงจรควอเทรเตอร์ออสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 4

จากคุณสมบัติของวงจร CCII+ ที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา ได้นำมาออกแบบและสร้างเป็นวงจรควอเทรเตอร์ออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุและตัวต้านทานได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3.10 วงจรควอเทรเตอร์ออสซิลเลเตอร์ที่รูปแบบที่ 4

การทำงานของวงจรอธิบายดังนี้ เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจร และใช้คุณสมบัติของวงจร CCII+ ตามสมการ (2.1) ได้ความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันต่างๆ มีค่าเป็นดังนี้

$$i_{12} = C_2 \frac{d}{dt} v_{12} = i_{z1} = i_{x1} = \frac{v_{13}}{R_1} \quad (3.29)$$

$$i_{13} = -i_{z3} = C_1 \frac{d}{dt} v_{13} \quad (3.30)$$

$$i_{z3} = i_{x3} = i_{z2} = i_{x2} = \frac{v_{12}}{R_2} = \frac{v_{z2}}{R_3} \quad (3.31)$$

จากสมการ (3.29) – (3.31) เขียนใหม่ได้เป็น

$$v_{12} = -R_2 C_1 \frac{d}{dt} v_{13} = \frac{R_2}{R_3} v_{z2} \quad (3.32)$$

$$v_{13} = R_1 C_2 \frac{d}{dt} v_{12} \quad (3.33)$$

จากสมการ (3.28) เขียนใหม่ได้เป็น

$$v_{z2} = \frac{R_3}{R_2} v_{12} \quad (3.34)$$

แทนสมการ (2.28) และ (2.29) ใน (2.30) จะได้

$$v_{z2} = -R_1 R_2 C_1 C_2 \frac{d^2}{dt^2} v_{z2} \quad (3.35)$$

หรือ

$$\frac{d^2}{dt^2} v_{z2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} v_{z2} = 0 \quad (3.36)$$

จากสมการ (3.36) ใช้การแปลงลาปลาซกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$ จะ
ได้

$$s^2 V_{z2}(s) - s v_{z2}(0) - v'_{z2}(0) + \frac{1}{(RC)^2} V_{z2}(s) = 0 \quad (3.37)$$

เมื่อ $v_{Z2}(0) = V_{SAT}$, $v'_{Z2}(0) = 0$ โดยที่ V_{SAT} เป็นเงื่อนไขในการออสซิลเลทของวงจร จะได้แรงดันในโดเมน s เป็นดังนี้

$$V_{Z2}(s) = \frac{sV_{SAT}}{s^2 + 1/(RC)^2} \quad (3.38)$$

และได้แรงดัน $v_{Z2}(t)$ ในโดเมนเวลาเป็น [6]

$$v_{Z2}(t) = V_{SAT} \cos \omega_0 t \quad (3.39)$$

เมื่อ $\omega_0 = 1/RC$ เรียกว่าความถี่การออสซิลเลท สามารถปรับค่าความถี่นี้ได้โดยการปรับค่าความต้านทานหรือค่าตัวเก็บประจุ ทำการแทนค่าสมการ (3.37) ใน (3.38) และ (3.39) ได้แรงดันเอาต์พุต $v_{12}(t)$ และ $v_{13}(t)$ เป็นดังนี้ตามลำดับ

$$v_{12} = \frac{RV_{SAT}}{R_3} \cos \omega_0 t \quad (3.40)$$

$$v_{13} = -\frac{RV_{SAT}}{R_3} \sin \omega_0 t \quad (3.41)$$

จากสมการ (3.40) และ (3.41) พบว่าแรงดันเอาต์พุตทั้งสองจะมีขนาดเท่ากันและมีมุมต่างเฟสกันอยู่ 90 องศาในทำนองเดียวกันจากสมการ (3.32) และ (3.33) จะได้กระแสเอาต์พุต $i_{12}(t)$ และ $i_{13}(t)$ เป็นดังนี้

$$i_{12} = -\frac{V_{SAT}}{R_3} \sin \omega_0 t \quad (3.42)$$

$$i_{13} = -\frac{V_{SAT}}{R_3} \cos \omega_0 t \quad (3.43)$$

จากสมการ (3.42) และ (3.43) พบว่ากระแสเอาต์พุตทั้งสองจะมีขนาดเท่ากันและมีมุมต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา เช่นเดียวกับแรงดันเอาต์พุต