การหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

INDUCTION HEATING

โดย

นาย กรกฎ เหมสถาปัตย์

นาย เกรียงไกร เริ่มมนตรี

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

03325

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2536

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ (INDUCTION HEATING)

ผู้จัดทำ

1.นาย กรกฎ เหมสถาปัตย์ 33100005

2.นาย เกรียงไกร เริ่มมนตรี 33100032

(อ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

(INDUCTION HEATING)

โดย นาย กรกฎ เหมสถาปัตย์ รหัส 33100005

นาย เกรียงไกร เริ่มมนตรี รหัส 33100032

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เริ่มพัฒนาการหลอมแบบเหนี่ยวนำความร้อนที่ความถี่เรโซแนนท์ เพื่อใช้สำหรับชุบผิวโลหะแข็ง ความถี่ที่ใช้ในงานนี้ โดยมากความถี่โดยประมาณ ซึ่งอาศัยจากค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องมือ ที่ความถี่เรโซแนนท์ ระบบเหนี่ยวนำความร้อนนี้สามารถปรับปรุงขึ้นให้ดีขึ้นกว่าเดิมได้ เมื่อความถี่เรโซแนนท์เปลี่ยนแปลงไปมาได้

Abstract

In this thesis is develop of surface hardening by induction heating at resonance frequency. Operating frequency of the MOSFET is controlled such that the effective value of output current of the MOSFET is kept maximum after predicting an approximate resonance frequency. This MOSFET is operative even when the resonance frequency changes extensively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทนำ

บทที่ 1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

บทที่ 2 โครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนและระบบควบคุม

บทที่ 3 ผลการทดลอง

บทที่ 4 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ภาคผนวก โปรแกรม, วงจรไฟฟ้า

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

การหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้นจะต้องทำงานภายใต้สภาวะความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเงื่อนไขการเกิดสภาวะดังกล่าว ขึ้นอยู่กับขนาดและคุณภาพของวัตถุที่จะเหนี่ยวนำให้ร้อน ค่าคาปาซิแตนซ์และอื่นๆ โดยทั่วๆไปวงจรเฟสล็อกลูป (PLL) จะถูกนำมาใช้สร้างสภาวะดังกล่าว

ในระบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบเก่าซึ่งก็คือระบบสเว็บฟรีเควนซี่ จะไม่สามารถใช้ได้ในกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง เพราะค่าความถี่เรโซแนนซ์ของเครื่องนั้นเรารู้ได้จากการทดสอบแล้ว และเงื่อนไขการเหนี่ยวนำความร้อนก็ไม่เปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีความต้องการที่จะให้ระบบทำงานที่ความถี่ต่างกัน เช่น วัตถุบางชนิดสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้ร้อนได้ที่ความถี่สองค่า ดังนั้นระบบที่สามารถทำงานได้แม้ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงไปมากจึงเป็นที่ต้องการ จึงได้มีการเสนอระบบใหม่ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีกว่าซึ่งก็คือระบบโหลดเรโซแนนซ์

ระบบโหลดเรโซแนนซ์นี้ก็คือระบบซึ่งจะทำการติดตามความถี่เรโซแนนซ์ของโหลดอยู่ตลอดเวลาในขณะที่ทำการหลอมโลหะอยู่ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 ทำหน้าที่แทนเฟสล็อคลูป ซึ่งสามารถที่จะทำงานได้เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไปมากๆ ซึ่งส่วนควบคุมความถี่ในระบบมีการทำงานดังนี้คือ

เริ่มแรกไมโครโปรเซสเซอร์จะทำการส่งค่าความถี่เริ่มต้นออกมาก่อนโดยผานวงจรดีทูเอแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก จากนั้นวีทูเอฟก็จะทำการเปลี่ยนให้เป็นความถี่ที่ต้องการอีกทีหนึ่ง ผ่านวงจรขับเพื่อไปขับอุปกรณ์สวิทช์ชิ่ง จากนั้นส่วนตรวจจับกระแสก็จะวัดค่ากระแสส่งผ่านวงจรเอทูดีแปลงกลับมาเป็นดิจิตอล เพื่อให้ไมโครโปรเซสเซอร์ประมวลผลต่อไป เสร็จแล้วไมโครโปรเซสเซอร์ก็จะส่งข้อมูลใหม่ออกมา ซึ่งจะทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไป การทำงานก็จะวนเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่งไมโครโปรเซสเซอร์พบว่า กระแสที่วัดได้เป็นกระแสสูงสุด ก็จะเก็บค่านั้นไว้ และถ้าหากค่ากระแสลดลงเมื่อวัตถุร้อนขึ้น ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนไป ส่วนควบคุมนี้ก็ยังจะสามารถติดตามหาความถี่เรโซแนนซ์ต่อไปได้

จากหลักการทำงานที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น จะเห็นได้ว่า ระบบนี้มีความน่าเชื่อถือได้ เนื่องจากการใช้กระแสมาควบคุมความถี่ ยิ่งไปกว่านั้น ยังมีความรวดเร็วในการค้นหาความถี่เรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการนำเอาระบบควบคุมความถี่แบบใหม่นี้มาใช้ค้นหาความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ และสามารถเหนี่ยวนำความร้อนได้ที่ตำแหน่งที่ต้องการ

บทที่ 1

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

1.1 ทฤษฎีการให้ความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

(Induction heating theory)

ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนชิ้นงานมาจากสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดฟลักซ์ , กระแสและกำลังงาน เริ่มแรกโดยอาศัยสมการคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาง่ายๆของวัตถุที่เป็นแผ่นก่อน โดยผลจะอยู่ในรูปของฟังก์ชั่นไซน์ (Function sine) หรือเอ็กโปเนนเชียลซึ่งใช้กันแพร่หลายมากกว่าไฮเปอร์โบลิค (Hyperbolic) หรือเบสเสวฟังก์ชั่น (Bessel Function) เพื่อให้เกิดความเข้าใจดีขึ้นสำหรับตัวอย่างแรกๆจะเป็นแผ่นแบนกว้าง (Semi-infinite slab) ซึ่งจำเป็นในหลายงานและยังมีสมการอื่นในการคำนวนต่อไป

1.1.2 สกินเอฟเฟคสำหรับแผ่นแบนกว้าง

(Skin effect for Semi-infinite slab)

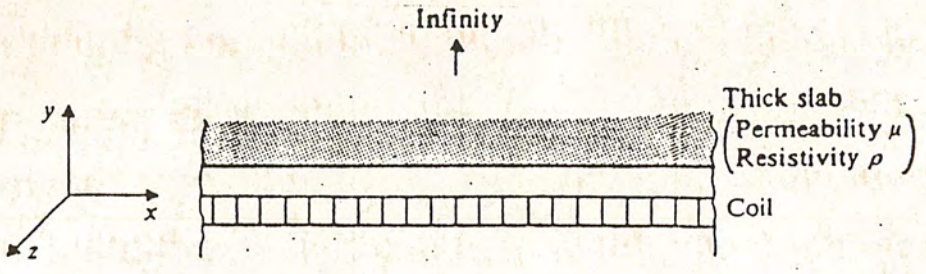
การประยุกต์การใช้งานการให้ความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้นจะมีการใช้งานในหลายๆแบบรวมทั้งโหลดทรงกระบอก และรูปร่างทรงกระบอกนี้เมื่อมองทางด้านคณิตศาสตร์ไม่ใช่สิ่งที่ง่าย เพื่อให้เกิดความเข้าใจในสกินเอฟเฟค เราจะพิจารณาอย่างง่ายๆโดยมองเป็นแผ่นแบนๆ (ให้รัศมีของทรงกระบอกยาวเป็นอนันต์) และให้ผลของสมการเป็นฟังก์ชั่นไซน์และเอ็กโปเนนเชียลแทนที่จะเป็นเบสเสวฟังก์ชั่น ถ้าเรากำหนดให้เป็นแผ่นบางและมีกระแสไหลทั้ง 2 หน้า จะทำให้พิจารณาลำบากและมีผลลัพธ์ที่ยุ่งยาก ฉนั้นจึงกำหนดให้ใช้แผ่นแบนกว้างซึ่งมีความหนามากกว่าความลึกผิว (Skin depth) มาก จะทำให้สมการดูง่ายลง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วความเข้าใจในระบบคณิตศาสตร์ที่ง่ายๆของแผ่นแบนกว้างก็เพียงพอแล้วสำหรับการประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้าน

ในรูปที่ 1.1 ถ้าเรานำคอยล์วางใกล้กับผิวของชิ้นงาน และถ้าเรามองว่าชิ้นงานเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่ๆมากๆดังนั้นคอยล์จะมีรัศมีอนันต์จะทำให้เราสามารถพิจารณาเป็นแผ่นแบนๆได้ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก H_0 บนผิวของชิ้นงานที่เป็นแผ่น (Slab) ควรที่จะจำไว้ว่า H อยู่ในหน่วยแอมแปร์ต่อเมตร (Amperes per metre) ไม่ได้อยู่ในหน่วยแอมแปร์เทอร์น (Ampere-turns) และความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ได้มีผลมาจากการแบ่งแยกกระแสที่ไหลอยู่ในแต่ละตัวนำ (ที่เกิดจากรอบๆของคอยล์) เสียทีเดียวนักแต่สิ่งที่เป็นผลจากการแยกกระแสออกไปโดยจำนวนรอบของคอยล์คือ ค่าความต้านทานของคอยล์ , ค่าโวลท์เตจและค่ากระแสที่จ่ายเข้าสู่คอยล์ คอยล์จะถูกสมมติให้ใกล้กับชิ้นงานมากดังนั้น H_0 ของคอยล์จะเท่ากับ H_0 ที่ผิวของชิ้นงาน

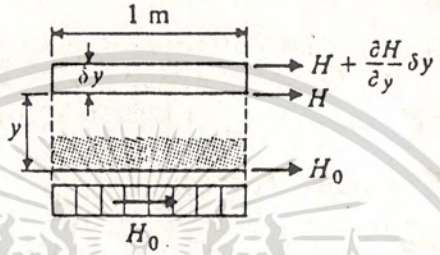
สำหรับการให้ความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำที่ให้ขนาดของสนามแม่เหล็กกลับตัวไปมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความเข้าใจนี้เราให้สนามแม่เหล็ก H_x ในแนวแกน x เพื่อให้เกิดเอ็ดดี้เคอร์เรนท์ในแนวแกน z



(a)



(b)

รูปที่ 1.1 แสดงการมองโหลดเป็นแผ่นแบนกว้างโดย

(a) คอยล์ว่างอยู่ใกล้แผ่นแบนกว้าง

(b) การกำหนดขนาดของแผ่นแบนกว้าง

จากเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่กล่าวมาจะได้ว่า

$$H_x \ (Y=0) = H_{0M} \cos\omega t \qquad (1.1)$$

$$H_y \ , \ H_z = 0 \quad \text{ทุกๆแห่ง}$$

การกระจายของสนามแม่เหล็ก (H) , สนามไฟฟ้า (E) และความหนาแน่นกระแส (J) ในโลหะที่สัมพันธ์กับความถี่อธิบายได้โดยสมการการแพร่ (Diffusion equation)

$$\nabla^2 H = \frac{\mu}{\rho}\frac{dH}{dt} \ ; \ \nabla^2 E = \frac{\mu}{\rho}\frac{dE}{dt} \ ; \ \nabla^2 J = \frac{\mu}{\rho}\frac{dJ}{dt} \qquad (1.2)$$

