

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์ คุณสมบัติของออปแอมป์ คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่ 2 การใช้งาน PSPICE ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

2.1 วงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์

วงจรกิจกำเนิดสัญญาณ (Oscillator or Waveform Generator) เป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร วงจรกิจกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกันคือ วงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Waveform) และวงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณไซน์ (Non-Sinusoidal Waveform) ซึ่งได้แก่สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular) และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square) เป็นต้น ในปริยญาณิพนธ์นี้จะนำเสนอเฉพาะวงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปไซน์เท่านั้น

2.1.1 วงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Waveform Generator)

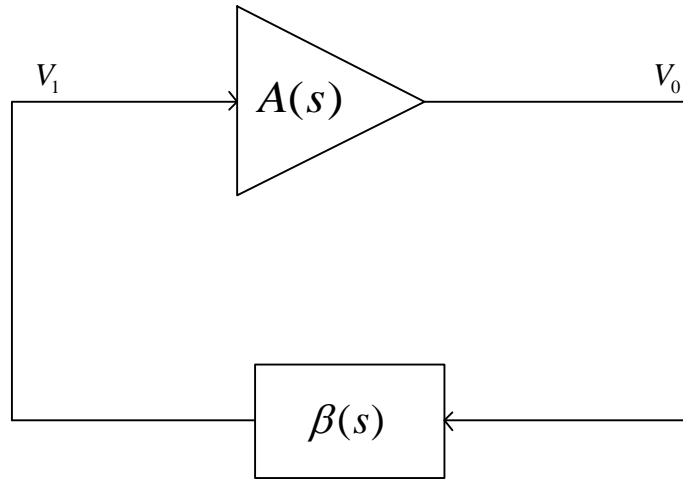
การสร้างวงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปไซน์แบบที่ง่ายที่สุด ทำได้โดยให้วงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงเช่น Op Amp ต่อกับอุปกรณ์พาสซีฟ RC หรือ LC ในลักษณะป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) ความถี่ของวงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ลักษณะนี้ควบคุมได้ โดยการปรับค่าความต้านทาน (R) และ/หรือค่าความเก็บประจุ (C) บางตัวในวงจร ทั้งนี้จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขเฉพาะที่จะทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation) ขนาดของสัญญาณไซน์ลักษณะนี้จึงถูกเรียกว่าเป็นวงจรกิจกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear Oscillation)

2.1.2 เกณฑ์ของ Barkhausen (Barkhausen's Criteria)

วงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ใดๆ จะต้องมีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูป $A(s)$ และ $\beta(s)$ เป็นอัตราขยายเดินหน้า (Forward) และอัตราขยายป้อนกลับ (Feedback) ตามลำดับ เงื่อนไขสำคัญที่จะทำให้วงจรนี้เกิดการแกว่งได้ เรียกว่า เกณฑ์ของ Barkhausen ที่ขึ้นอยู่กับอัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) ของวงจรคือ $A_L(s) = A(s)\beta(s)$ เกณฑ์ของ Barkhausen ประกอบด้วยเกณฑ์สำคัญสองประการคือ

$$\text{เกณฑ์ของเฟส : } \angle A_L(j\omega_0) = 0 \pm 360^\circ \quad (2.1)$$

$$\text{เกณฑ์ของอัตราขยาย : } |A_L(j\omega_0)| \geq 1 \quad (2.2)$$

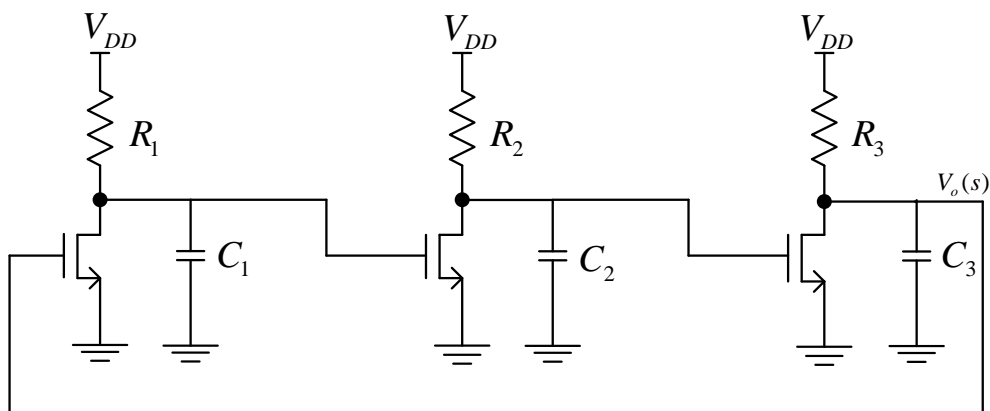


รูปที่ 2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ที่ป้อนกลับแบบบวก

ผลทางกายภาพที่เกิดขึ้นจากเกณฑ์ทั้งสองนี้ ก็คือ สัญญาณขาออก V_0 ที่มีความถี่ f_0 จะมีเฟสตรงกับสัญญาณ V_1 ที่ถูกป้อนเข้าที่ขาเข้าของวงจรขยาย $A(s)$ เมื่อนวนกลับมาครบรอบ แต่จะมีขนาดใหญ่กว่าเดิม กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือวงจรนี้มีการป้อนกลับแบบบวกที่มีความถี่ f_0 นั้นเอง ด้วยเกณฑ์ทั้งสองนี้วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์จึงสามารถกำเนิดและรักษาการแกว่งของสัญญาณได้ ในทางปฏิบัติเราต้องการสัญญาณป้อนกลับแบบบวกที่แรงพอที่จะทำให้เกิดการรักษารการแกว่งไว้ได้ ซึ่งทำได้โดยการทำให้อัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งจะทำให้ได้สมการลักษณะสมบัติ (Characteristics Equation) เป็น

$$1 + A_L(s) = 0 \quad (2.3)$$

สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้เกณฑ์ของ Barkhausen เป็นวงจร Ring Oscillator แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจร Ring Oscillator

สมมติให้แบบจำลองของ NMOS ทรานซิสเตอร์มีค่า Trans - Conductance เป็น g_m และละเลยผลของการมอดูเลตความยาวช่องสัญญาณ (Channel Length Modulation) นั่นคือให้ค่า $\lambda = 0$ หรือ $r_o = \infty$ จะได้ว่าอัตราของวงจรรินเวอร์เตอร์ แต่ละลำดับชั้น คือ $-g_m(R // \frac{1}{sC})$ ดังนั้น อัตราขยายวงจรรของวงจร

$$A_L(s) = \left[-g_m \left(R // \frac{1}{sC} \right) \right]^3 = - \left[\frac{g_m R}{1 + sRC} \right]^3 \quad (2.4)$$

หรือ พิจารณาในลักษณะผลตอบแทนเชิงความถี่ ที่ประกอบด้วยขนาดและเฟส

$$|A_L(j\omega)| = \left[\frac{g_m R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \right]^3 \quad (2.5)$$

$$\angle A_L(j\omega) = -3 \tan^{-1}(\omega RC) \pm 180^\circ \quad (2.6)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์ของเฟส $\angle A_L(j\omega) = 0$ จะได้ว่า

$$-3 \tan^{-1}(\omega_0 RC) \pm 180^\circ = 0^\circ \quad (2.7)$$

หรือ $\omega_0 = \frac{1}{RC} \tan(60^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{RC}$ (ω_0 ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์) (2.8)

เพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์ของอัตราขยาย เราจะได้ว่า

$$\left[\frac{g_m R}{\sqrt{1 + (\omega_0 RC)^2}} \right]^3 \geq 1 \text{ หรือ } g_m R \geq 2 \quad (2.9)$$

สมการ (2.8) และ (2.9) คือเงื่อนไขที่จำเป็นในการออกแบบวงจรดังกล่าว ในทางปฏิบัติเราต้องการสัญญาณป้อนกลับแบบบวกที่แรงพอที่จะทำให้เกิดการรักษาระบบไว้ได้ ซึ่งทำได้โดยการทำให้อัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) มีค่ามากกว่า 1 หรือ $g_m R > 2$ เราจะเลือกให้ $g_m R > 2.2$ ซึ่งจะทำให้ได้สมการลักษณะสมบัติ (Characteristics Equation) ของวงจรนี้เป็น

$$1 + A_L(s) = 1 + \left[\frac{2.2}{1 + \sqrt{3} \frac{s}{\omega_0}} \right]^3 = 0 \quad (2.10)$$

สมการ (2.11) นี้มีรากทั้งหมดสามราก ที่ $-1.848\omega_0, 0.058\omega_0 + j1.1\omega_0$ และ $0.058\omega_0 - j1.1\omega_0$ ทำให้ผลตอบภาวะชั่วคราว (Transient Responses) ของสมการนี้อยู่ในรูป

$$v_0(t) = V_{01}e^{-1.841\omega_0 t} + V_{02}e^{0.058\omega_0 t} \sin(1.1\omega_0 t + \phi) \quad (2.11)$$

โดยที่ $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{1.1}{0.058}\right)$ จากสมการ (2.11) จะเห็นได้ว่าเทอมที่หนึ่งจะลดถอยลงในอัตราเอ็กซ์โพเนนเชียลเข้าสู่ศูนย์ ในขณะที่เทอมที่สองเป็นสัญญาณรูปไซน์ซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเวลา ในที่สุดแล้วขนาดของสัญญาณนี้จะมีค่าใหญ่เกินขอบเขตการทำงานในย่านเชิงเส้น การจำกัดขนาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น เช่น การขริบของสัญญาณ หรือการอ้อมตัว ก็จะเกิดขึ้น ทำให้อัตราขยายลดลง และเกิดความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณในสถานะคงตัว (Steady State Response) สังเกตว่าความถี่ของการแกว่งที่เกิดขึ้นจริงก็จะเบี่ยงเบนจากความถี่ ω_0 ที่ได้จากการคำนวณด้วย ถ้า $g_m R \gg 2$ แล้ว รูปสัญญาณออกที่ได้จะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมาก

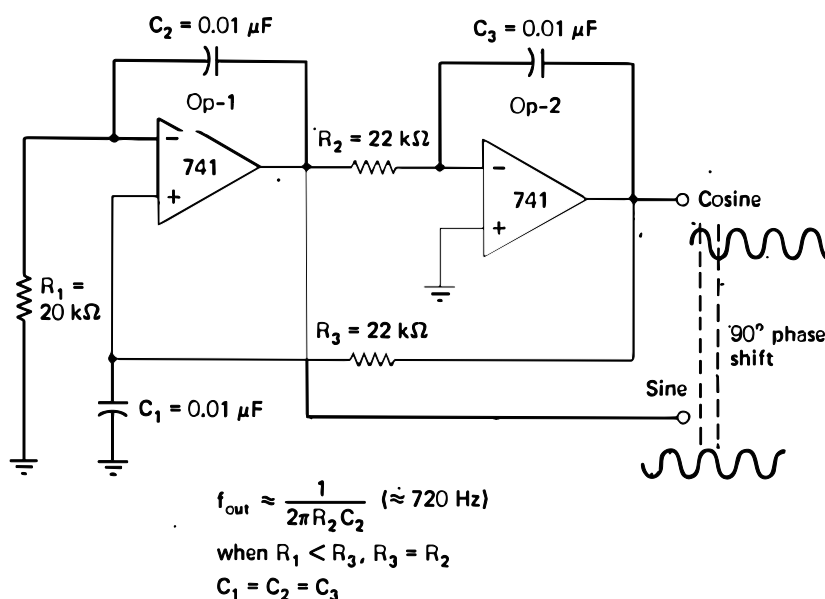
2.1.3 วงจรกำเนิดคลื่นไซน์ต่างเฟส 90 องศา

บางครั้งอาจต้องการสัญญาณไซน์สองตัวซึ่งมีเฟสต่างกัน 90 องศา วงจรกำเนิดสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า “Quadrature Oscillator” จากรูปที่ 2.3 แสดงวงจรชนิดนี้ที่ใช้วงจรอินทิเกรเตอร์สองตัวที่มีการป้อนกลับแบบบวก โดยที่ R_1 ควรมิต่ำกว่า R_2 เล็กน้อยเพื่อวงจรจะเกิดการออสซิลเลทได้ นอกจากนี้ R_1 ควรมีค่าพอเหมาะมิเช่นนั้น ถ้าหาก R_1 มีค่าต่ำเกินไป

สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้น R_1 ที่ใช้ควรเป็นชนิดปรับค่าได้เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตมีความเพี้ยนต่ำสุดเท่าที่จะทำได้

กรณีที่ $R_2 = R_3$ โดยที่ $R_1 < R_3$ และ $C_1 = C_2 = C_3$ เราสามารถคำนวณ f_{out} ได้จากสมการ

$$f_{out} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวงจรควอเตอร์ออสซิลเลเตอร์

2.2 ออปแอมป์ทางอุดมคติ

วงจรรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าออปแอมป์ (Op-Amp) เป็นวงจรรวม(Integrated Circuit) หรือไอซี (IC) ที่ประยุกต์ใช้งานมากมายในปัจจุบันเนื่องจากราคาถูกใช้งานง่ายสามารถนำมาสร้างเป็นวงจรต่าง ๆ ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างภายในตัวออปแอมป์เลย ซึ่งโครงสร้างภายในประกอบด้วยกลุ่มของทรานซิสเตอร์ กลุ่มของตัวต้านทาน และอุปกรณ์อื่นที่ต่อกันอย่างซับซ้อน ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงหลักการทำงานภายในตัวออปแอมป์แต่จะกล่าวถึงประวัติโดยย่อของออปแอมป์ ซึ่งออปแอมป์ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1940 เป็นแบบหลอดสุญญากาศเดี่ยวยุคต่อมาได้นำออปแอมป์ไปใช้งานเกี่ยวกับบอานาลอกคอมพิวเตอร์โดยนำออปแอมป์ไปใช้เชิงคณิตศาสตร์โดยสร้างเป็นวงจรรวบรวม การคูณ การหาร การอนุพันธ์และการอินทิเกรต เป็นต้น และในปัจจุบันยังได้นำออปแอมป์มาใช้งานทางดิจิทัล