ซึ่งเราจะเรียกว่าสมการสกินเอฟเฟค (Skin effect equation)

จากรูปแบบของ H

$$\nabla^2 H = \frac{d^2H}{dx^2} + \frac{d^2H}{dY^2} + \frac{d^2H}{dz^2} = \frac{\mu}{\rho}\frac{d(H_x + H_y + H_z)}{dt}$$

แต่ $H_y = H_z = 0$ ดังนั้น $H = H_x$ เท่านั้นและไม่มีการแปรเปลี่ยนในแนวแกน x และ z ทำให้สมการลดรูปลงเหลือเพียง $\nabla^2 H = d^2H_x/dY^2$ ดังนั้น

$$\frac{d^2H_x}{dY^2} = \frac{\mu}{\rho}\frac{dH_x}{dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ของสมการนี้จะอยู่ในรูป $H_x = H_x(Y)\cos wt$ ซึ่ง $H_x(Y)$ จะเปลี่ยนไปตามระยะความลึก Y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียลได้

โดยเป็นส่วนจริงของ $H_x(Y)\exp(jwt)$ นำค่าที่ได้แทนลงในสมการ (1.2) และจะใช้ส่วนจริงเมื่อเราต้องการอีก

$$\frac{d^2H_x}{dY^2} - \frac{\mu jwH_x}{\rho} = 0 \qquad (1.3)$$

ให้ $\alpha^2 = \mu w/2\rho$

$$\frac{d^2H_x}{dY^2} - 2j\alpha^2 H_x = 0$$

ให้ $K^2 = 2j\alpha^2$

$$\frac{d^2H_x}{dY^2} - K^2 H_x = 0$$

จะได้ $H_x = A_1\exp(KY) + A_2\exp(-KY)$

หาค่า A_1 และ A_2 จากเงื่อนไขขอบเขต เมื่อ Y = infinity H_x จะต้องมีค่าจำกัดค่าหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ให้มีค่าเท่ากับ 0 และทำให้ได้ค่า $A_1 = 0$ และเมื่อ $Y=0$; $H_x = H_{om}\exp(jwt)$

ดังนั้น $H_x(Y) = H_{om}\exp(-\alpha\sqrt{2j})\exp(jwt)$;

แต่ $\sqrt{2j} = 1+j$

$$H_x(Y) = H_{om}\exp[-(1+j)\alpha Y + jwt]$$

$$= H_{om}\exp(-\alpha Y)\exp[j(wt-\alpha Y)]$$

เมื่อแทนกลับไปอยู่ในส่วนจริงอีกจะได้

$$H_x(Y) = H_{om}\exp(-\alpha Y)\cos(wt-\alpha Y) \qquad (1.4)$$

เป็นสมการที่สำคัญมากในการให้ความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

1.1.2 ค่าความลึกผิว

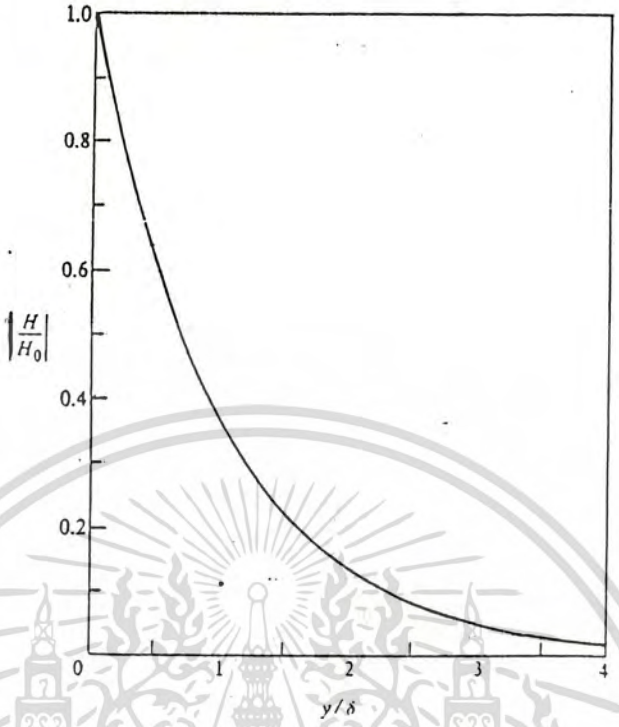
1. ที่ผิว $Y = 0$, $H_x = H_{om}\cos wt$

2. ที่ระยะความลึก Y ขนาดของสนามแม่เหล็กจะตกลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลและแปรไปตามความถี่ (wt) ; และมีค่าความต่างเฟสเท่ากับ $(-\alpha Y)$ จากสนามที่ผิว

เมื่อ $Y = 1/\alpha$ ขนาดจะเท่ากับ e^{-1} เท่าของที่ผิวและต่างเฟสไป 1 เรเดียน (57.3) ซึ่งขนาด $1/e = 0.368$ ของค่าที่ผิว ให้ชื่อว่าค่าความลึกผิว (Skin depth) หรือ depth of penetration, S แต่ไม่ได้หมายความว่าเมื่อเลยค่าความลึกผิวไปแล้วจะไม่มีสนามอยู่เลยตัว อย่างเช่น ที่ความลึก 2 เท่าของค่าความลึกผิว ($Y = 2/\alpha$) ขนาดของสนามเท่ากับ $e^{-2}H_{om}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(หรือ $0.135H_{om}$) จะเห็นว่ามีค่าสนามอยู่แต่ค่าลดลงจนเหลือค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รูปที่ 1.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ H ต่อค่าความลึกมักจะใช้เรโช Y/S ในงานการให้ความร้อนโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ



รูปที่ 1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้าสนามแม่เหล็ก (H) ต่อความลึก S = ความลึกผิวดังสมการที่ 1.5

เราก้าหนดให้ $\alpha^2 = \mu w/2\rho$

$$\text{Depth of penetration , } S = (2\rho/\mu w)^{1/2} \qquad (1.5)$$

โดยที่ $\mu = \mu_r \mu_o$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความลึกผิวขึ้นอยู่กับ $(\text{resistivity})^{1/2}$, $1/(\text{permeability})^{1/2}$ และ $1/\sqrt{f}$

1.1.3 ค่าความหนาแน่นกระแส ,ความหนาแน่นฟลักซ์ และสนามไฟฟ้า

(Current density , flux density and electric field)

จากสมการ $B = \mu H$ โดยเราจะสมติว่าวัตถุไม่มีการอิ่มตัวจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเราจะได้ว่า

$$B_y = B_{om}\exp(-\alpha Y)\cos(wt-\alpha Y) \qquad (1.6)$$

เราสามารถที่จะใช้สมการของแม็กซ์เวลที่ความถี่ต่ำ (low frequency Maxwell equation) $J = \text{curl } H$ เพื่อที่จะหาค่า J ในแผ่นแบนกว้าง ดีเทอร์มิแนนท์ (Determinant) สำหรับ curl H ก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

033252

$$\begin{vmatrix} i & j & K \\ \frac{d}{dx} & \frac{d}{dY} & \frac{d}{dz} \\ H_x & H_Y & H_z \end{vmatrix}$$

เราได้กล่าวมาแล้วว่า $H_Y = H_z = 0$ และ H ไม่มีการแปรเปลี่ยนไปในแนวแกน x และ z ดังนั้น

$$\text{curl } H = \begin{vmatrix} i & j & K \\ 0 & \frac{d}{dY} & 0 \\ H_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

และ

$$J_z = -K\frac{dH_x}{dY} = K[-\exp(jwt)[\frac{d}{dY}\exp(-\alpha Y\sqrt{2}j)]]H_{om} \quad \text{(real part)}$$

$$= K[\alpha\sqrt{(2j)}\exp(-\alpha Y\sqrt{(2j)}+jwt)]H_{om} \quad \text{(real part)}$$

แต่ $\sqrt{(2j)} = 1+j = \sqrt{2}\exp(j\pi/4)$ และดังนั้น

$$J_z = K[\alpha\sqrt{2}\exp[-\alpha Y(1+j)+jwt+j\pi/4]]H_{om}$$

$$= K\alpha\sqrt{2}H_{om}[\exp(-\alpha Y)\cos(wt-\alpha Y+\pi/4)] \quad (1.7)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า J ตั้งฉากกับ H และต่างเฟสกันกับ H 45 องศา

เมื่อ Y = 0

$$J_{zo} = \sqrt{2}H_{om}\alpha\exp[j(wt+\pi/4)] = \sqrt{2}H_{xo}\alpha\exp(j\pi/4),$$

ดังนั้น

$$J_z(Y) = J_{om}\exp[jwt-\alpha Y\sqrt{(2j)}] = J_{om}\exp(-\alpha Y)\cos(wt-\alpha Y) \quad (1.8)$$

จากลักษณะนี้แสดงว่าการแปรเปลี่ยนของ J_z เป็นไปในลักษณะเดียวกับ H และ B ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าที่ผิวของมัน

เราทราบว่า $E = \rho J$ ดังนั้น

$$E = \rho J = \rho J_{om}\exp(-\alpha Y)\cos(wt-\alpha Y) \quad (1.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการทั้งหมดที่ผ่านมาทำให้เราทราบว่าค่าทางแม่เหล็กต่างๆ (H,B,J และ E) ต่างก็อยู่ในกฎเกณฑ์ของสกินเอฟเฟคและรูป 1.2 ก็สามารถนำมาใช้กับ $\left|B/B_0\right|$, $\left|J/J_0\right|$ หรือ $\left|E/E_0\right|$ ได้

1.1.4 กระแสทั้งหมดในชิ้นงาน (Total current)

กระแสทั้งหมดในความกว้าง 1 เมตร สามารถหาได้โดยการอินทริเกรต J ในตลอดความลึกของแผ่นกว้างแบน

กระแสต่อความกว้าง 1 เมตร (current per metre width)

$$= \int_0^{\alpha} J_x\,dY(x1) = \int_0^{\alpha} J_{om}\exp(-\alpha Y)\cos(wt-\alpha Y)\,dY$$

$$= J_{om}\ \text{Real part of}\ \underline{\exp(jwt)} = \underline{J_{om}\ \exp(jwt)}$$

$$\frac{(1+j)\alpha}{\alpha\ \sqrt{2}\exp(j\pi/4)}$$

$$= \frac{J_{om}}{\sqrt{2}\alpha}\cos(wt-\pi/4) \qquad (1.10)$$

ดังนั้นกระแสต่อหน่วยความกว้างซึ่งล้าหลัง (lag) ไปจากความหนาแน่นของกระแสที่ผิวประมาณ 45 องศา แต่

$$J_{om} = \sqrt{2}H_{om}\alpha\exp j(wt+\pi/4)$$

จากสมการที่ (1.8) ได้ว่า

$$\text{กระแสต่อความกว้าง 1 เมตร} = \frac{(\sqrt{2}H_{om}\alpha\exp j(wt+\pi/4))\exp(-j\pi/4)}{\sqrt{2}\alpha}$$

$$= H_{om}\exp(jwt) \qquad (1.11)$$

ค่ากระแสต่อความกว้างโดยประมาณแล้วมีค่าเท่ากับ H ที่ผิว ผลลัพธ์นี้สามารถที่จะหาได้โดยการใส่ไลน์อินทริกรัล (line intregral) รอบๆกระแส เนื่องจากไม่มีการเกิด H ในแนว Y หรือที่อนันต์ $(H_{om}.1) = (I)$ ดังนั้น $I = \left|H_{om}\right|$ ได้ผลลัพธ์ตามข้างบนและปริมาณทั้ง 2 นี้จะอินเฟสกัน