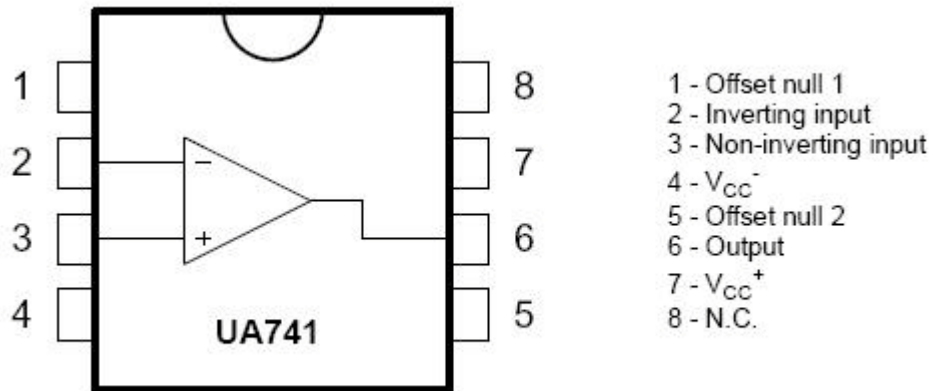
คอมพิวเตอรื นอกจากนี้ยังนำออปแอมป์มาใช้งานที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วย เช่น วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรสมิททริกเกอร์ เป็นต้น

2.2.1 ออปแอมป์ทางอุดมคติ

ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยออปแอมป์ จะกำหนดให้ออปแอมป์เป็นอุดมคติ ซึ่งออปแอมป์มีหลายชนิดและหลายเบอร์ ตัวอย่างของออปแอมป์เบอร์ 741 ที่ใช้งานทั่วไป แสดงดังรูปที่ 2.4 มีทั้งหมด 8 ขาแต่ละขาจะมีหน้าที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 2.5



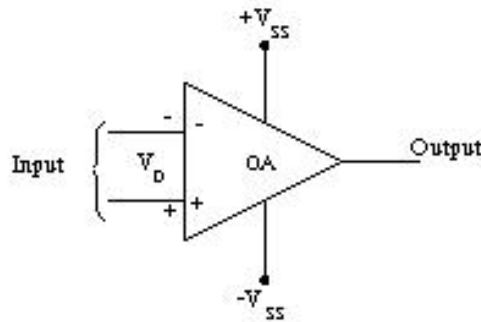
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างไอซีออปแอมป์เบอร์ 741



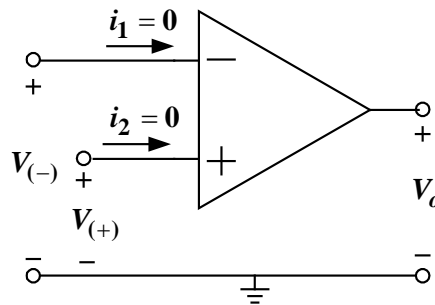
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์และหน้าที่การทำงานแต่ละขาของไอซีออปแอมป์

- ขา 1 คือ ปรับค่าชดเชยหรือปล่อยวาง
- ขา 2 คือ อินพุตแบบกลับเฟส
- ขา 3 คือ อินพุตแบบไม่กลับเฟส
- ขา 4 คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าค่าลบ
- ขา 5 คือ ปรับค่าชดเชยหรือปล่อยวาง
- ขา 6 คือ เอาต์พุต
- ขา 7 คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าค่าบวก
- ขา 8 คือ ไม่ใช่

การเขียนสัญลักษณ์แทนวงจรออปแอมป์แสดงดังรูปที่ 2.6 เป็นรูปสามเหลี่ยมโดยที่เครื่องหมายบวกเป็นขาอินพุตแบบไม่กลับเฟสสัญญาณ และเครื่องหมายลบเป็นขาอินพุตแบบกลับเฟสสัญญาณ ส่วนขาของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหรือไฟเลี้ยงวงจรมี 2 ขาคือ $+V$, $-V$ ในที่นี้จะไม่สนใจวงจรภายในของออปแอมป์ แต่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่ขาอินพุตและเอาต์พุตเท่านั้น ดังนั้นเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์วงจรจึงแทนสัญลักษณ์ของออปแอมป์เป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ของออปแอมป์ที่ประกอบไปด้วยขาไฟเลี้ยง



รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของออปแอมป์อย่างง่ายทางอุดมคติ

จากรูปที่ 2.7 หาความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของออปแอมป์ในทางอุดมคติได้ดังนี้

- ไม่มีกระแสไหลเข้าขาอินพุตของออปแอมป์ทั้งสองหรือกระแสที่ไหลเข้าขาออปแอมป์ทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์นั่นคือ $i_1 = 0, i_2 = 0$
- แรงดันโหนดที่โหนดอินพุตของออปแอมป์มีค่าเท่ากันนั่นคือ $v_1 = v_2$ หรือค่าความต่างศักย์ของแรงดันอินพุตที่ขาอินพุตทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ $v_1 - v_2 = 0$

2.2.2 การประยุกต์ใช้งานวงจรที่ประกอบด้วยออปแอมป์

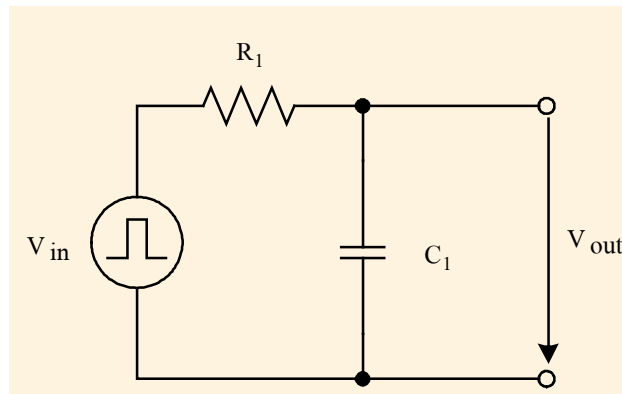
ในการนำออปแอมป์ไปใช้งานนั้นสามารถที่จะสร้างเป็นวงจรที่กระทำทางคณิตศาสตร์ได้แก่ วงจรบวกสัญญาณ วงจรคูณสัญญาณ วงจรหารสัญญาณ วงจรยกกำลังใด ๆ เป็นต้น ซึ่งในการ

วิเคราะห์วงจรที่ประกอบด้วยออปแอมป์จะเลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยโหนด เพื่อความสะดวกและง่ายในการวิเคราะห์หามีสิ่งที่ต้องจดจำอยู่สามประการคือ

- แรงดันโหนดที่โหนดอินพุตของออปแอมป์แบบอุดมคติจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสามารถกำจัดตัวแปรโหนดใดโหนดหนึ่งจากสมการโหนดของอินพุตได้ ตัวอย่างเช่นวงจรในรูปที่ 2.16 แรงดันที่โหนดอินพุตมีค่าเป็น v_1 และ v_2 ซึ่ง $v_1 = v_2$ ทำให้สามารถกำจัดตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งได้จากสมการโหนดนี้
- กระแสที่ไหลเข้าออปแอมป์ทางอุดมคติเป็นศูนย์ซึ่งสามารถใช้ KCL ที่ขาอินพุตของออปแอมป์ทั้งสองนี้ได้
- กระแสเอาต์พุตของออปแอมป์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งจะใช้ KCL ที่โหนดเอาต์พุตของออปแอมป์ก็ต่อเมื่อต้องการหากระแสเอาต์พุตเท่านั้น หากไม่ต้องการหา ก็ไม่จำเป็นต้องใช้ KCL ที่โหนดนี้

2.3 วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกัน โดยป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ตัวต้านทานและวัดสัญญาณเอาต์พุตคร่อมตัวเก็บประจุลักษณะการจัดวงจรเหมือนกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แสดงดังรูปที่ 2.8

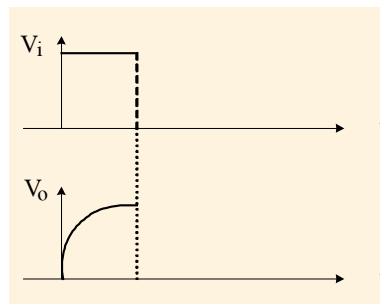


รูปที่ 2.8 วงจรอินทิเกรเตอร์

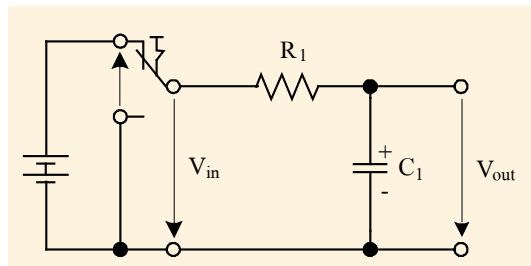
2.3.1 การทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์

การทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตให้แก่วงจรเป็นสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.20 ตัวเก็บประจุในวงจรจะทำการประจุและคายประจุตามสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแรงดันจากระดับต่ำไปยังระดับสูง ตัวเก็บประจุ C_1 จะทำการประจุแรงดันผ่านตัวต้านทาน R_1 ทำให้ที่ตัวเก็บประจุ C_1 มีแรงดันเพิ่มขึ้นสามารถแทนสัญญาณอินพุตช่วง

เปลี่ยนแรงดันจากระดับต่ำเป็นระดับสูง ด้วยแหล่งจ่ายไฟตรง ดังรูปที่ 2.9 (ก) และแสดงการประจุแรงดันช่วงที่สัญญาณอินพุตเปลี่ยนระดับแรงดันจากระดับต่ำไปยังระดับสูง ดังรูปที่ 2.9 (ข)



(ก) วงจรแทนการเปลี่ยนแรงดันอินพุตจากระดับแรงดันต่ำไปยังระดับแรงดันสูง

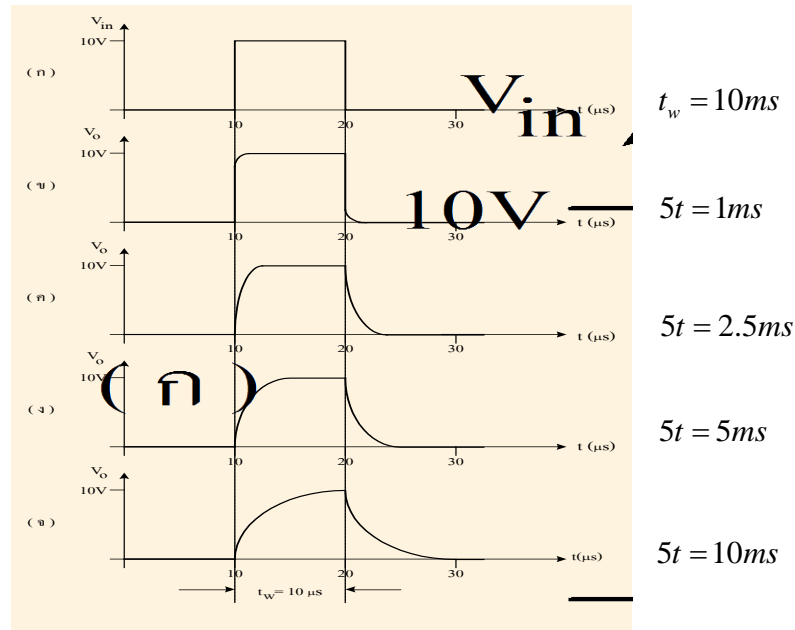


(ข) การประจุแรงดันของตัวเก็บประจุเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนจากระดับแรงดันต่ำไปยังระดับแรงดันสูง

รูปที่ 2.9 ผลการเปลี่ยนสัญญาณอินพุตจากระดับแรงดันต่ำไประดับแรงดันสูง

2.3.2 สัญญาณอินพุตมีความกว้างเท่ากับหรือมากกว่า 5 เท่าของค่าคงที่เวลา

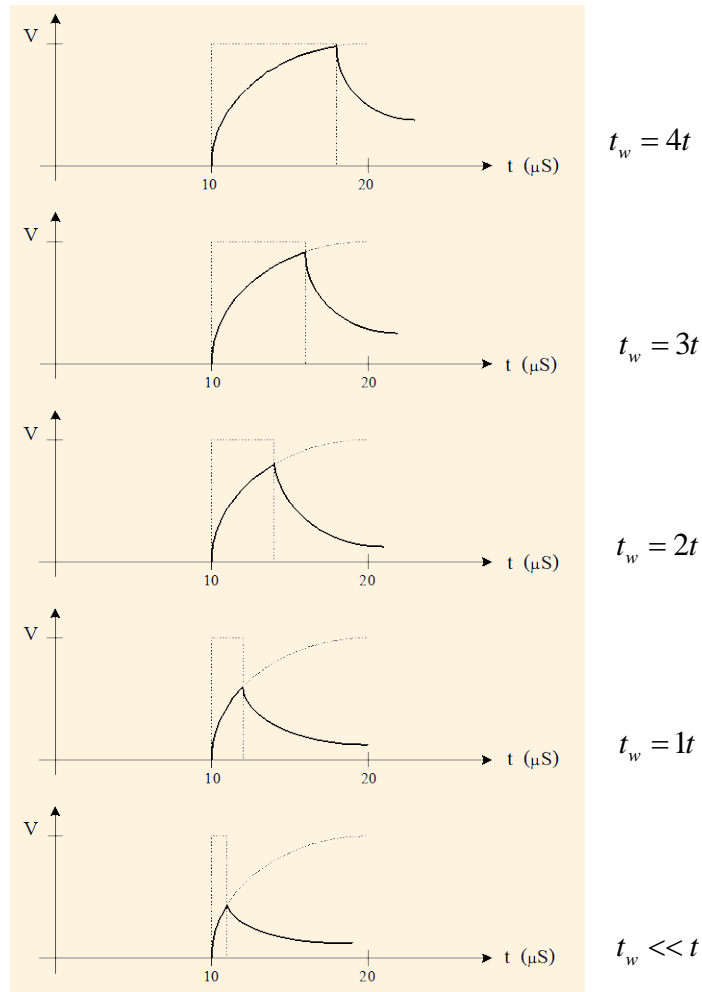
วงจรอินทิเกรเตอร์ที่มีสัญญาณอินพุตมีความกว้างเท่ากับหรือมากกว่าค่าคงที่เวลาจะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถประจุได้อย่างเต็มที่และในช่วงขอบขาลงของพัลส์ตัวเก็บประจุก็สามารถคายประจุได้จนหมดสิ้นแล้วเช่นกัน ดังนั้นจึงดูเหมือนว่าหากป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างมากกว่าหรือเท่ากับ 5 เท่าของค่าคงที่เวลาสัญญาณเอาต์พุตก็จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับอินพุตมากแต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าค่าของเวลาเองก็ส่งผลให้ตัวเก็บประจุทำงานได้เร็วหรือช้าด้วย ดังในรูปที่ 2.10 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นว่าเมื่อสัญญาณอินพุตมีความกว้างเท่ากับหรือมากกว่า 5 เท่าของค่าคงที่เวลาสัญญาณเอาต์พุตซึ่งก็คือ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2.10 ผลการตอบสนองของวงจรอินทิเกรเตอร์

2.3.3 สัญญาณอินพุตมีความกว้างน้อยกว่า 5 เท่าของค่าคงที่เวลา

การตอบสนองของวงจรอินทิเกรเตอร์เมื่อสัญญาณอินพุตมีความกว้างน้อยกว่า 5 เท่าของค่าคงที่เวลา จะทำให้ตัวเก็บประจุไม่สามารถประจุแรงดันได้สูงเท่ากับอินพุต และถ้าสัญญาณอินพุตมีความกว้างน้อยลง ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตก็จะลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.11

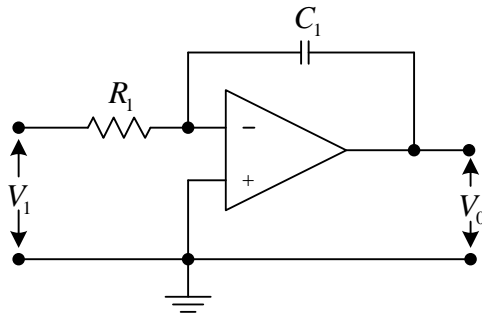


รูปที่ 2.11 ผลการตอบสนองของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์

2.3.4 วงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ใช้โอปแอมป์

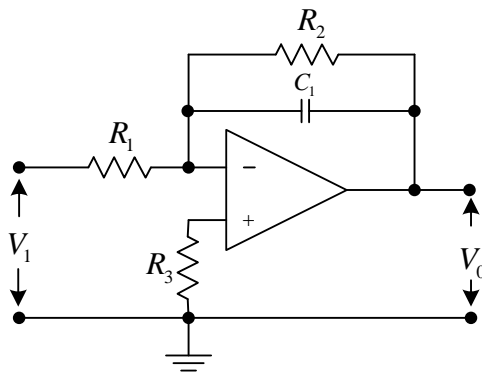
วงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ใช้โอปแอมป์ (Op-Amp Integrator Circuit) คือวงจรใช้ไอซี. โอปแอมป์ สร้างเป็นวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ สัญญาณแรงดันอินพุตที่เข้ามา แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยมีตัวต้านทาน เป็นอุปกรณ์พาสซีฟด้านอินพุต (Element Input) และมีตัวเก็บประจุ C_1 เป็นอุปกรณ์พาสซีฟมายังอินพุต (Feedback Element) วงจรจะต่อกลับกันกับวงจรรวมดิฟเฟอเรนติเอเตอร์ (Differentiator) สมการของแรงดันขาออกจะเป็นไปตามสมการของการอินทิเกรเตอร์ของสัญญาณแรงดันขาเข้า

$$V_o = -\frac{1}{R_1 \cdot C_1} \int V_i dt \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.12 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้โอปแอมป์

ความสัมพันธ์ของความถี่สัญญาณขาเข้าก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก เช่นกันจึงต้องใช้ R_2 ต่อขนานกับ C_1 เพื่อจำกัด (Low Frequency Resistor) เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง แล้วอาจเพิ่ม R_2 เข้าที่ขา อินพุตขาบวกของโอปแอมป์ ก็ได้ เพื่อลด V_{oi} แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่สมบูรณ์แบบ

การทำงานของวงจรในรูปที่ 2.13 เป็นดังนี้

1. ถ้าความถี่มีค่าความถี่มากกว่าความถี่หักมุม $f > f_c$ วงจรทำงานเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ จะได้ $V_o = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_i dt$
2. ถ้าความถี่มีค่าความถี่น้อยกว่าความถี่หักมุม $f < f_c$ วงจรทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส จะได้ $A_v = R_s / R_1$ เมื่อ $f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_1}$ และ $R_2 = R_1 // R_s$ ค่ากำหนดทั่วไปมักให้ $R_s \approx 10R_1$ โดยที่ค่าคาบเวลาของสัญญาณเข้า $T \cong R_1 \cdot C$

2.4 วงจรสายพานกระแส

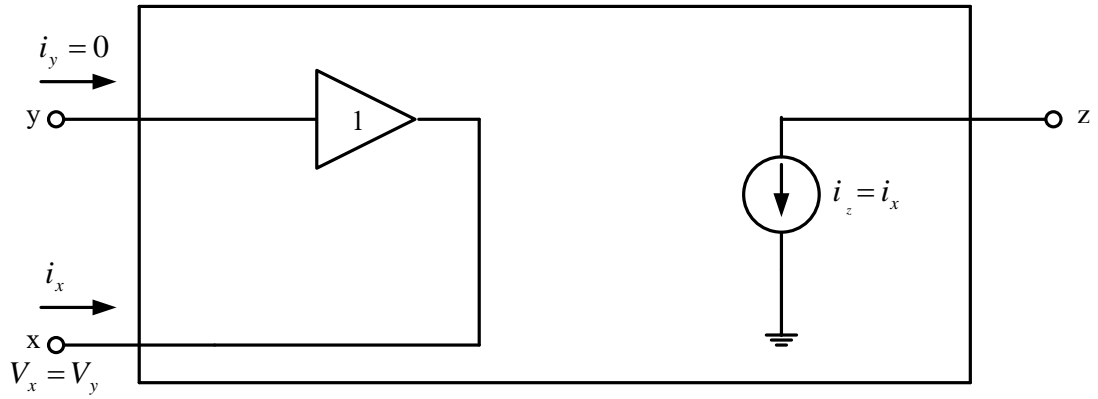
วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) เป็นวงจรปฏิบัติการเกี่ยวกับสัญญาณทางด้านอนาลอกที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เพื่อก่อกำเนิดวงจรที่ประมวลผลสัญญาณแบบอนาลอกในโหมดกระแสที่เป็นประโยชน์ได้อีกมากมาย ลักษณะของวงจรสายพานกระแสจะมีความคล้ายคลึงกับวงจรออปแอมป์ ซึ่งเป็นที่รู้จักกัน โดยทั่วไปในด้านมุมมองที่เป็นวงจรที่ถูกสร้างขึ้นเป็นวงจรสำเร็จแบบวงจรรวม ข้อแตกต่างระหว่างวงจรสายพานกระแสและวงจรออปแอมป์ที่มีความเด่นชัดก็คือ วงจรออปแอมป์ที่เป็นวงจรทางด้านอนาลอกที่ทำงานในโหมดแรงดันซึ่งเป็นโหมดการทำงานของวงจรที่เป็นคู่แข่งกันและใช้งานแพร่หลายอยู่ โดยทั่วไป สำหรับวงจรสายพานกระแส นั้นเป็นวงจรปฏิบัติการแบบอนาลอกที่ทำงานในโหมดกระแส ซึ่งวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสมีข้อดีคือให้ความถูกต้องและแม่นยำของค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจร และมีข้อดีในการทำงานของวงจรที่กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรประเภทเดียวกันที่ทำงานในโหมดแรงดัน ในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII)

2.5.1 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (Second Generation Current Conveyor : CCII)

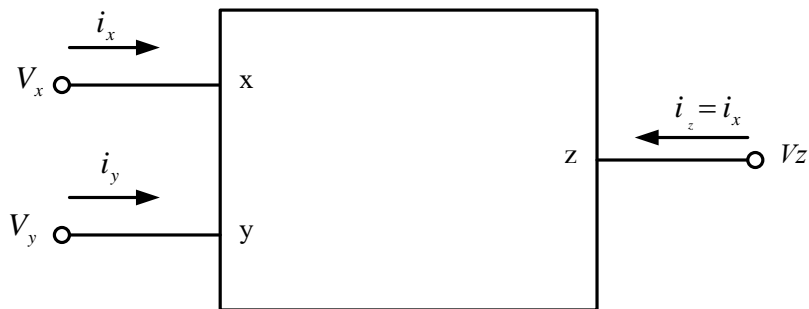
ในปี ค.ศ. 1970 ซึ่งเป็นระยะเวลา 2 ปีต่อมาหลังจากที่ K.C. Smith และ A.S. Sedra ได้นำเสนอแนวความคิดของวงจร CCI บุคคลทั้งสองได้ทำการปรับปรุงวงจรและได้นำเสนอแนวความคิดของหลักการวงจรสายพานกระแสแบบใหม่ขึ้น ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากกว่าแนวคิดของวงจร CCI เดิม เรียกว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรแทนด้วย CCII โดยคุณสมบัติของวงจร CCII สามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.14) สามารถนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และกำหนดใช้สัญลักษณ์เป็นบล็อกไดอะแกรม ได้แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของ CCI



รูปที่ 2.15 สัญลักษณ์ของวงจร CCII

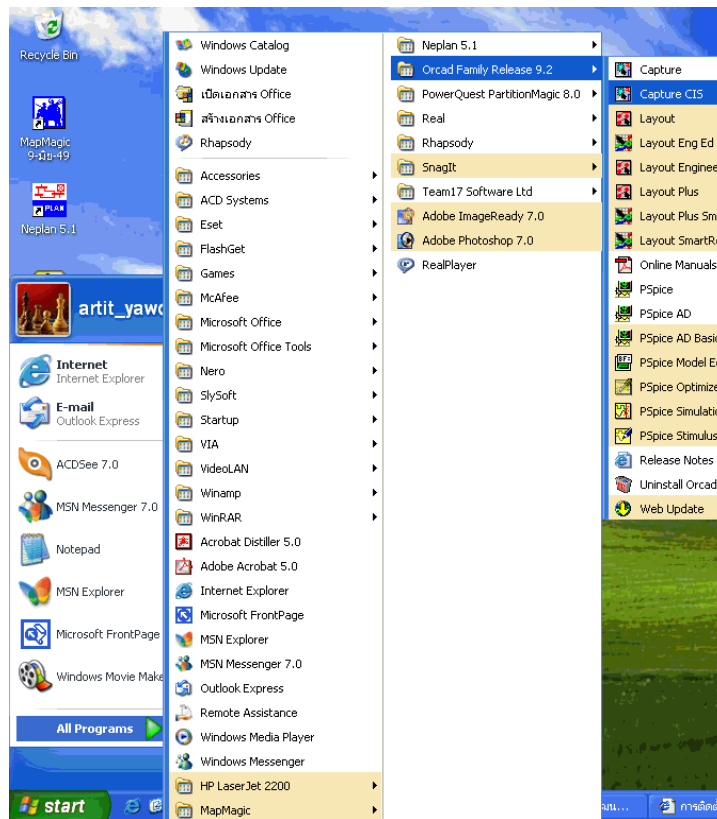
จากวงจรสมมูลของวงจร CCII จะพบว่า วงจร CCII ก็เป็นอุปกรณ์ประเภท 3 ขั้ว ได้แก่ x , y และ z โดยขั้ว x เป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้า (Input Impedance) อยู่ที่ค่าหนึ่ง ขั้ว y จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้าสูง และขั้ว z จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาออกสูง โดยวงจร CCII จะมีกระแสทางด้านขั้ว z คือ i_z เท่ากับกระแสทางด้านขั้ว x คือ i_x ถ้าทิศทางกระแส i_x และ i_z มีทิศทางเดียวกันคือไหลเข้าหรือไหลออกจากวงจรเหมือนกันจะจัดเป็นวงจร CCII แบบบวก ใช้สัญลักษณ์ตัวย่อว่า CCII+ ส่วนในกรณีที่กระแสทั้งสองกลับทิศทางกัน วงจร CCII จะจัดเป็น CCII แบบลบ นิยมเขียนแทนด้วยอักษรย่อว่า CCII-

จากแนวความคิดและหลักการของวงจร CCII นี้ ได้มีผู้นำไปคิดสร้างวงจรในทางปฏิบัติที่ทำงานในโหมดกระแสขึ้นหลายรูปแบบ ดังจะเห็นได้จากบทความวิจัยต่าง ๆ ที่ได้รับการตีพิมพ์ขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่สามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้าที่ขั้ว x ได้โดยใช้กระแสจากภายนอกเป็นตัวปรับ ที่เรียกว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมได้ด้วยกระแส โดยผู้คิดค้นคือ A.Fabre ในปี 1995

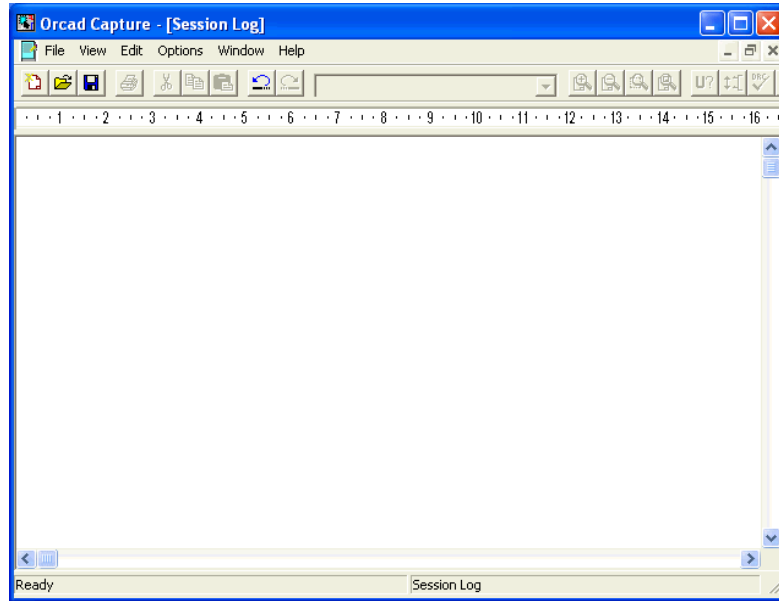
ในปริณญาณิพนธ์นี้เลือกใช้งานสายพานกระแสนที่สอง โดยเลือกใช้ไอซี AD844 ในการสร้างเป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีในโหมดกระแส

2.6 การใช้โปรแกรม Orcad

1. เรียกใช้โปรแกรม Capture CIS จาก Orcad Family Release 9.2

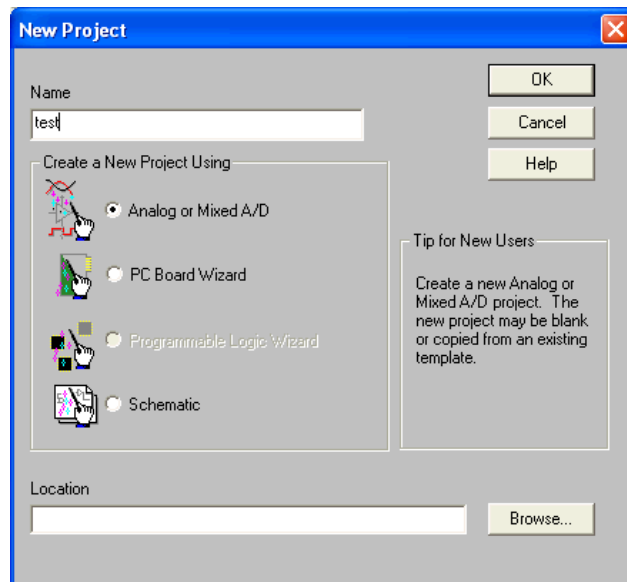


รูปที่ 2.16 ลักษณะของโปรแกรม Orcad Capture CIS

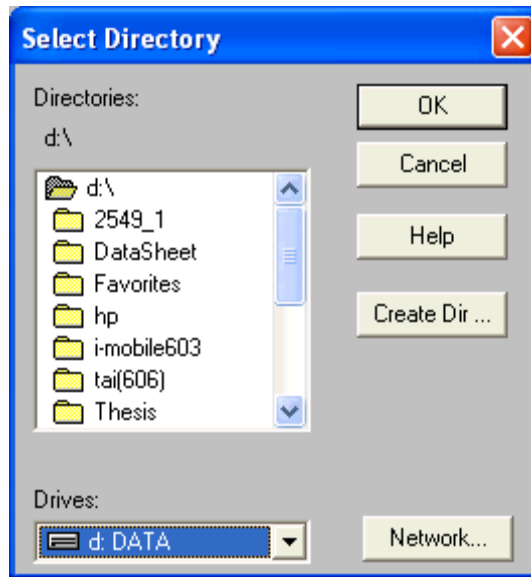


รูปที่ 2.17 เรียก New Project

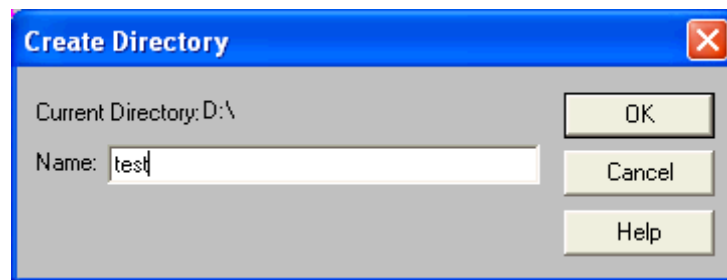
ในส่วนของ Name ตั้งให้ชื่อ (เป็นภาษาอังกฤษและตัวเลขเท่านั้น ห้ามมีเครื่องหมาย -,/%.* หรือเว้นวรรค) ในส่วน Create a New Project Using ให้เลือก Analog or Mixed A/D ในส่วน Location ให้กดปุ่ม Browse เลือก Folder ที่ต้องการเก็บไฟล์นี้ไว้



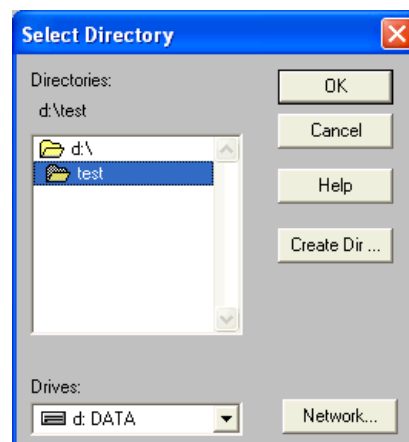
รูปที่ 2.18 ทำการเลือก Drive ที่จะเก็บไฟล์ไว้



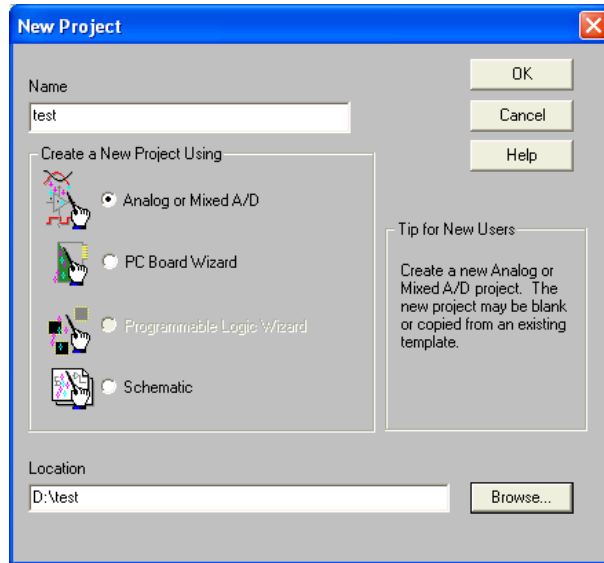
รูปที่ 2.19 ทำการสร้าง Folder ที่จะเก็บไฟล์



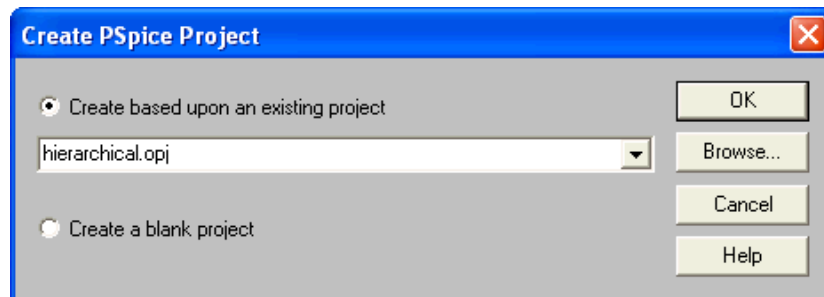
รูปที่ 2.20 ทำการเลือก Folder ที่จะเก็บไฟล์



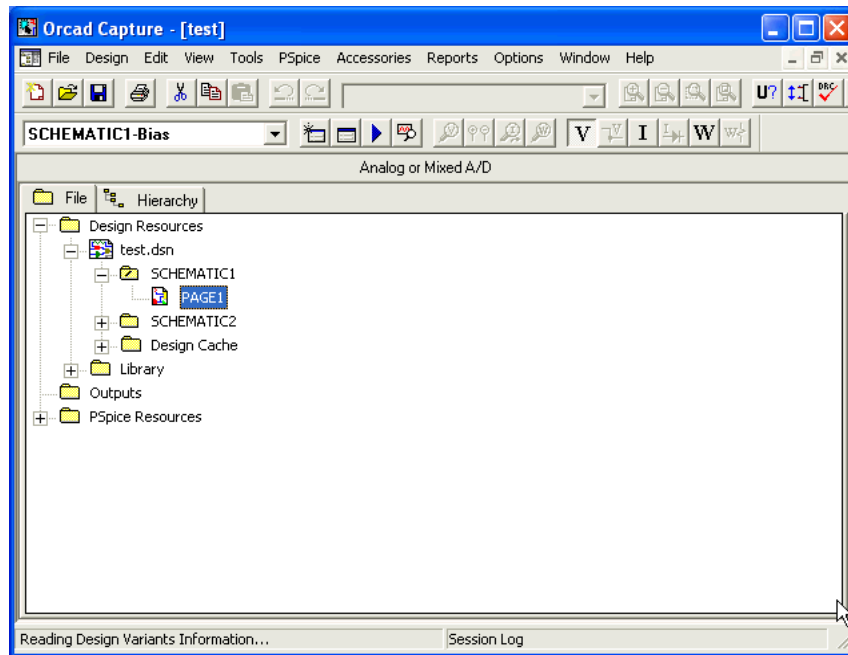
รูปที่ 2.21 หลังจากตั้งชื่อ, เลือกรูปแบบวงจรและ Folder แล้วให้กด OK ผ่านได้



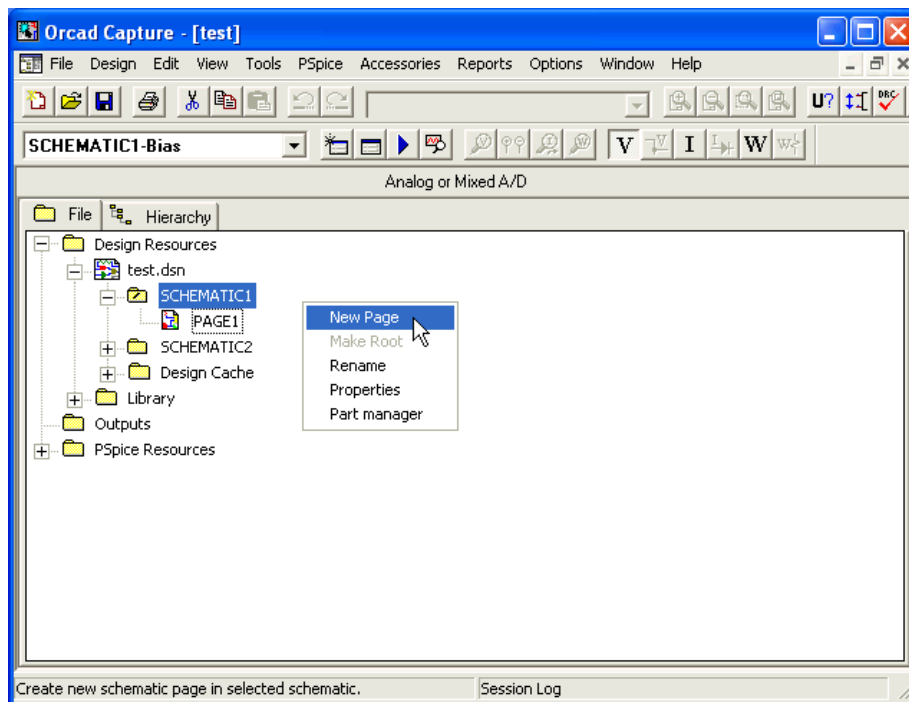
รูปที่ 2.22 โปรแกรมจะสร้างไฟล์ *.opi อัตโนมัติ ให้กด OK ผ่านได้



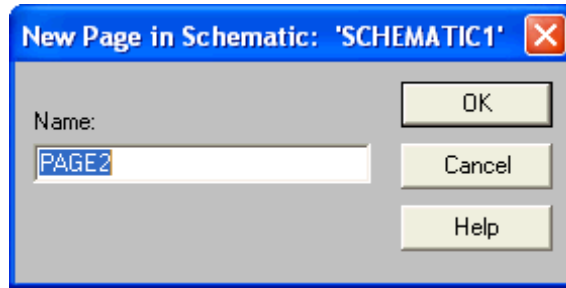
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของโปรแกรมที่จะใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้า



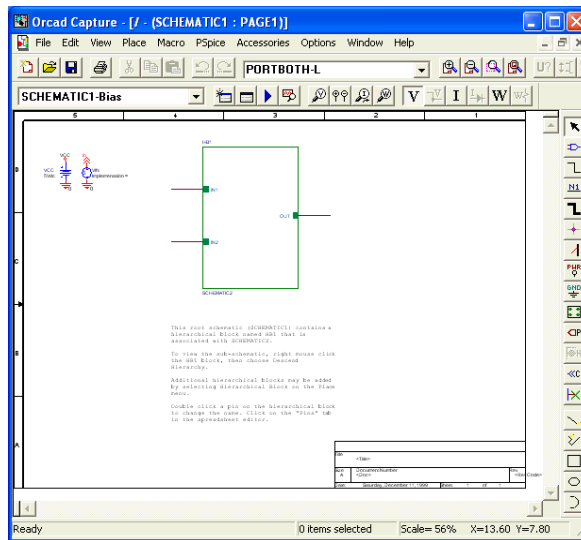
รูปที่ 2.24 สามารถเพิ่ม Page ได้โดยกดเมาส์ขวาที่ SCHEMATIC1



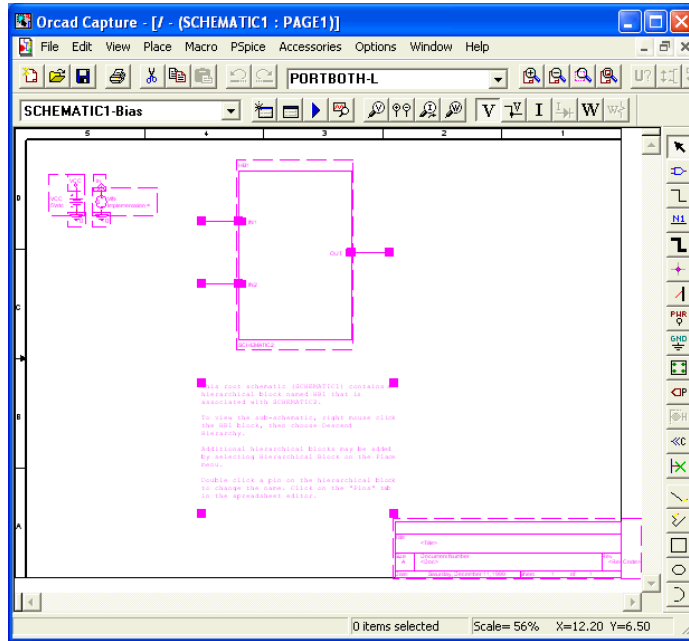
รูปที่ 2.25 ตั้งชื่อ Page ต่างๆ



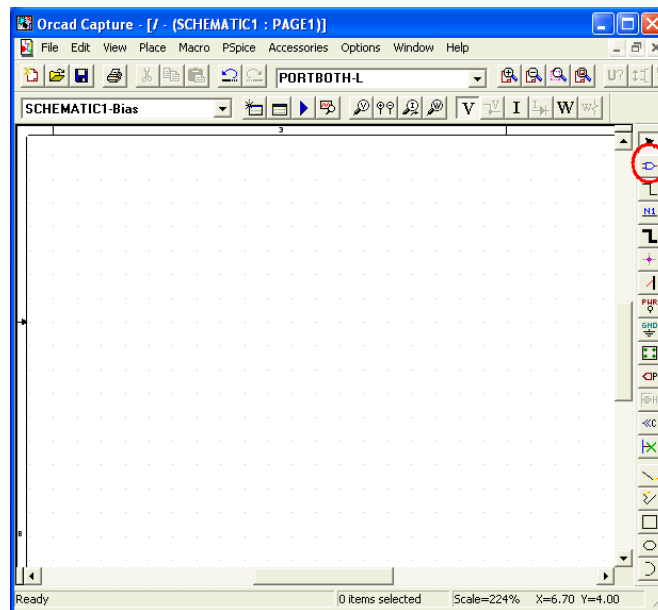
รูปที่ 2.26 เมื่อทำการ Double Click ที่ Page1 จะแสดงพื้นที่ในการเขียนวงจร