1.1.5 กำลังและฟลักซ์สำหรับแผ่นแบนกว้าง

(Power and flux semi-infinite slab)

1.1.5.1 ค่าความสูญเสีย (Loss)

ค่าความสูญเสียต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร (ค่ากำลังที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน , L หาได้โดยการอินทริเกรต J^2 ตลอดทั้งปริมาตรและช่วงคาบของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \int_0^{\alpha} \rho J_{om}^2 dY \quad (1 \times 1) \qquad (1.12)$$

$$= \rho J_{om}^2 \int_0^{\alpha} \exp(-2\alpha Y) \cos^2(\omega t - \alpha Y) dY dt$$

การอินทริเกรทส่วนที่เป็น $\cos^2$ สามารถหาได้โดยการใช้ค่าเฉลี่ยซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1/2 ที่ค่า Y ต่างๆกัน ค่า αY เป็นค่าเฟสที่เปลี่ยนไปซึ่งไม่มีผลกับการอินทริเกรท ดังนั้นค่าความสูญเสียต่อปริมาตร 1 ตารางเมตรคือ

$$L = \rho J_{om}^2 \int_0^{\alpha} \exp(-2\alpha Y) dY \qquad (1.13)$$

$$= \frac{\rho J_{om}^2}{4\alpha} = \frac{\rho J_{om}^2 \delta}{4}$$

แต่เรารู้ว่า $\left|J_{om}\right| = \sqrt{2}\left|H_{om}\right| \alpha = \sqrt{2}\left|H_{om}\right| / \delta$ ดังนั้น

$$L = \frac{\rho H_{om}^2}{2\delta}$$

$$= \frac{\rho H_o^2}{\delta} \qquad (1.14)$$

โดยที่ H_o คือค่าอาร์เอ็มเอส (r.m.s) ของ H ที่ผิว

2.1.5.2 ฟลักซ์รวมและค่าตัวประกอบกำลัง (Total flux and power factor)

ค่าฟลักซ์รวมในแผ่นแบน (ϕ) ต่อความกว้าง 1 เมตรหาได้จากการอินทริเกรท $B_o(Y)dY$ ตลอดแผ่นแบน

$$\phi = \mu H_{om} \int_0^{\alpha} \exp[j\omega t - (1+j)\alpha Y](dY \times 1) \qquad \text{(Real part)}$$

$$= \frac{\mu H_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \cos(\omega t - \pi/4) \qquad (1.15)$$

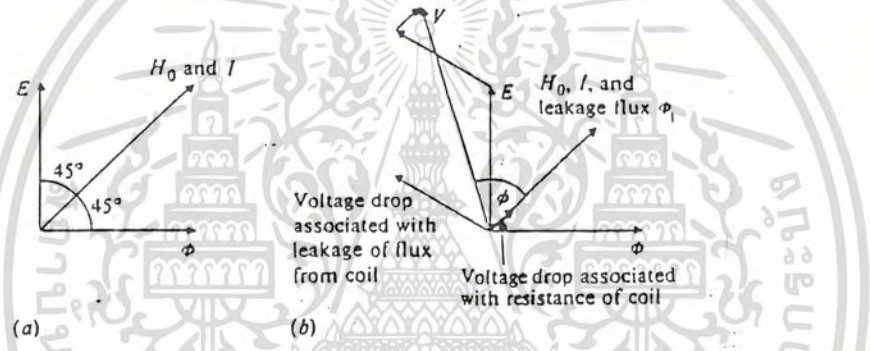
ค่าฟลักซ์รวมต่อความกว้าง 1 เมตร จะเป็นสัดส่วนกับค่า H_{om} และมีเฟสที่ล้าหลังอยู่ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสรวมจะอยู่ในเฟสเดียวกับ H_o เนื่องจากค่าฟลักซ์ที่ผิวอยู่ในเฟสเดียวกับ H_{om} ดังนั้น ค่าฟลักซ์รวมจะมีเฟสที่ล้าหลังค่าฟลักซ์ที่ผิวอยู่ 45 องศา

$$E = \frac{Nd\phi}{dt} = \frac{-\mu H_{om} NwSIN(wt-\pi/4)}{\sqrt{2}\alpha} = \frac{\mu H_{om} NwCOS(wt+\pi/4)}{\sqrt{2}\alpha} \quad (1.16)$$

ค่าตัวประกอบกำลังของแผ่นแบนได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่าง E และ I ซึ่งแสดงโดยเฟเซอร์ไดอาแกรม (Phasor diagram) ตามรูป 1.3a ค่ากระแสล้าหลังค่าอีเอ็มเอฟ (E.M.F) อยู่ 45 องศา ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.707 lagging ซึ่งจะได้ว่าค่าความต้านทานของโหลดมีค่าเท่าค่ารีแอ็คแตนซ์ (Leakage reactance) ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเสวลงและคอยล์ยังมีค่าความต้านทานซึ่งทำให้ค่าโวลเตจยกลดไปอีกดังแสดงดังรูป 1.3b



รูปที่ 1.3 (a) เฟสเซอร์ไดอาแกรมในอุดมคติสำหรับแผ่นแบนกว้าง

(b) เฟสเซอร์ไดอาแกรมที่รวมค่าความต้านทานของคอยล์และค่าลีกเกจรีแอคแตนซ์

2.2 รูปแบบของการหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

หฤษฎีของการให้ความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำสามารถประยุกต์ใช้กับการหลอมแบบเหนี่ยวนำได้อย่างสมบูรณ์ทำให้มีการพัฒนาเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำขึ้นแทนเตาหลอมแบบเชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม ข้อได้เปรียบของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำได้แก่

1. ปราศจากก๊าซและของเสียอันจะก่อให้เกิดปฏิกริยาที่ไม่ต้องการ
2. ใช้ระยะเวลาในการหลอมสั้นกว่า เมื่อเทียบกับเตาหลอมแบบอื่นที่ขนาดเดียวกัน
3. สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและต้นทุนที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ไม่มีการสูญเสียความร้อน ปราศจากควันและสะอาด

5. มีการสูญเสียของโลหะขณะการหลอมต่ำ

6. มีค่าบำรุงรักษาเตาหลอมต่ำ

7. สามารถนำวิทยาการใหม่เข้าประยุกต์รวมกันได้

ต่อไปจะขอแนะนำชนิดของเตาหลอมที่ใช้กันแพร่หลาย ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่

1.2.1 เตาหลอมแบบไร้แกนกลาง (Coreless Induction Furnace)

ลักษณะของเตาหลอมแบบนี้จะประกอบด้วยเบ้าหลอมที่ทนความร้อนสูงวางอยู่แกนกลาง ภายนอกล้อมรอบด้วยคอลย์กำลังซึ่งทำจากทองแดงกลวง สามารถใช้น้ำผ่านเพื่อระบายความร้อน (Cooling) ได้ ตัวคอล์ยจะมีสารแม่เหล็กคลุมเพื่อใช้นำแม่เหล็กให้ครบรอบตัวมันเอง เป็นการป้องกันการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวคอล์ยลดลง และป้องกันการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับชิ้นโลหะที่อยู่ใกล้

ประโยชน์หลักของเตาหลอมแบบไร้แกนกลางคือ การหล่อโลหะ มักจะใช้ในการหลอมโลหะซ้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการก่อนการเทใส่แท่นพิมพ์ ส่วนกำลังไฟที่จ่ายให้กับตัวคอล์ยของเตาหลอมแบบไร้แกนกลางนี้มีช่วงความถี่ต่างๆกันดังนี้

1. 50/60 Hz (ความถี่หลัก)

2. 150/180 Hz (Triple Frequency)

3. 500 ถึง 5,000 Hz (2,3 เป็นความถี่ระดับกลาง)

4. ความถี่ระดับสูง โดยใช้สำหรับเตาหลอมขนาดเล็ก

เตาหลอมแบบไร้แกนกลางมีจอบเขตในการทำงานกับสารอัลลอย (Alloy) หลายชนิดที่การหลอมเดียวกัน และมีความต่อเนื่องในการหลอม โดยจะเริ่มหลอมสารตัวต่อมาเมื่อสารก่อนหน้านั้นหลอมและระบายออกหมดไป แต่มีข้อจำกัดคือ เราไม่สามารถหลอมโลหะชิ้นเล็กๆที่ความถี่หลักได้ เพราะจะเกิดการสั่นสะเทือนซึ่งจะเป็นอันตรายต่อเบ้าหลอม ส่วนที่ระดับความถี่สูงเรามักจะพบเห็นได้กับเตาหลอมขนาดเล็กที่ใช้ในห้องทดลอง เช่นใช้ในการหลอม ทอง เงิน เป็นต้น เตาหลอมแบบไร้แกนกลาง จะมีช่วงการเริ่มทำงานเร็วจากสภาพที่เบ้าเปล่าหรืออุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และให้ผลงานได้มากกว่าเตาหลอมชนิดอื่นๆ

1.2.2 เตาหลอมแบบช่อง (Channel Induction Furnace)

ลักษณะของเตาหลอมแบบช่องทางที่จะครอบหัวท้ายของตัวอย่างจะบรรจุโลหะเพื่อสร้างเส้นทางการไหลของกระแสไฟให้ครบวงจรในลักษณะการลัดวงจรของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการหลอมโลหะคือ ความร้อนที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในลวดโลหะนั้นๆดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราส่วนของจำนวนรอบอันจะมีผลต่อความต้านทานซึ่งจะเป็นตัวจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไว้ ระดับความถี่ที่ใช้คือ 50/60 Hz มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.5 - 0.7 ซึ่งสูงกว่าแบบไร้แกนกลาง และมีประสิทธิภาพถึง 90-95%

1.3 ระบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นกระแสตรง (DC) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยอาศัยอุปกรณ์สวิชชิ่งเป็นสวิชปิดเปิด ในโครงงานนี้ใช้ระบบอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวดังนั้นจะขอกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่นิยมใช้กันทั่วไปเท่านั้น ระบบอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล

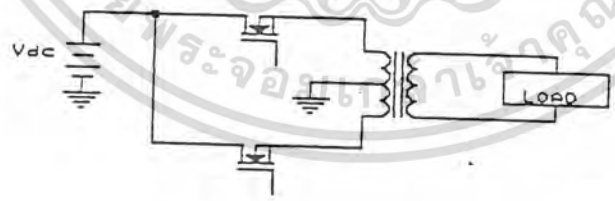
1.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

1.3.3 อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล

อินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิชชิ่งเพียง 2 ตัวเท่านั้นแต่ต้องมีหม้อแปลงเซนเตอร์แทป (Center tab) อินเวอร์เตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการกำลังสูงนัก เนื่องจากการใช้หม้อแปลงเซ็นเตอร์แทปจะทำให้มีสไปค์โวลท์เตจเกิดขึ้นมาก และข้อเสียอีกแบบหนึ่งของอินเวอร์เตอร์แบบนี้คือ ต้องพันด้านปฐมภูมิให้ขดลวดสองขดที่แบ่งโดยจุดกราวน์มีความสมมาตร (Symetrical) กันลักษณะของอินเวอร์เตอร์แบบนี้แสดงไว้ดังรูป 1.4



PUSH PULL INVERTER

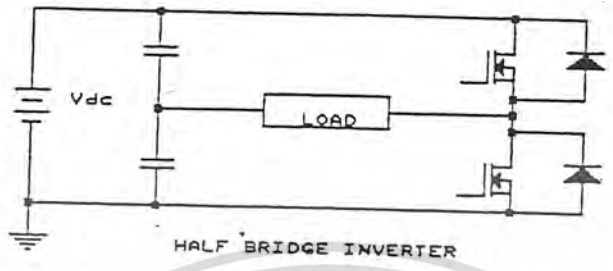
รูปที่ 1.4 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล

1.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

อินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิชชิ่ง 2 ตัว แต่ต้องมีคาปาซิเตอร์ (Capacitor) 2 ตัวเพื่อแบ่งโวลท์เตจออกมาตกคร่อมคาปาซิเตอร์ตัวละครึ่ง ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้คือค่ากำลังที่

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

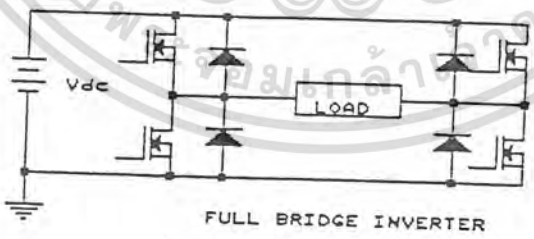
ออกมาจะน้อยกว่าแบบพุชพูลและฟูลบริดจ์ครึ่งหนึ่ง เนื่องจากค่าโวลท์เตจลดลงครึ่งหนึ่งลักษณะของอินเวอร์เตอร์แบบนี้เป็นดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

1.3.3 อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

เป็นระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้อินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิชชิ่ง 4 ตัว สำหรับอินเวอรเตอร์เฟสเดียวมีข้อได้เปรียบคือสามารถให้กำลังงานออกมาได้สูง จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการค่ากำลังงานสูงๆลักษณะของอินเวอร์เตอร์แบบนี้แสดงไว้ในรูป 1.6



รูปที่ 1.6 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ระบบอินเวอร์เตอร์ของการให้ความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

(Induction Heating Inverter)

จากแบบของอินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เราสามารถเลือนใช้ตามความเหมาะสมของงานได้ ในโครงงานนี้ได้เลือกแบบฟูลบริดจ์เป็นตัวทำหน้าที่จ่ายกำลังงาน (Generator) ไปสู่คอล์ยที่ให้ความร้อน

ระบบการจ่ายกำลังงานไปสู่หัวคอล์ยโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้กันมากมีอยู่ 2 ระบบคือ

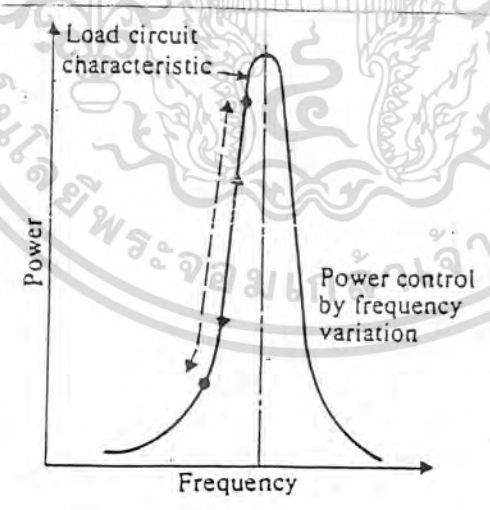
1. สเว็บฟรีเควนซี่ (Swept-frequency generator)

2. โหลดเรโซแนนท์ (Load-resonant generator)

ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.4.1 ระบบสเว็บฟรีเควนซี่ (Swept-frequency)

เป็นระบบที่ได้รับการพัฒนามาก่อน ระบบนี้ถูกออกแบบมาสำหรับงานทางด้านการหลอมที่ต้องการระดับกำลังสูงสุด ประมาณ 100 กิโลวัตต์ (Kilowatt) โดยค่ากำลังงานที่จ่ายออกไปสู่โหลดจะแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ ข้อได้เปรียบของระบบนี้คือ ค่ากำลังที่ออกไปสู่โหลดจะถูกจำกัดด้วยลักษณะของโหลดในขณะนั้นเหมาะกับโหลดที่มีค่า Q(x1/R) สูง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังต่อค่าความถี่ของระบบนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 1.7

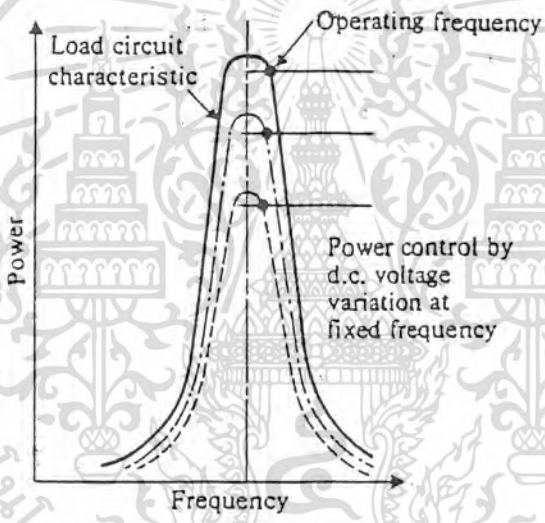


รูปที่ 1.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของระบบสเว็บฟรีเควนซี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 ระบบโหลดเรโซแนนท์ (Load-resonant)

ระบบนี้ได้รับการพัฒนาต่อมาจากระบบสเว็บฟรีเควนซี่ เพื่อให้มีกำลังออกไปสู่โหลดสูงขึ้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่า Q ของโหลด มีความเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังสูงๆลักษณะการทำงานของระบบนี้ค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไปตามโหลด โดยความถี่จะวิ่งเข้าสู่ความถี่เรโซแนนท์ และการปรับค่ากำลังที่ออกสู่โหลดทำได้โดยการปรับค่าของไฟกระแสตรงที่จ่ายเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบสเว็บฟรีเควนซี่ ที่หายไปจะถูกกำจัดทิ้งไปในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของระบบโหลดเรโซแนนท์ ซึ่งระบบโหลดเรโซแนนท์นี้เป็นระบบที่ใช้ในโครงงานนี้โดยความถี่เรโซแนนท์จะถูกติดตามโดยไมโครโปรเซสเซอร์ ระบบดังกล่าวแสดงไว้ดังในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของระบบโหลดเรโซแนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

โครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนและระบบควบคุม

2.1 มอสเฟตกำลัง

เฟตธรรมดาลักษณะทางโครงสร้าง การไหลของกระแสทางแนวนอน ซึ่งจะมีช่องทางไหลของกระแสอยู่ในช่องแคบๆเท่านั้น ไม่สามารถทำงานที่วัตต์สูงๆได้ จากการที่จะทำให้เฟตนำกระแสได้ในแนวดิ่งเหมือนทรานซิสเตอร์ทำให้สามารถใช้งานเฟตได้ที่กำลังสูงๆ เรียกโครงสร้างเฟตแบบนี้ว่า VMOS (Vertical MOS)

ในขณะใช้งานเราจะใช้แรงดันที่ขาเกทและเดรนมีศักดาเป็นบวกเมื่อเทียบกับแรงดันที่ซอร์ส ส่วนของเกทจะสร้างสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดช่วงดีพลีชั่นในเนื้อสารส่วน P ซึ่งเป็นส่วนลบหรือช่องทางไหลของกระแสกระหว่างเดรนกับซอร์ส การไหลของกระแสจะเกิดขึ้นในแนวดิ่งและเป็นระยะทางของการเคลื่อนที่ของประจุที่สั้นเมื่อเทียบกับการไหลในแนวราบ ดังนั้นความต้านทานระหว่างเดรนกับซอร์สจึงมีค่าต่ำเนื่องจากการไหลของกระแสเดรนเกิดจากพาหะที่เป็นอิเลคตรอนอิสระอย่างเดียว ดังนั้นถ้าให้แรงดันที่เกทมีค่าสูงขึ้น ช่องทางเดินของกระแสอิเลคตรอนก็จะกว้างขึ้น การไหลของกระแสก็จะมากขึ้นตามด้วย

จ้อได้เปรียบจากการใช้มอสเฟตมีดังนี้

1.ด้านความเร็ว

มอสเฟตกำลังมีความสามารถในการสวิทชิ่ง ด้วยความรวดเร็วโดยปราศจากการสะสมประจุอย่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จึงไม่คิดช่วงเวลาสะสม จึงทำให้ขนาดและน้ำหนักเบาจึงทำให้มอสเฟตมีความเร็วมากกว่าทรานซิสเตอร์ในการสวิทชิ่งมาก

ความเร็วของมอสเฟตนั้น ขึ้นอยู่กับการอัดและคายประจุของการเก็บประจุของมอสเฟตเอง โดยจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.ลักษณะของอินพุท

ขาเกทของมอสเฟตกำลัง นั้นจะถูกแยก (ISOLATE) จากแหล่งจ่ายด้วยชั้นออกไซด์ที่ทำให้เกิดความต้านทานกระแสตรงประมาณ 40 เมกกะโอห์ม มอสเฟตจะถูกไบอัสด้วยแรงดัน 10 โวลท์ ด้วยแรงดันขนาดนี้จึงสามารถขับมอสเฟตนี้ได้ด้วย ไอซี ซีมอส หรือ ทีทีแอล ได้โดยตรงจึงไม่ต้องคำนึงถึงกระแสของโหลด ทำให้ลดความยุ่งยากของวงจรขับ โดยรวมแล้วจะทำให้ประหยัดยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ย่านทำงานปลอดภัย

การใช้งานเกินพิกัดของมอสเฟตนั้น อาจจะทำให้มอสเฟตพังได้ แต่สำหรับมอสเฟตแล้วบางทีอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้วงจรสนับเบอร์ก็ได้ หรือใช้ค่าตัวเก็บประจุน้อยๆได้ ขอบเขตของย่านปลอดภัย ถูกกำหนดด้วยพิกัดกระแสสูงสุด แรงดันเบรคดาวน์ และความจุของอุปกรณ์ ขอบเขตของย่านปลอดภัยจะกว้าง เนื่องจากไม่เกิดเบรคดาวน์เซคันดารี