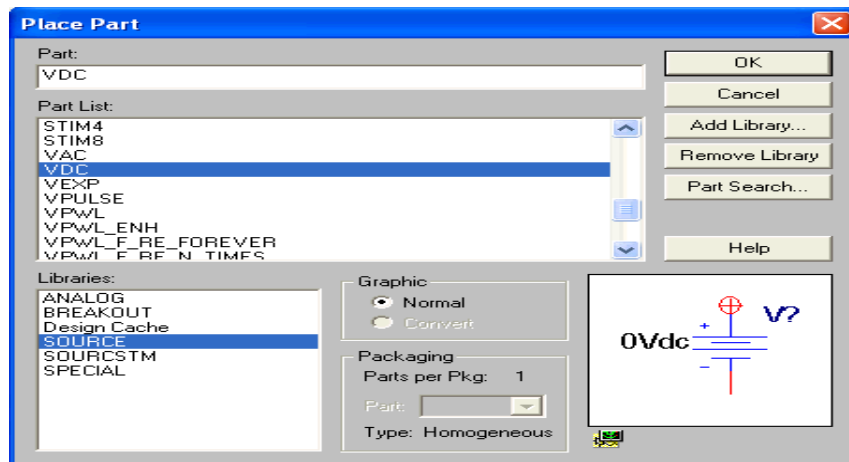
รูปที่ 2.27 กด Ctrl + a เลือกทั้งหมด กดปุ่ม Delete เตรียมพร้อมสำหรับการเขียนวงจร



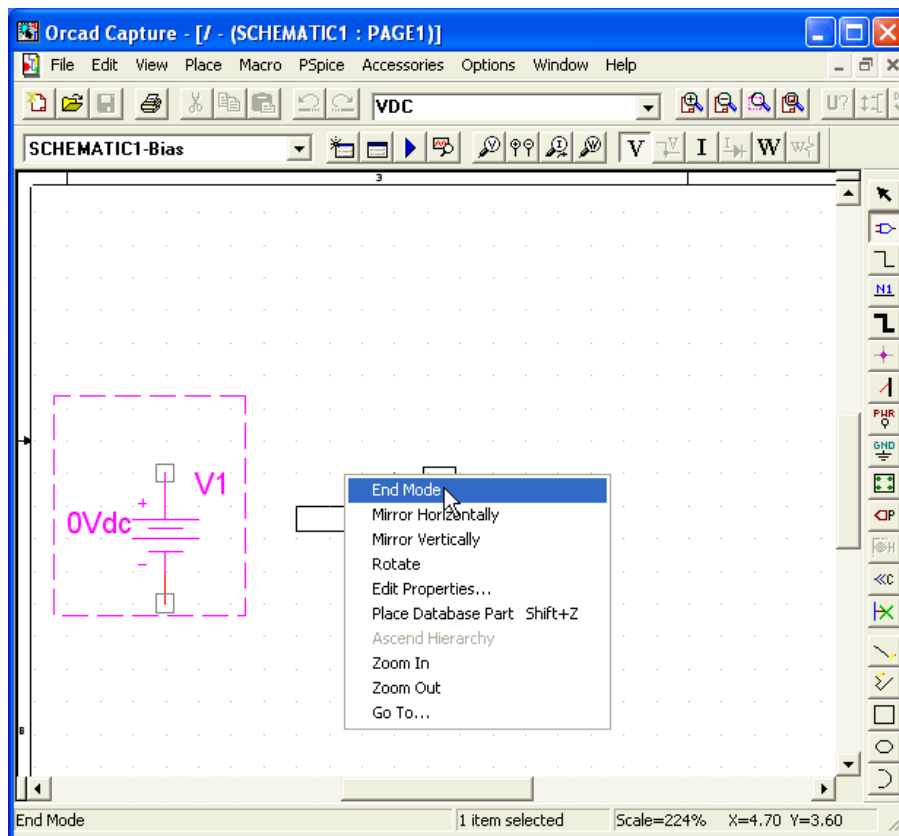
รูปที่ 2.28 กดปุ่ม Place Part เพื่อเรียกใช้อุปกรณ์



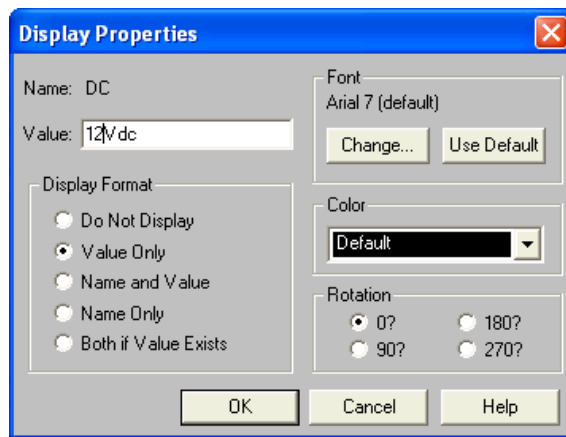
รูปที่ 2.29 อุปกรณ์จะถูกเก็บไว้เป็นหมวดหมู่ใน Libraries (1 File : 1 Libraries)



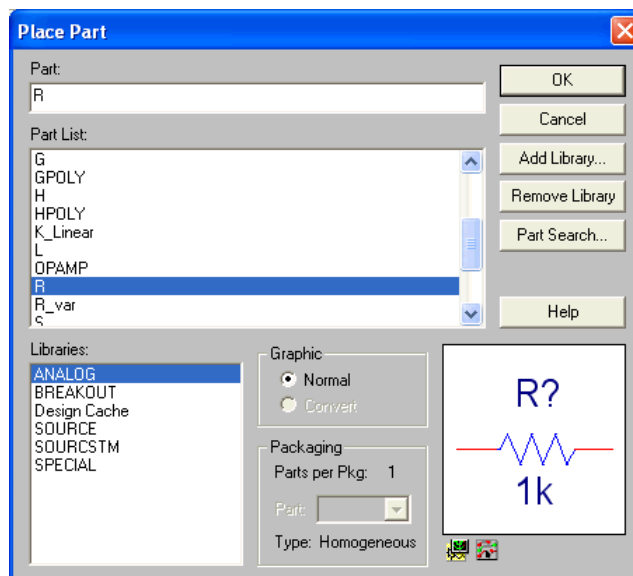
รูปที่ 2.30 เลือกอุปกรณ์ที่ต้องการโดยกดปุ่ม OK นำไปวางลงบนพื้นที่เขียนวงจร



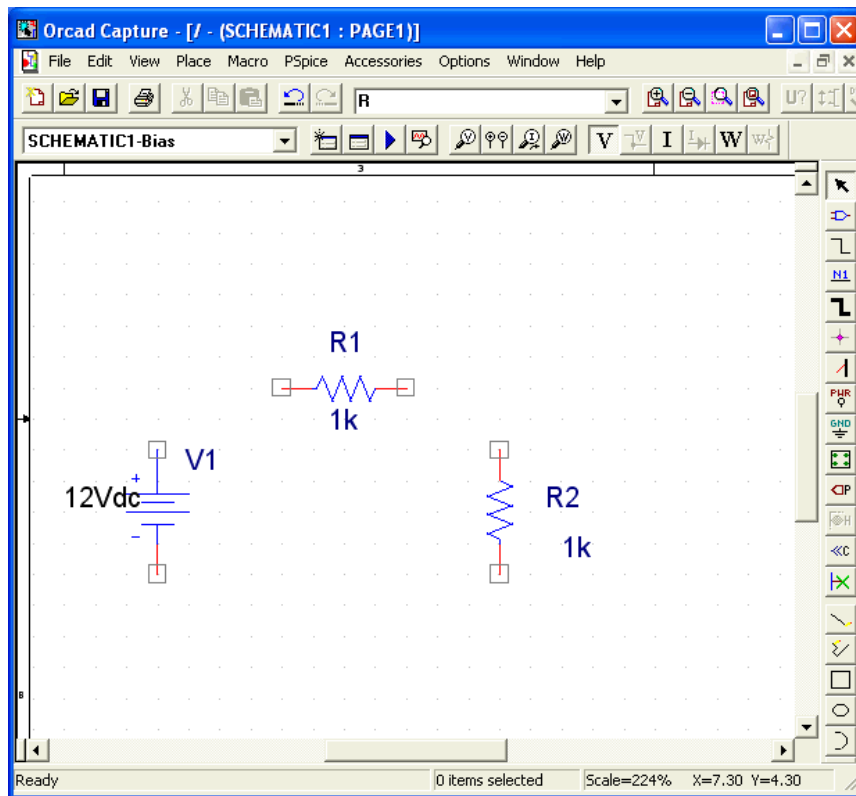
รูปที่ 2.31 Double Click ที่ค่าของอุปกรณ์ จะปรากฏ Dialog



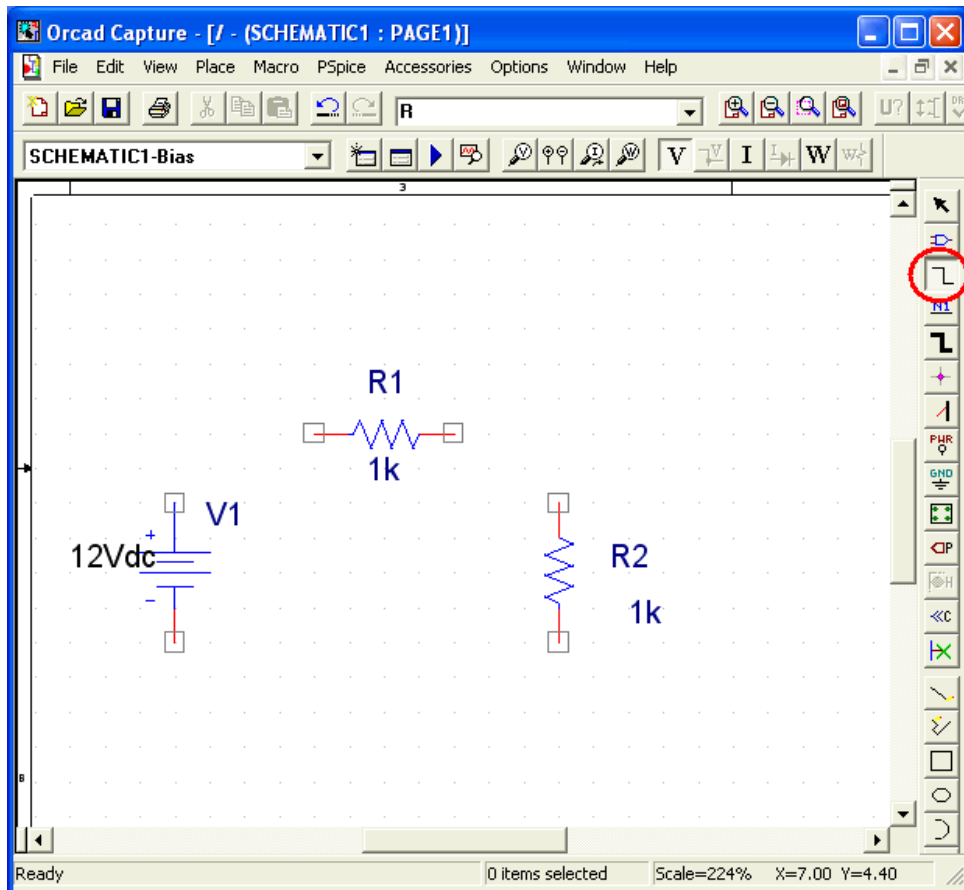
รูปที่ 2.32 เลือกความต้านทาน (R) ที่ Place Part อีกครั้ง



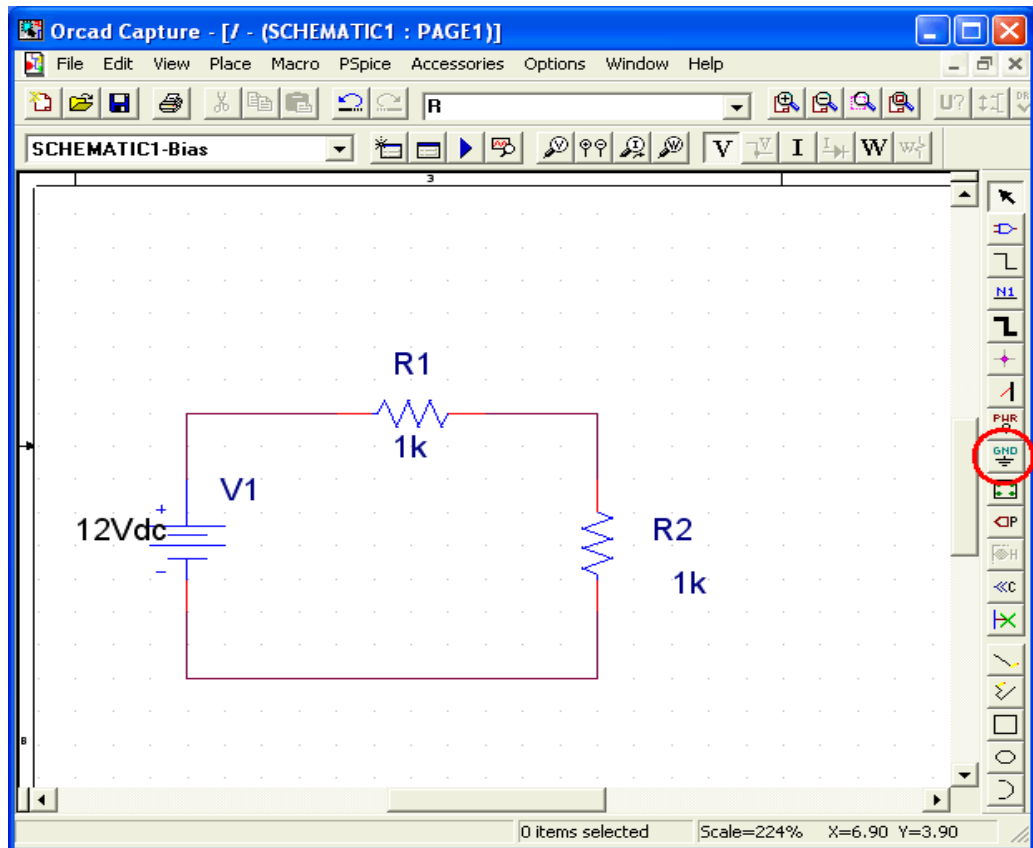
รูปที่ 2.33 นำความต้านทานมาวางลงในพื้นที่