4. แรงดัน

แรงดันต่ำสุดของมอสเฟตกำลังหาได้จากค่าความต้านทานของอุปกรณ์ r_{DS} สำหรับอุปกรณ์แรงดันต่ำ ค่าของ r_{DS} จะต้องมีค่าต่ำที่สุด สำหรับอุปกรณ์แรงดันสูงค่า r_{DS} ต้องมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก ส.ป.ส. อุณหภูมิ r_{DS} เป็นบวก

5. สัมประสิทธิทางอุณหภูมิ

สัมประสิทธิทางอุณหภูมิของมอสเฟตมีค่าตรงข้ามกับทรานซิสเตอร์ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในตัวมอสเฟตสูงขึ้น กระแสเดรนจะมีค่าลดลง ดังนั้นการทำงานของมอสเฟตจึงไม่มีเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มหนีของอุณหภูมิ (Thermal runaway)

6. เพิ่มกำลังได้

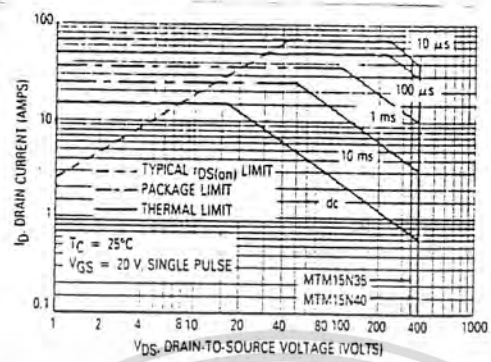
สามารถเพิ่มกำลังของสวิทชิ่งได้โดยการนำมอสเฟตมาต่อขนานกันได้หลายๆตัว

อย่างไรก็ดี มอสเฟตกำลังก็มีข้อเสียเช่นกันคือ ค่า $r_{DS(ON)}$ ในมอสเฟตกำลังสูงกว่าในทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ ดังนั้น การใช้งานที่ความถี่ต่ำชิ่งค่าความสูญเสียขณะนำกระแสในอุปกรณ์สวิทชิ่งกำลัง เป็นสิ่งสำคัญ จึงไม่ควรใช้มอสเฟตกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ข้อพิจารณาในการใช้เพาเวอร์มอสเฟต

ย่านการทำงานที่ปลอดภัยสามารถบอกได้ 2 วิธี คือ ช่วงไบอัสก้าวหน้า SOA อาจหมายถึง SOA โดยทั่วไป หรือ switching SOA หรือเรียกอีกอย่างว่า RBSOA



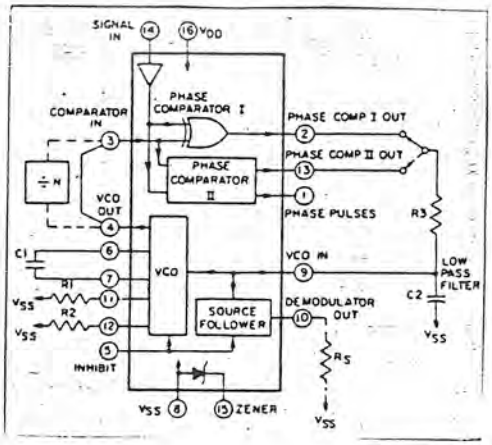
รูปที่ 2.1 ย่านการทำงานปลอดภัยของมอสเฟต

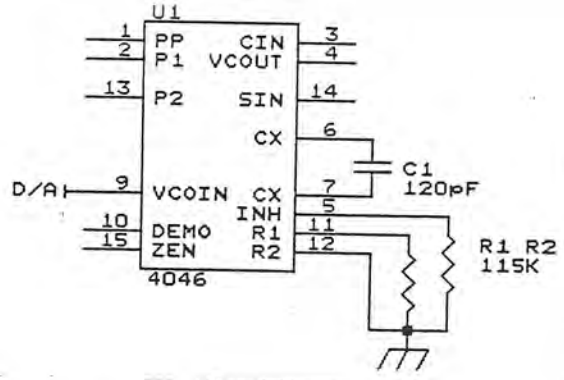
กราฟ FBSOA ระบุถึงแรงดันสูงสุดและกระแสสูงสุดของเดรนที่จะมีได้เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน ย่านความปลอดภัยถูกจำกัดค่าตัวแปร 4 ค่าคือ แรงดันพิกัดเดรน-ซอร์ส แสดงขอบเขตด้วยขอบ A ถ้าแรงดันเกินกว่าขอบเขต จะทำให้อุปกรณ์พังได้สิ่งที่ต้องระวัง คือแรงดันทรานเซี้ยนของแรงดันเดรน-ซอร์ส ค่ากระแสเดรนสูงสุดระบุเป็นคาบเวลา แสดงด้วยเส้น D อุปกรณ์ไม่ควรจะนำกระแสที่มีช่วงเวลามากกว่าที่พิกัดกำหนด

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

1. วงจรวีทูเอฟ

หลังจากที่ดีทูเอแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกแล้ว จะได้ระดับแรงดันต่างๆกันไปขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ออกมาจาก ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 ดังนั้น วงจรวีทูเอฟจะเป็นส่วนสำคัญที่จะแปลงระดับแรงดันเหล่านี้ให้เป็นความถี่ที่ต้องการ โครงงานนี้ได้เลือกใช้ ไอซี 4046 ซึ่งเป็นเฟสล็อคลูป แต่เรานำเฉพาะส่วน VCO มาใช้ดังรูปที่ 2.2 โดยต่อเป็นวงจรดังรูปที่ 2.3





รูปที่ 2.2 และ 2..3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_1 จะเป็นตัวสำคัญในการกำหนดความถี่ของวงจรที่ระดับแรงดันหนึ่งๆ เนื่องจากมักจะเป็นตัวออสซิลเลทความถี่ พิจารณา R_1 และ C_1 ร่วมกันจะมีผลต่อการกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งานและ R_2 เป็นตัวกำหนดความถี่ออฟเซตที่ต้องการ ซึ่งการกำหนดค่า C_1, R_1 และ R_2 มีความสำคัญมากเนื่องจากว่าจะเป็นการกำหนดช่วงความถี่ใช้งานที่เหมาะสม

จากรูป 5(a) f_o คือความถี่ที่แรงดัน $V_{DD}/2$

αf_1 คือช่วงของความถี่ ซึ่งหาได้จาก $f_{max} - f_{min}$

ถ้าหากเรารู้ค่า f_o และ αf_1 แล้ว เราจะสามารถนำมากำหนดค่าของ C_1, R_1 และ R_2 ได้ดังนี้

หา f_{min} จาก $f_o - f_1$

นำค่า f_{min} ไปเปิดกราฟรูป 5(b) เพื่อหาค่า R_1 และ C_1

คำนวณค่า f_{max}/f_{min} จากสมการ

นำค่า f_{max}/f_{min} ไปเปิดตาราง 5(c) เพื่อหาอัตราส่วน R_1/R_2 จากนั้นก็จะได้ค่า R_1 ออกมา

เมื่อเราได้ค่า C_1 R_1 และ R_2 ออกมาแล้วเราก็จะได้ช่วงของความถี่ที่เราต้องการ

ซึ่งกราฟ 5(a-c) อยู่ในหน้าถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

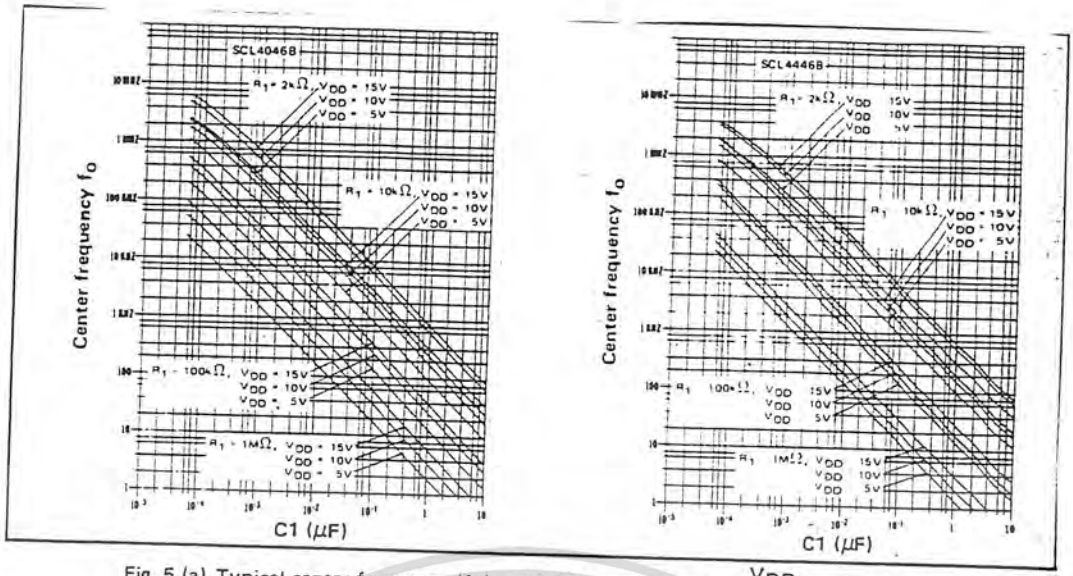


Fig. 5 (a) Typical center frequency (f_o) vs C1 ($R2 = \infty$, $VCO_{IN} = \frac{V_{DD}}{2}$, $T_A = 25°C$)

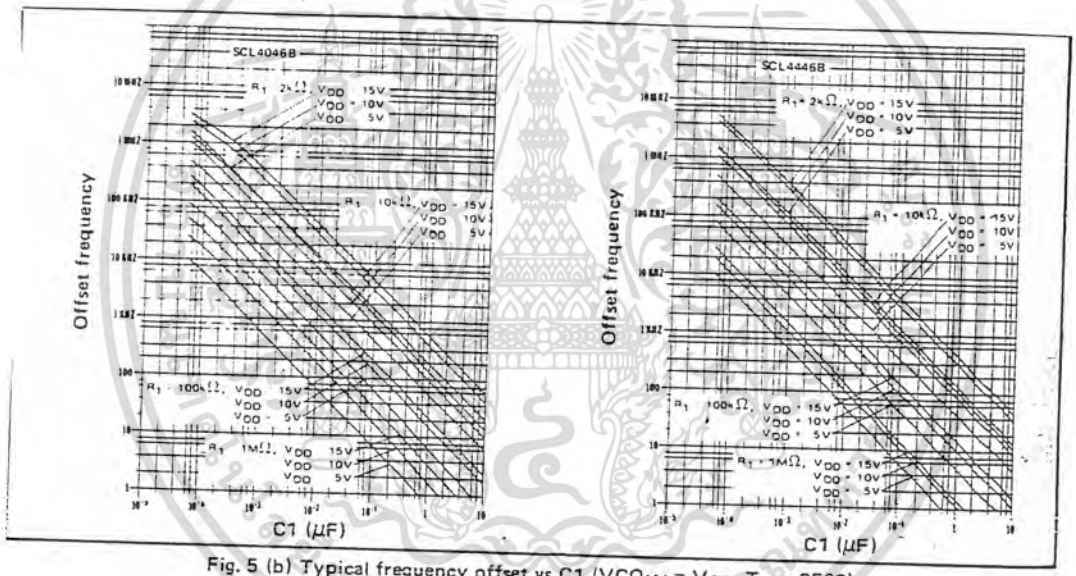


Fig. 5 (b) Typical frequency offset vs C1 ($VCO_{IN} = V_{SS}$, $T_A = 25°C$)

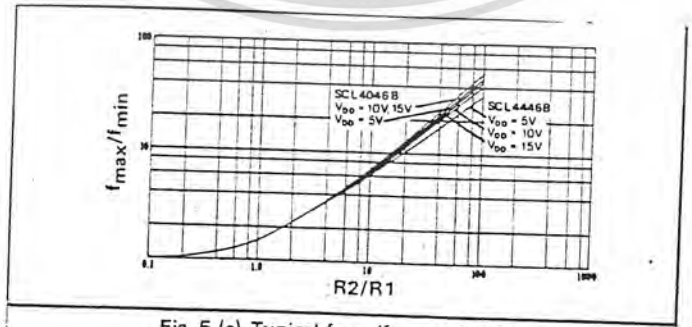


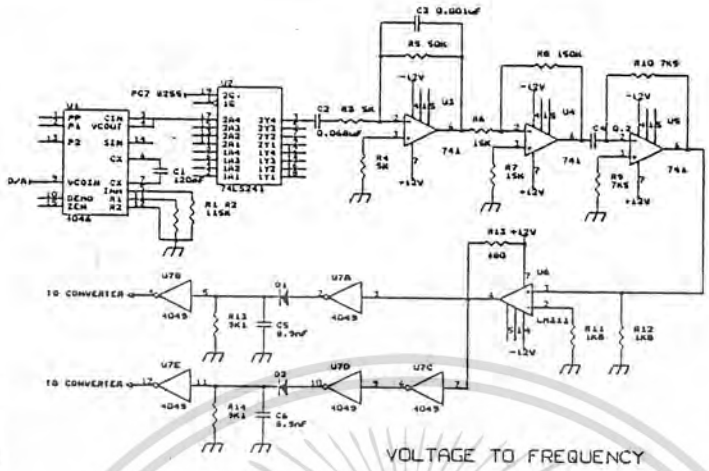
Fig. 5 (c) Typical f_{max}/f_{min} vs R2/R1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 กราฟหาค่า R_1, R_2, C_1

วงจรวีทูเอฟที่ใช้ในโครงงาน

วงจรดังรูปที่ 2.5 จะเป็นวงจรที่ใช้งานจริงซึ่งมีส่วนต่างๆดังนี้



รูปที่ 2.5

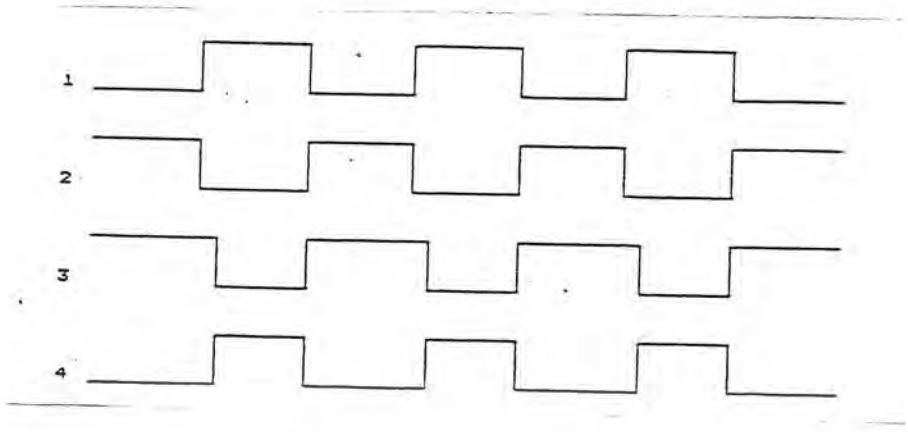
ส่วนสร้าง Square wave ซึ่งสร้างจาก 4046 เมื่อได้สัญญาณแล้วจะผ่านไอซี 74LS241 ซึ่ง Z-80 จะนำไปใช้ในการควบคุมให้จ่ายพัลส์ออกไปหรือหยุดจ่ายพัลส์ออกไป หลังจากนั้นก็จะนำสัญญาณมาอินทริเกรตในไอซี 741 ทั้ง 2 ตัวแรกจะได้สัญญาณสามเหลี่ยมออกมาจากนั้นก็ขยายโดย 741 ตัวต่อมาแล้วผ่านเข้าวงจรเปรียบต่อมาคือ LM311 หลังจากนั้นเอาท์พุทที่ได้จะนำไปเข้าวงจรจัดเนื้อพัลส์ต่อไป

2.วงจรจัดเนื้อพัลส์

วงจรนี้จะทำหน้าที่ตัดขนาดความกว้างของพัลส์ให้เล็กลงเล็กน้อย เพื่อป้องกันการลัดวงจรในระหว่างมอสเฟตในแนวดิ่งเดียวกัน เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วมอสเฟตจะมีเวลาหน่วงเนื่องจากการสวิทชิ่งอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาในด้านการใช้งานให้ปลอดภัยแล้วก็จะจำเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาขนาดพัลส์ที่จะตัดออกนั้น จะขึ้นอยู่กับว่าเอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์จะยังคงเป็นรูปสัญญาณแบบ 2 ระดับอีกด้วย

การทำงานของวงจรนี้ใช้หลักการของการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุ แล้วนำช่วงเวลามากระทำทางลอจิก จะได้เอาท์พุทเป็นพัลส์ที่เหมือนกับพัลส์ที่เข้าทุกประการ แต่จะแตกต่างที่เนื้อพัลส์บริเวณขอบขาขึ้นของพัลส์ขาเข้าจะถูกตัดออกไปเล็กน้อยดังรูปในหน้าถัดไป

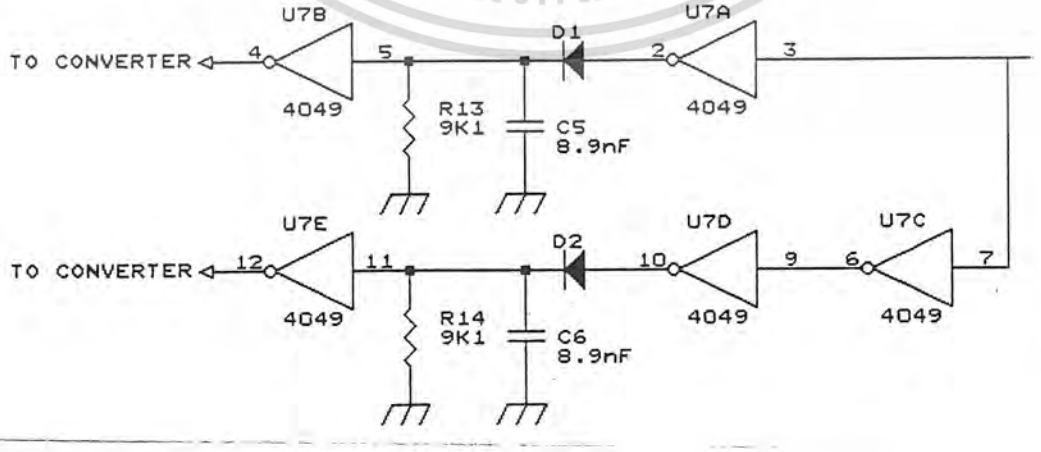
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2..6 รูปสัญญาณก่อนเข้าและออกจากวงจรขจัดเนื้อพัลส์

จากรูปพัลส์ที่แสดงจะอธิบายหลักการของการขจัดเนื้อพัลส์ได้ คือตัวเก็บประจุจะช่วยทำให้ศักย์ที่ขาอินพุทของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ยังคงสถานะเป็น HIGH อยู่ได้อีกช่วงเวลาหนึ่งซึ่งช่วงเวลานี้ก็คือช่วงเวลาที่เนื้อพัลส์จะถูกกำจัดออกไปนั่นเอง สำหรับไดโอดทำหน้าที่บล็อคเพื่อให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แก่ตัวต้านทานเท่านั้น ดังนั้นจากหลักการนี้การกำหนดขนาดเนื้อพัลส์ที่จะถูกกำจัดออกจึงขึ้นอยู่กับ ขนาดของตัวเก็บประจุนั่นเอง โดยพิจารณาตัวต้านทาน และไอซีที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย หลังจากสัญญาณผ่านวงจรขจัดเนื้อพัลส์แล้วก็จะถูกขับกระแสโดยทรานซิสเตอร์ 4 ตัวคือเบอร์ 2N3053 และ 2N4037 และส่งไปยังส่วนหม้อแปลง ISOLATE เพื่อแยกส่วน LOW VOLT และ HIGH VOLT ออกจากกัน

รูปวงจรขจัดเนื้อพัลส์ทั้งหมดจะแสดงดังรูปข้างล่าง

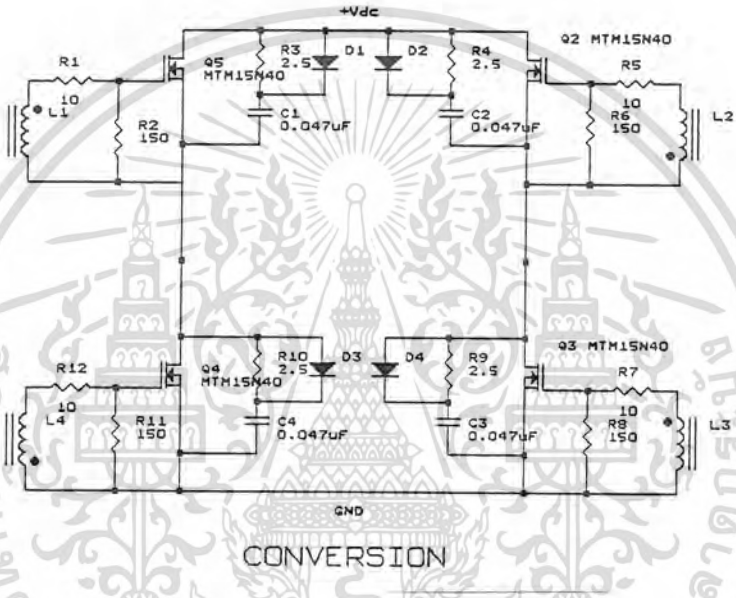


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 วงจรขจัดเนื้อพัลส์ (Dead time)