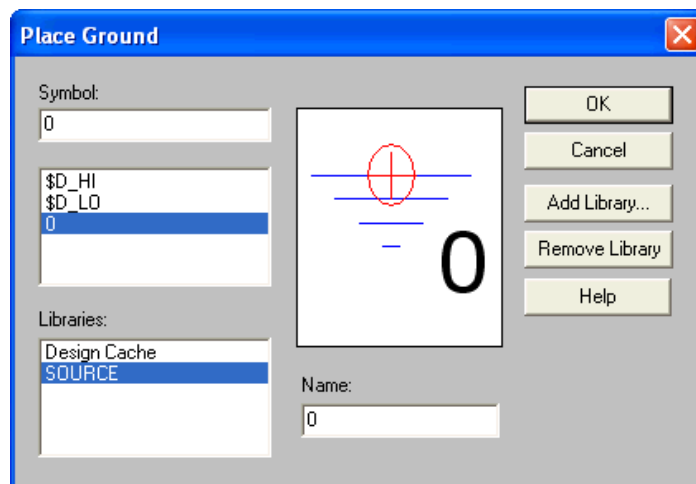
รูปที่ 2.34 ใช้คำสั่ง Line



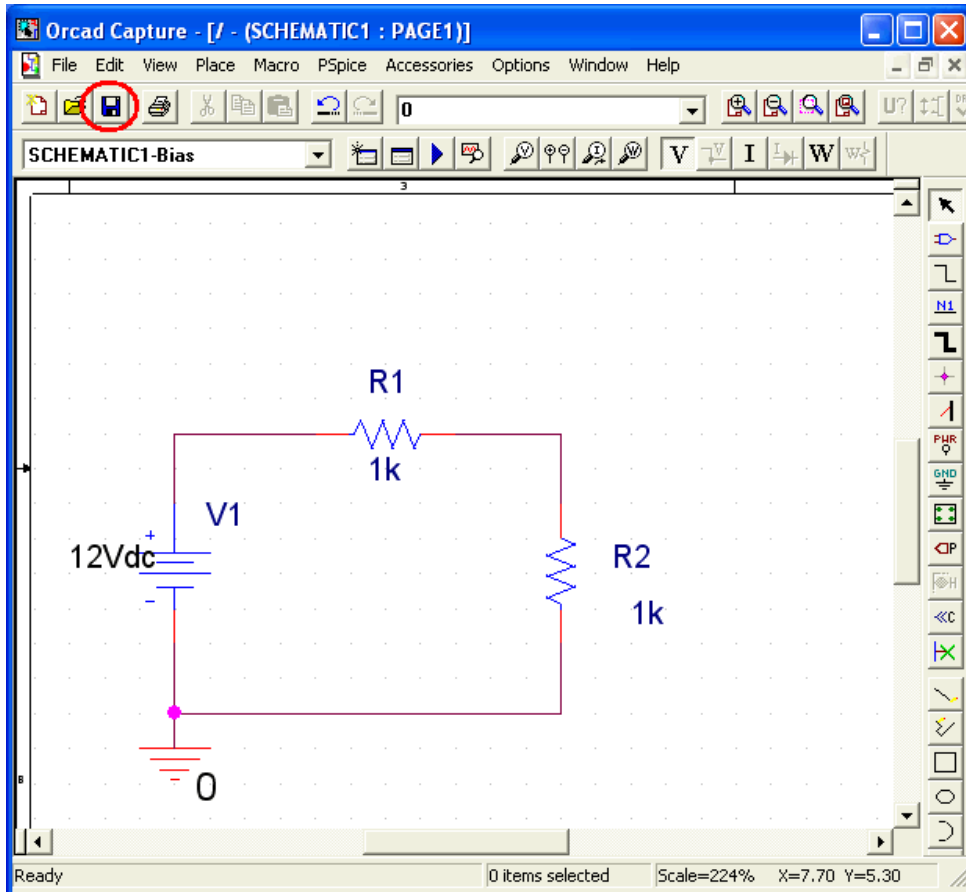
รูปที่ 2.35 ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าด้วยกัน



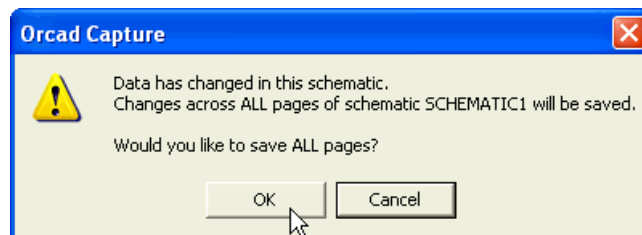
รูปที่ 2.36 เลือกคำสั่ง Ground



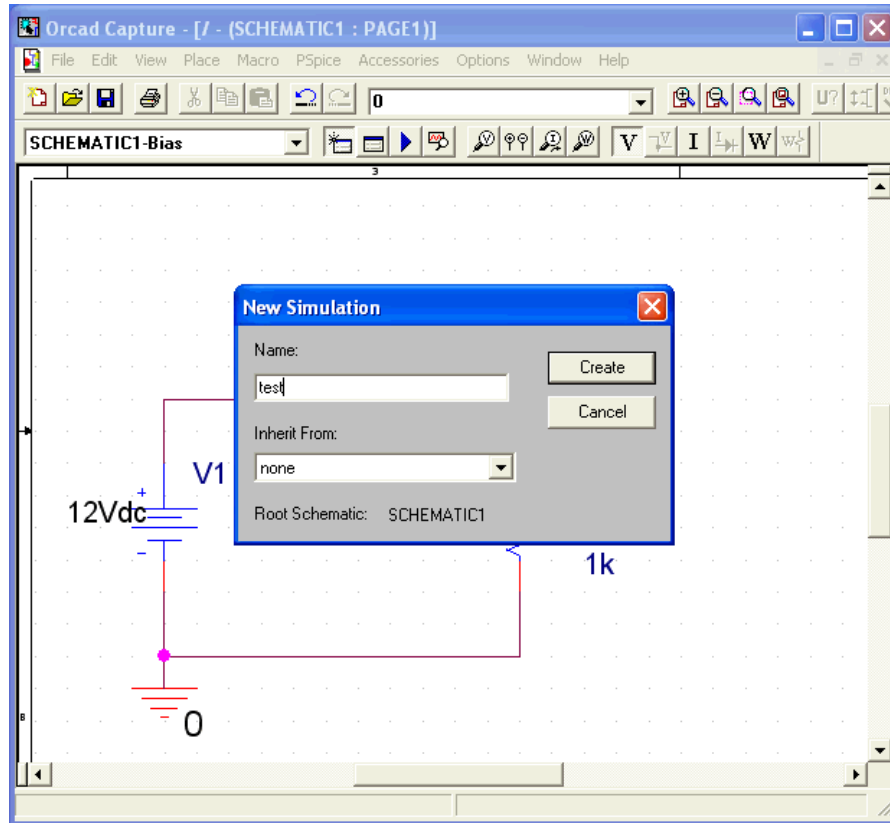
รูปที่ 2.37 เชื่อมต่อ Ground เข้ากับวงจรที่ออกแบบ จากนั้นทำการบันทึก



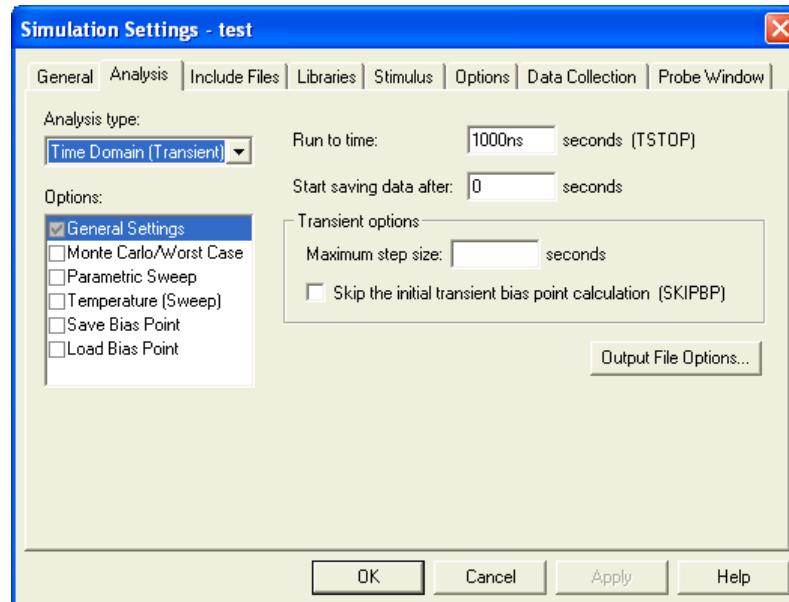
รูปที่ 2.38 เลือกปุ่ม OK เพื่อบันทึกทั้งหมด



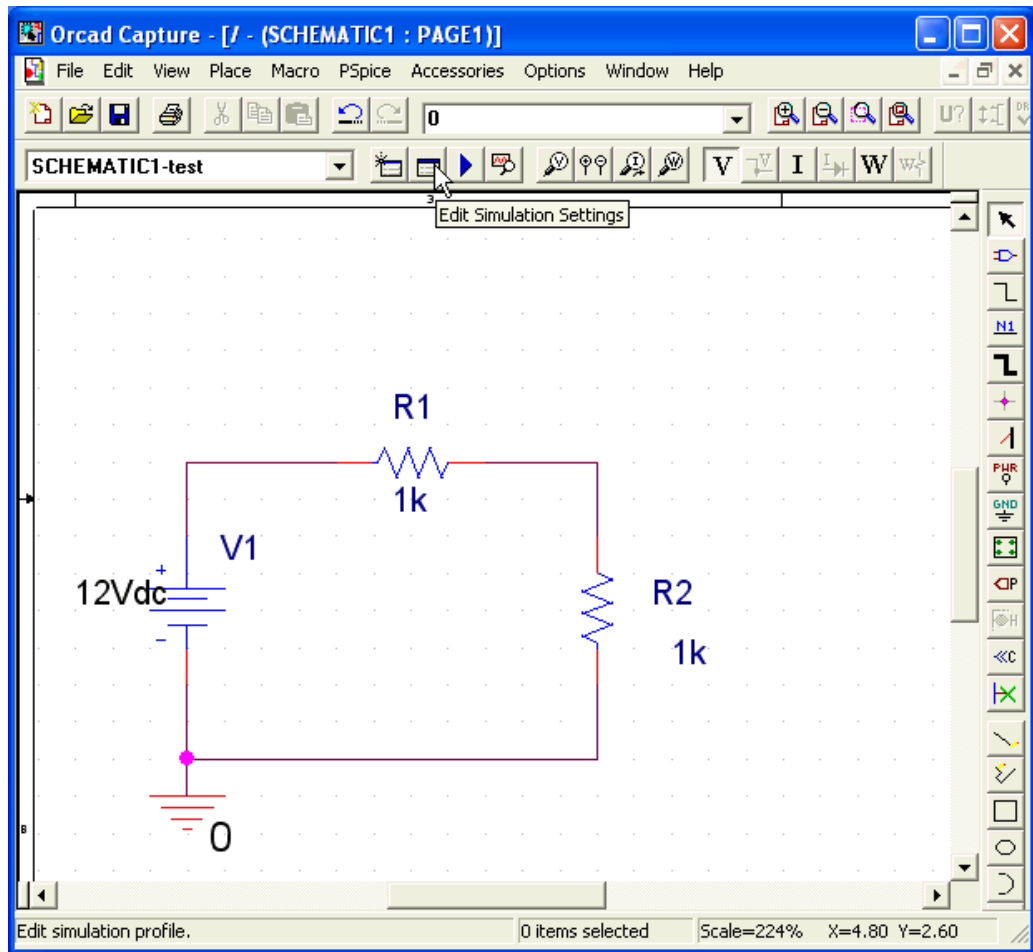
รูปที่ 2.39 กดปุ่ม New Simulate Profile จากนั้นตั้งชื่อไฟล์ไฟล์สำหรับ RUN



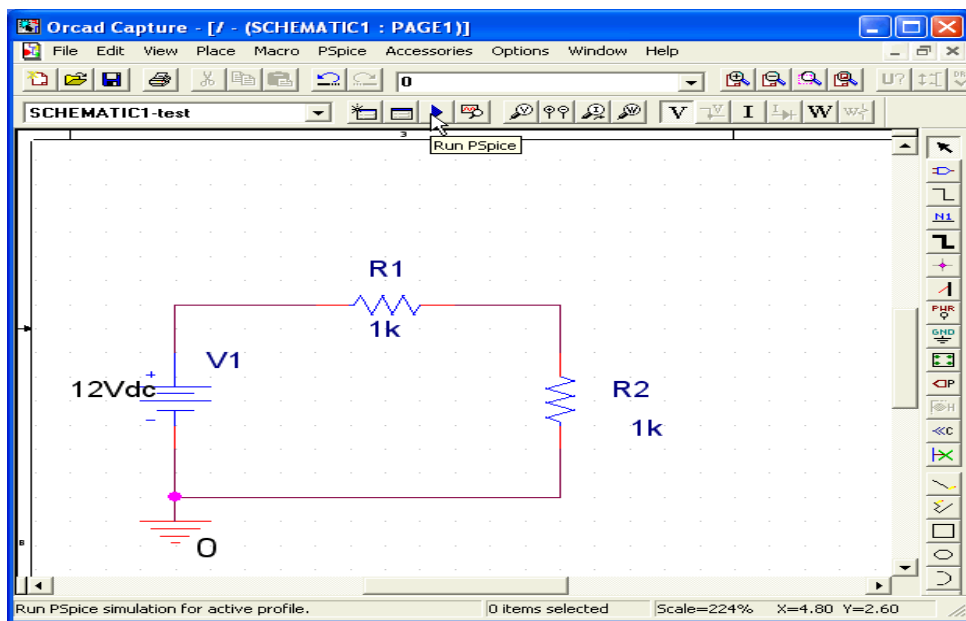
รูปที่ 2.40 Dialog Box ของ Simulation Setting ให้กดปุ่ม OK ผ่านได้



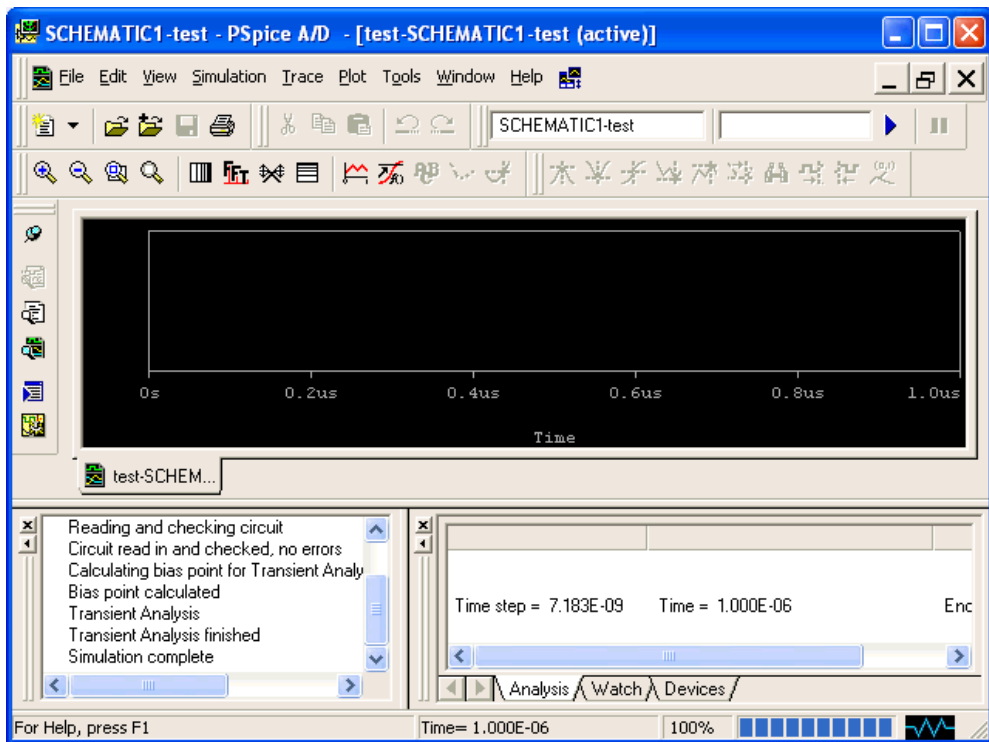
รูปที่ 2.41 หากต้องการแก้ไขรายละเอียดใหม่ให้กดปุ่ม Edit Simulation Settings



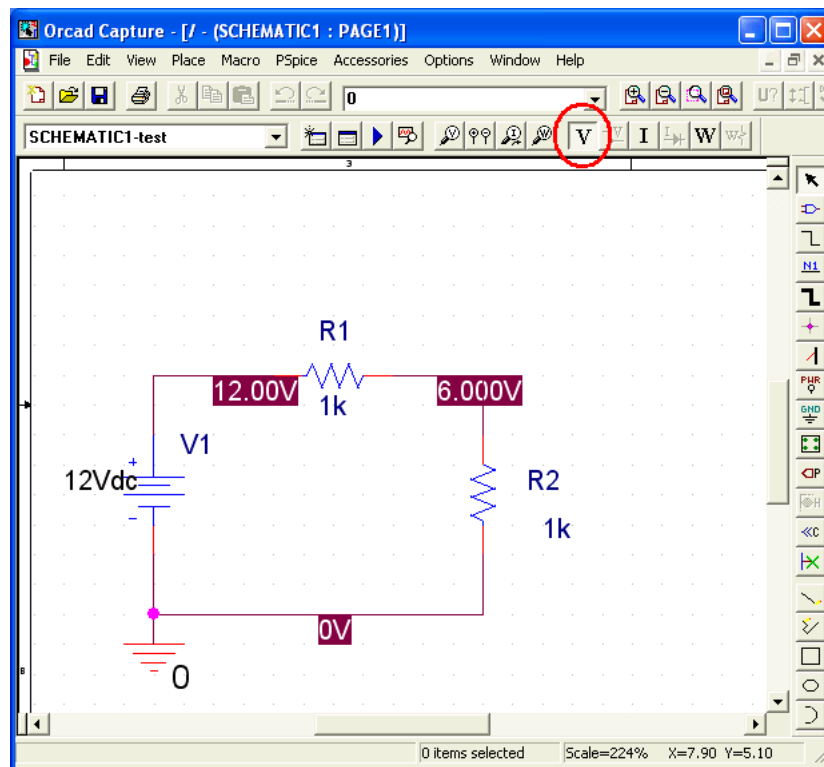
รูปที่ 2.42 ก่อนทำการ RUN ให้ทำการบันทึก (Save)



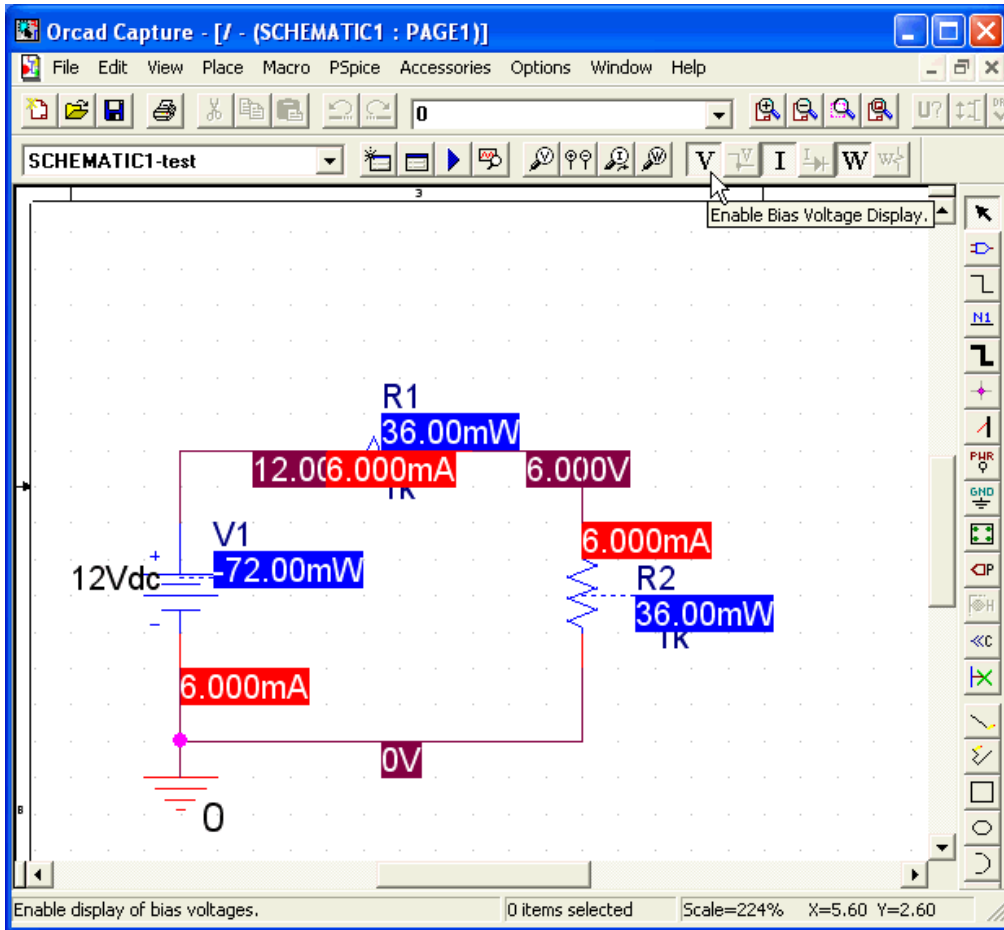
รูปที่ 2.43 แสดงหน้าต่างของผลการ RUN



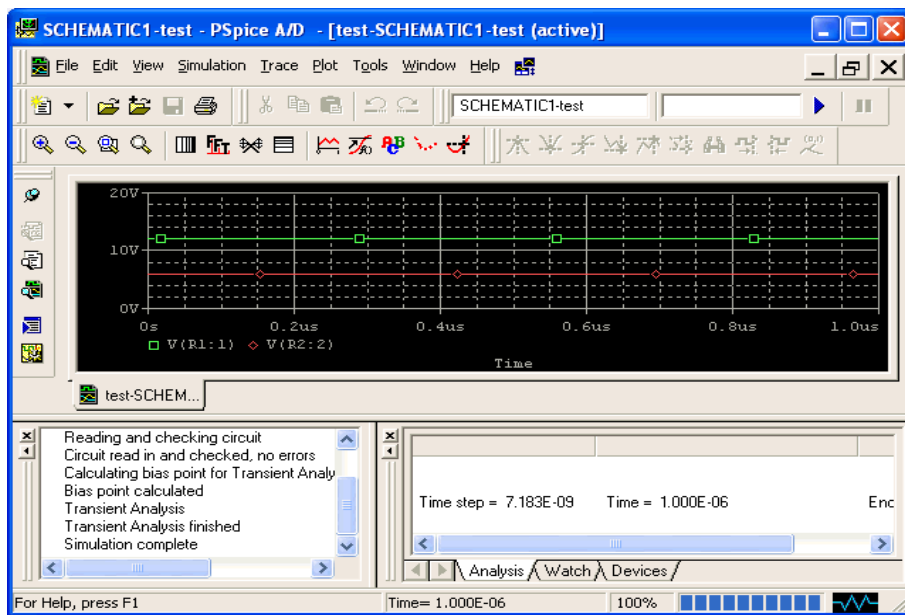
รูปที่ 2.44 สามารถให้โปรแกรมแสดงแรงดันที่จุดต่างๆ ของวงจรได้



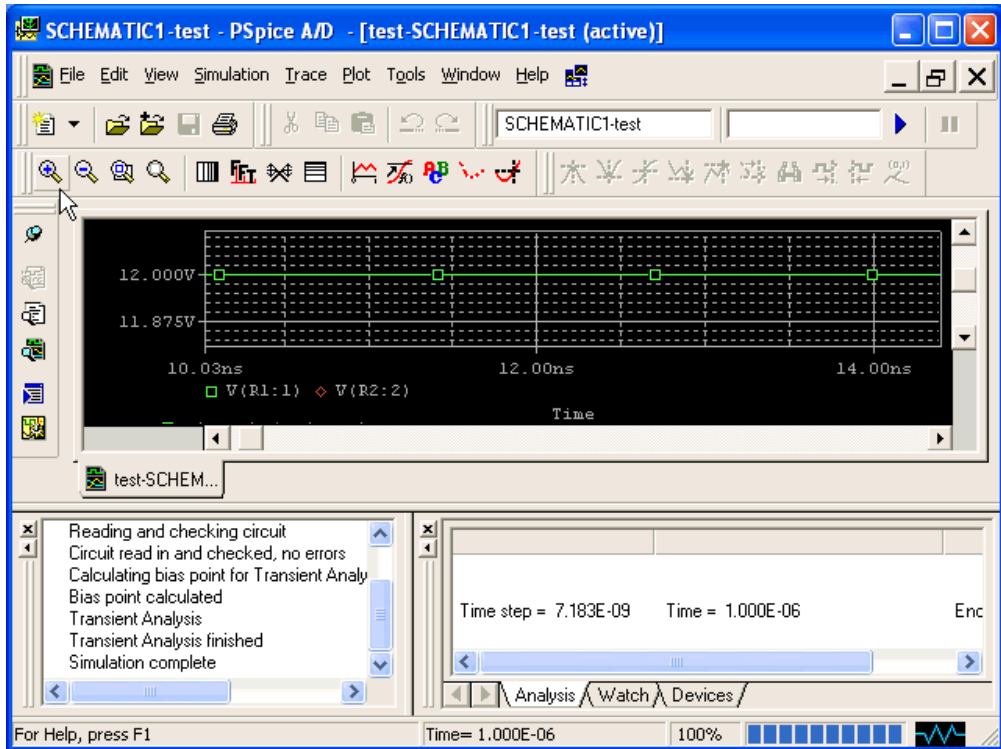
รูปที่ 2.45 สามารถเลือกให้โปรแกรมแสดงกระแสและวัตต์ที่จุดต่างๆ ของวงจรได้



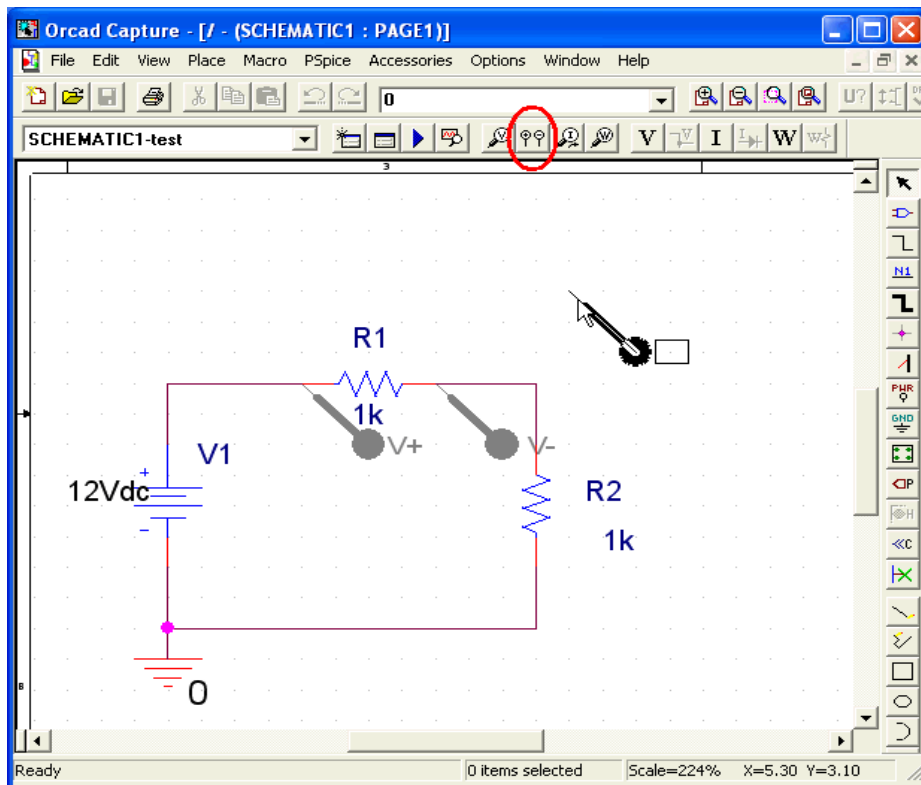
รูปที่ 2.46 ใช้โวลต์มิเตอร์แบบขั้วเดียว (วัดเทียบกับจุด Ground ของแหล่งจ่าย)