3.ส่วนวงจรคอนเวอร์ชั่น

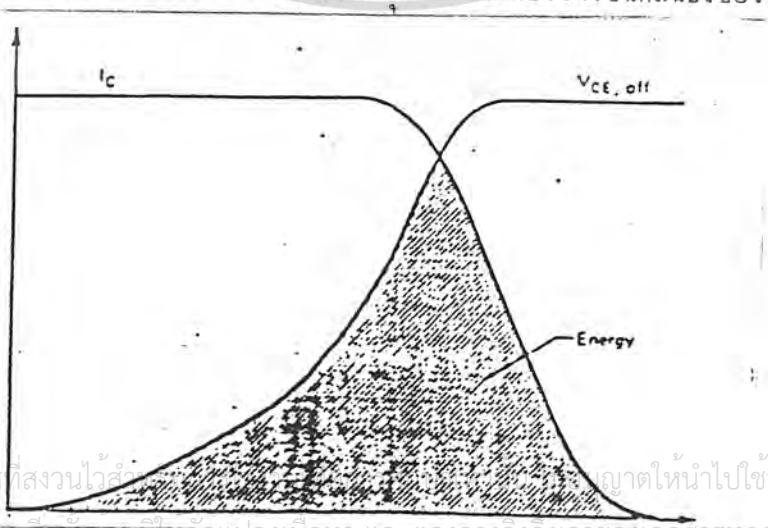
เป็นส่วนทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟกระแสตรงเป็นสัญญาณไฟกระแสสลับโดยอาศัยอุปกรณ์สวิทช์ชิ่งปิดเปิด ส่วนคอนเวอร์ชั่นในโครงงานนี้ใช้ INVERTER แบบ FULL BRIDGE ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิทช์ชิ่งทั้งหมด 4 ชุด ชุดละ 3 ตัวขนานกัน(POWER MOSFET เบอร์ MIM15N40) ข้อได้เปรียบของ INVERTER แบบนี้คือสามารถให้กำลังงานได้สูง จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังงานสูงๆ



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนคอนเวอร์ชั่น

วงจรชั้นต์สนับเบอร์ (RC Shunt Snubber)

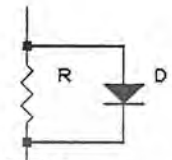
วงจรชั้นต์สนับเบอร์มีไว้เพื่อลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวมอสเฟตกำลัง รูปที่ 2.9 และค่าสไปค์ (Spike)โวลท์เตจขณะเริ่มหยุดทำงานโดยวงจรชั้นต์สนับเบอร์จะลดค่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 แสดงค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นบนตัวทรานซิสเตอร์ขณะสวิทช์ชิ่ง

การเพิ่มของโวลท์เตจที่เพิ่มขึ้นเมื่อตัวทรานซิสเตอร์กำลังหยุดทำงาน โดยการชาร์จกระแสเข้าที่คาปาซิเตอร์และคายออกผ่านค่าความต้านทานในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน รูปแบบของวงจรชั้นต์สนับเบอร์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.10



SNUBBER

รูปที่ 2.10 แสดงการต่อชั้นต์สนับเบอร์

การคำนวณวงจรชั้นต์สนับเบอร์ทำโดยการสมมติให้ค่ากระแสที่ลดลงในช่วงที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงานเป็นเชิงเส้น ดังนั้นค่ากระแสจะแสดงได้ดังสมการ (1)

$$i = I(1-t/t_s) \qquad (1)$$

$$e = \frac{1}{C}\int_0^t (I-i)dt$$

$$= \frac{I}{C}\int_0^t \frac{t}{t_s}\,dt$$

$$= \frac{It^2}{2Ct_s} \qquad (2)$$

ให้ $e = E$ เมื่อ $t = t_s$ เราจะได้ค่าคาปาซิเตอร์ของสนับเบอร์เท่ากับ

$$C_s = \frac{It_s}{2E} \qquad (3)$$

โดยที่ค่า t_s จะเป็นค่าเวลาที่ค่ากระแสที่ตัวทรานซิสเตอร์กำลังได้ลดลงตั้งแต่เริ่มหยุดทำงานและมักจะกำหนดให้เป็นค่าฟอลไทม์ (Fall time) ของกระแสการสวิทช์ชิ่ง

ค่าความต้านทานของวงจรชั้นสนับเบอร์เป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่จะไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์ในช่วงที่สนับเบอร์คายกระแสค่าต่ำสุดที่จะเป็นไปได้ของค่าความต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_g > E/(I_M - I_L) \qquad (4)$$

โดยที่ค่า I_M เป็นค่าเรทกระแสของตัวทรานซิสเตอร์กำลังและค่า I_L เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดในช่วงที่ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงานและค่าสูงสุดที่ค่า R_g จะเป็นไปได้สามารถหาได้จากช่วงการทำงานต่ำสุดของทรานซิสเตอร์ $(T_{on(min)})$ โดยที่ช่วงการทำงานต่ำสุดของทรานซิสเตอร์จะต้องมีค่าอย่างน้อยที่สุดเป็น 3 เท่าของค่าไทม์คอนสแตนท์ (time constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $R_g C_g$ เราจะได้

$$T_{on(min)} >= 3R_g C_g \qquad (5)$$

จากสมการ 5 เราจะได้สมการของ R_g คือ

$$R_g < T_{on(min)}/3C_g \qquad (6)$$

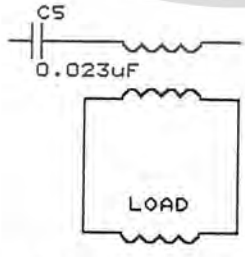
และจากสมการ 5 และ 6 เราจะได้สมการของ R_g คือ

$$E/(I_M - I_L) <= R_g <= T_{on(min)}/3C_g \qquad (7)$$

ดังนั้นเราสามารถที่จะใช้สมการ 3 และ 4 คำนวนหาค่า R_g และ C_g ในการออกแบบวงจรชั้นต์สนับเบอร์ได้

4.ส่วนวงจรโหลด

เป็นส่วนเอาท์พุทของวงจรจะต้องเลือกแกนเฟอร์ไรท์เนื่องจากเมื่อความถี่สูงและขดลวดทุติยภูมิมีกระแสไหลสูงมาก ยังมีปัญหาในด้านความสูญเสียในแกนในรูปความร้อน อาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ วิธีแก้ไขอาจทำได้โดยการลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กลงในวงจรส่วนนี้ อาจจะต้องมีการระบายความร้อน อาจจะใช้น้ำ,น้ำมัน หรืออากาศแล้วแต่ความเหมาะสมของวงจรนั้นๆ ส่วนในโครงงานนี้ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อน



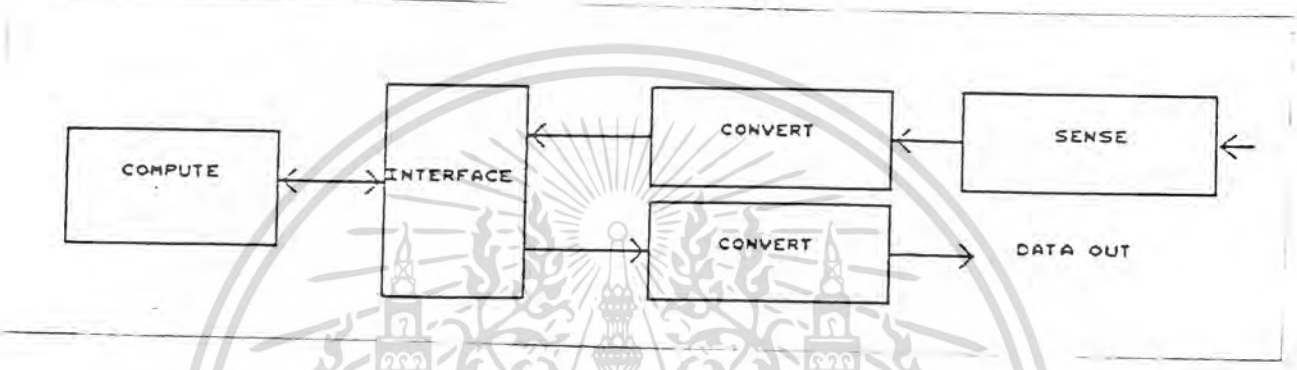
LOAD CIRCUIT

รูปที่ 2.11 แสดงส่วนวงจรโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ส่วนของระบบควบคุม

ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ซึ่งประกอบด้วย ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 และวงจรภายนอก โดยจะอธิบายในแง่ของลำดับขั้นตอนการทำงานและอธิบายการทำงานของวงจร การควบคุมอินเวอร์เตอร์ในโครงงานนี้ จะแสดงการทำงานคร่าวๆได้ในรูปบล็อกไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 2.12 แสดง Block diagram

จากรูปจะสรุปการทำงานได้คร่าวๆดังนี้ คือ Z-80 จะต้องติดต่อกับวงจรส่งสัญญาณเข้าและออก เพื่อรับและส่งข้อมูลในการที่จะควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้

รายละเอียดของวงจรต่างๆและลำดับขั้นตอนโดยละเอียด จะได้แสดงในหัวข้อต่อๆไป

1.ลำดับขั้นตอนการทำงาน

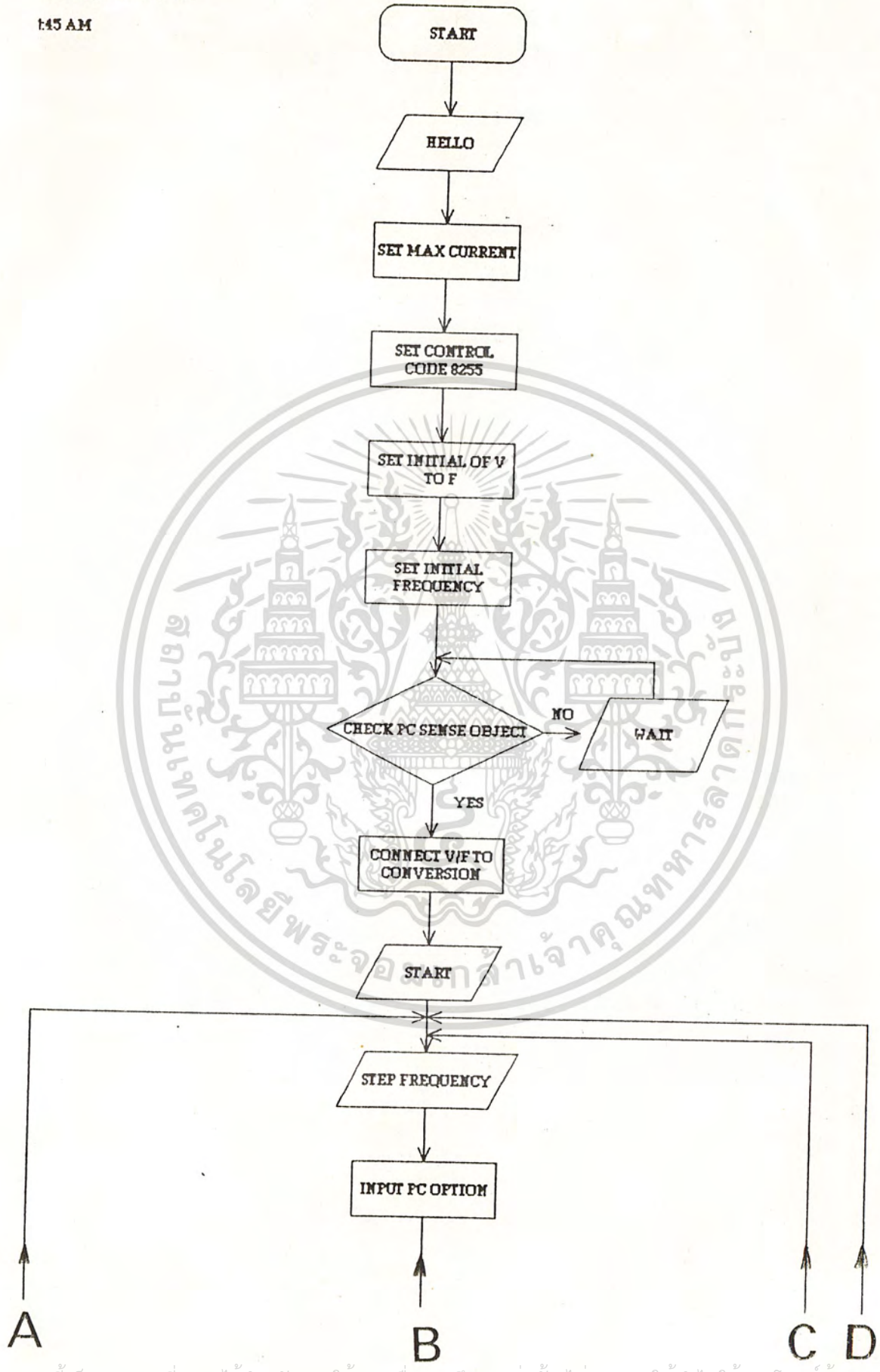
จุดประสงค์ในการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟต อินเวอร์เตอร์นี้เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานที่ความถี่เดียวกับความถี่ของวงจรเหนี่ยวนำได้ ลำดับขั้นตอนการทำงานของ Z-80 แสดงได้ดังรูป Flowchart ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