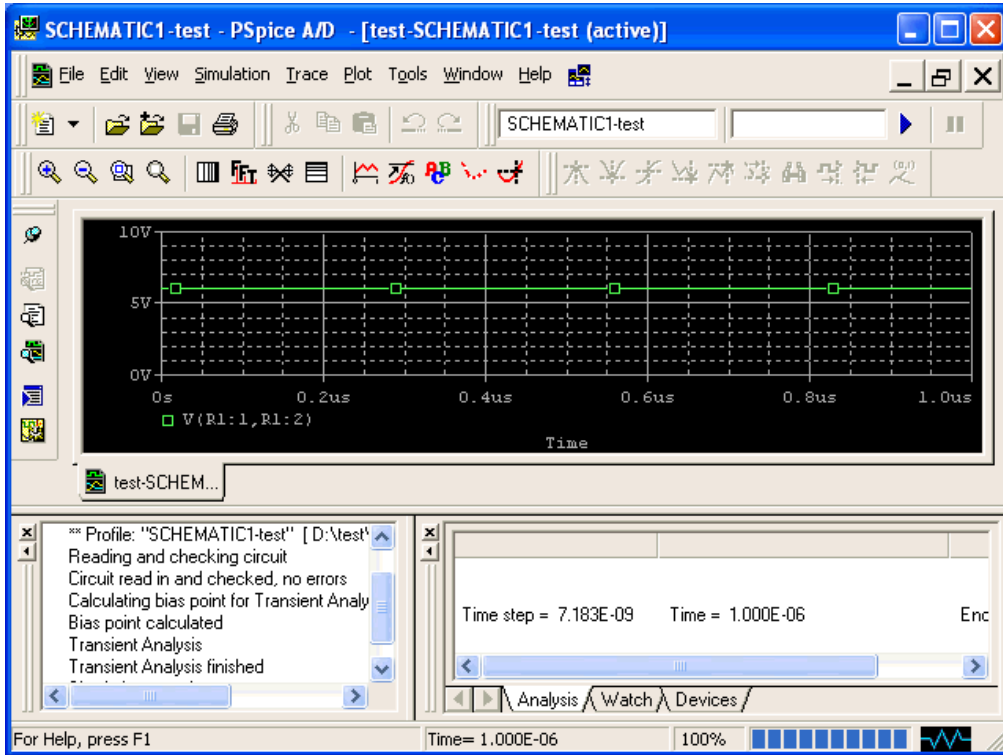
รูปที่ 2.47 สามารถ ZOOM ดูค่าของแรงดันได้



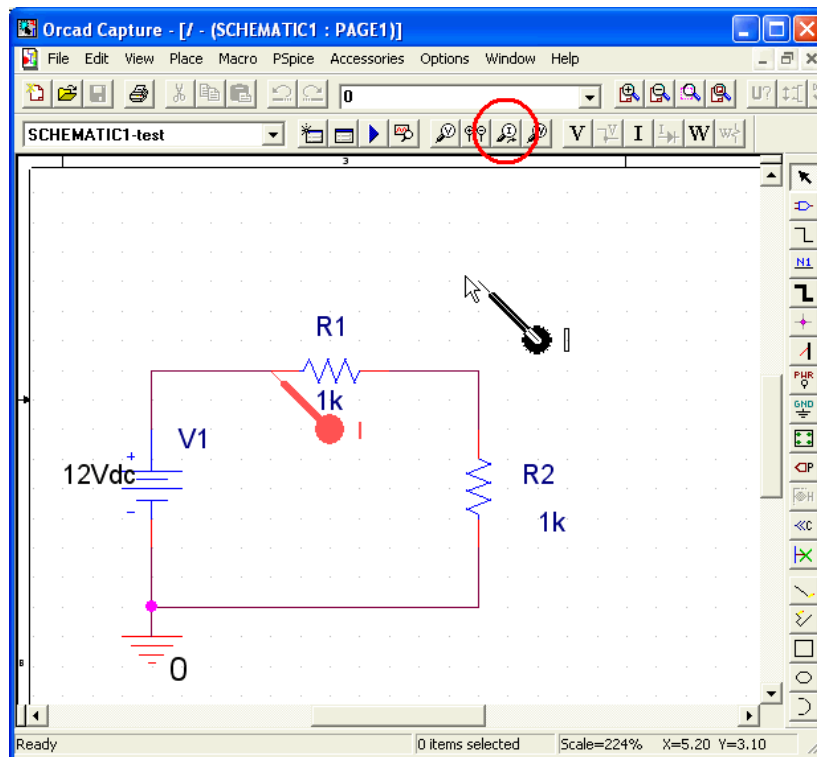
รูปที่ 2.48 ใช้โวลต์มิเตอร์แบบคู่ วัดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ได้



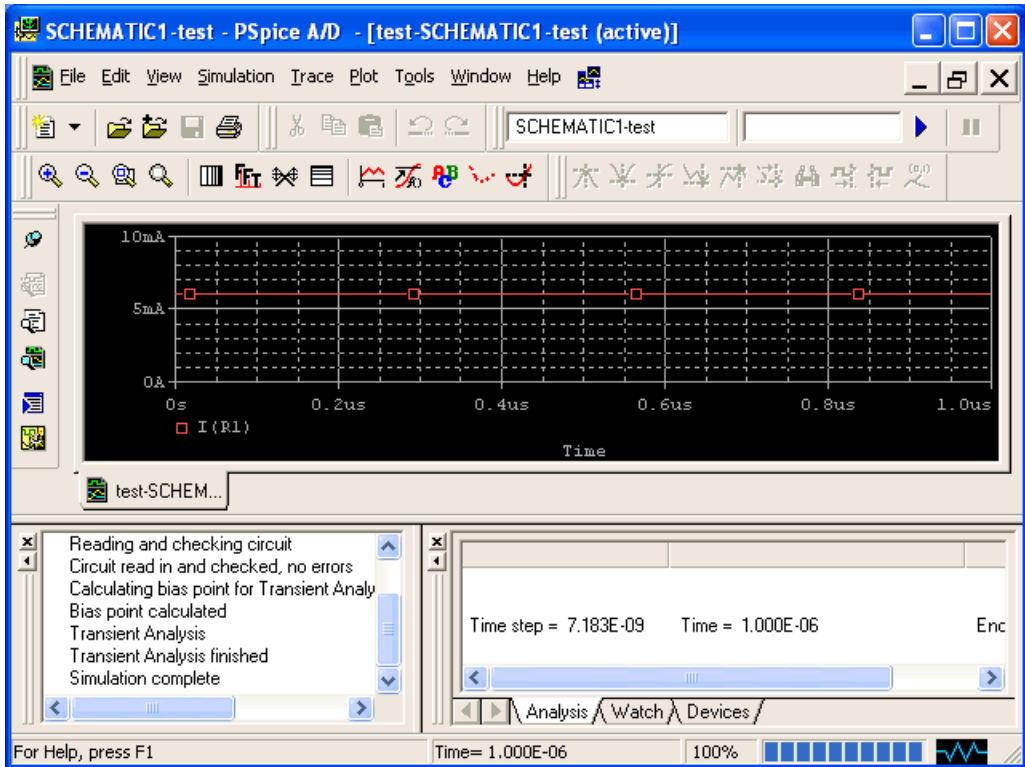
รูปที่ 2.49 เมื่อกดปุ่ม RUN โวลต์มิเตอร์จะผลของแรงดัน



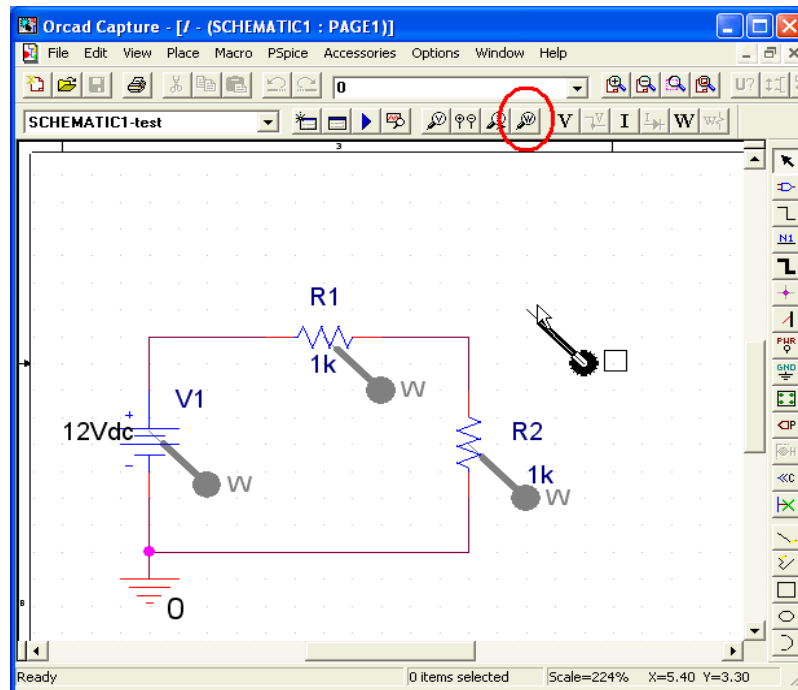
รูปที่ 2.50 ใช้แอมป์มิเตอร์แบบเดี่ยววัดกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์แต่ละตัวได้



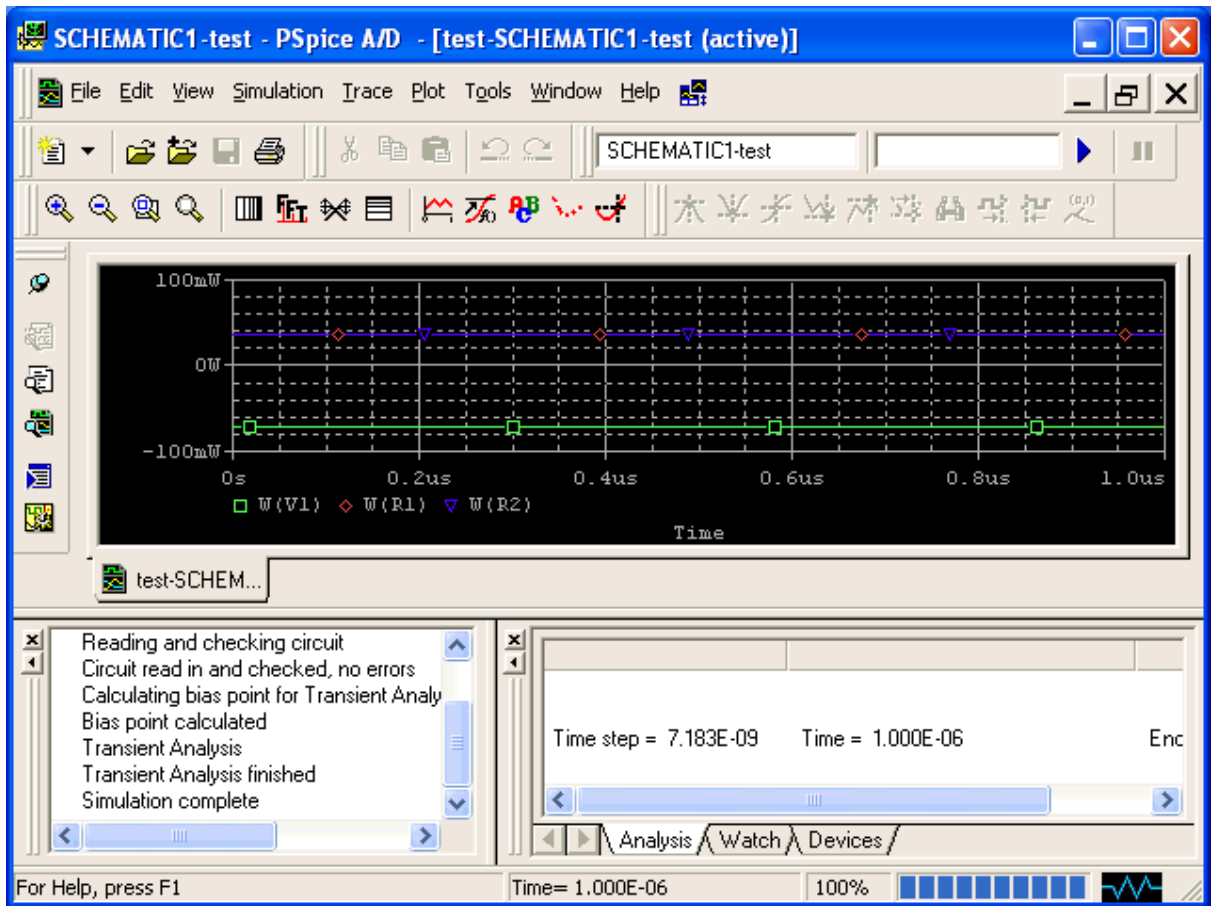
รูปที่ 2.51 เมื่อกดปุ่ม RUN แอมป์มิเตอร์จะผลของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.52 ใช้วัตต์มิเตอร์แบบเดี่ยว วัดกำลังวัตต์ที่อุปกรณ์แต่ละตัวได้



รูปที่ 2.53 เมื่อกดปุ่ม RUN วัตต์มิเตอร์จะผลของกำลังวัตต์



รูปที่ 2.54 ใน Place Part List จะแสดง รายการอุปกรณ์ที่เคยเรียกใช้มาแล้ว