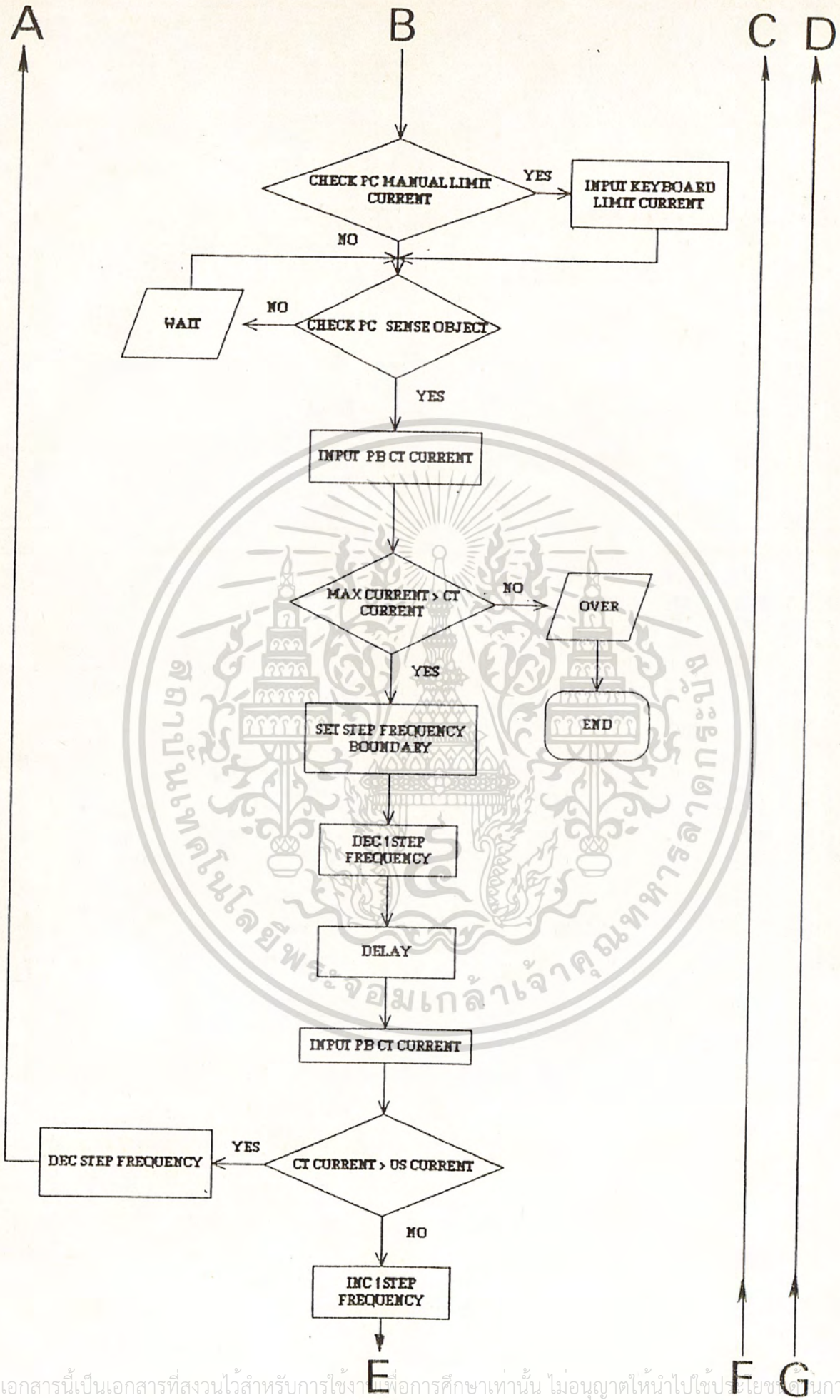
TopChart

Monday, March 14, 1994

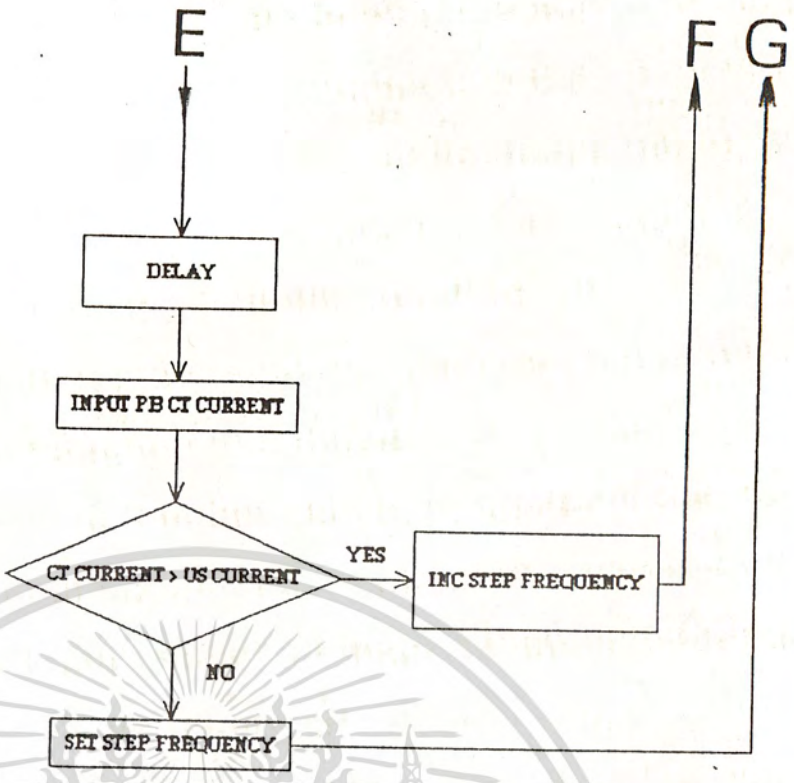
1:45 AM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก flowchart ดังกล่าว สามารถอธิบายในรายละเอียดได้ดังนี้

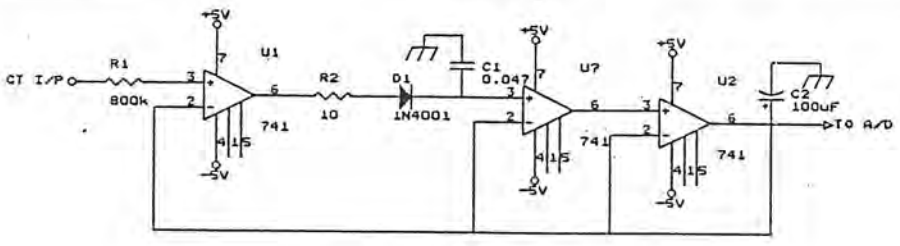
ในส่วนแรกๆจะเป็นการกำหนดสภาวะเริ่มต้นใช้งานต่างๆ โดยมีการตรวจเช็คชิ้นงานก่อนเริ่มต้นการทำงานในส่วน Drive ของวงจร Conversion

ในส่วน loop การทำงานจะเริ่มจากการ Check ว่าผู้ใช้ต้องการกำหนดกระแสสูงสุดของเครื่องเองหรือไม่ ถ้ามีก็จะหยุดการทำงานไปรอรับค่า นำค่าที่ได้มาเก็บไว้ที่ Address ใช้งานต่อไป นอกจากนี้ยัง check ต่อด้วยว่าชิ้นงานยังอยู่ใน Induced Coil หรือไม่ ถ้าไม่หยุดการทำงานชั่วคราว รอจนกว่าผู้ใช้งานจะต้องการทำงานต่อไป หลังจากนั้นก็จะทำการเปรียบเทียบค่ากระแสใช้งานกับกระแสสูงสุดเครื่อง ถ้ามากกว่าก็จะหยุดการทำงานของส่วน Conversion ทันที ในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนหากระแสสูงสุด โดยเริ่มจากการลดค่า Frequency ลง 1 step นำค่ากระแสจาก current transformer มาเปรียบเทียบกระแสใช้งานของเครื่อง ถ้าสูงกว่าก็แสดง Frequency ที่ลดลง 1 step ให้กระแสที่มากกว่าก็จะทำการลดค่า step frequency ใน Address ที่เก็บตาม แล้วกลับไปวน Loop เริ่มต้น แต่ถ้ากระแสที่ได้ไม่มากกว่าก็จะไปเพิ่มค่า step frequency 1 step นำกระแสมาเปรียบเทียบในทำนองเดียวกันกับส่วนลด frequency แต่ถ้ากระแสที่ได้ยังไม่มากกว่าอีก ก็ให้คงค่า step frequency เดิมไว้ วนกลับ loop ซ้ำ

2, วงจรตรวจจับขนาดยอดสัญญาณ

วงจรนี้ใช้ในการตรวจจับขนาดยอดของสัญญาณกระแสที่ออกมาจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส เพื่อส่งให้กับวงจรเอทูดีให้ส่งข้อมูลเข้า Z-80 นำไปประมวลผลต่อไป การทำงานของวงจรนี้จะต้องสามารถส่งค่าแรงดันไฟตรงที่มีขนาดเท่ากับยอดของสัญญาณกระแส ซึ่งเป็นไฟสลับได้ตลอดเวลาที่สัญญาณกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลง

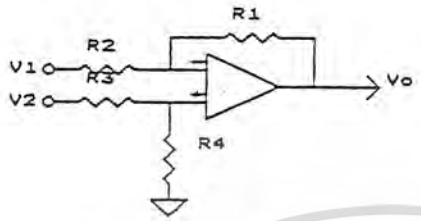
หลักการทำงานของวงจรนี้จะใช้หลักการอัดและคายประจุ ของตัวเก็บประจุซึ่งจะพิจารณาได้จากรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 วงจร Sense peak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปตัวไอซีเบอร์ 741 ตัวที่ 1 จะตรวจเช็คสัญญาณที่เข้า ไอซีตัวนี้ถูกต่อแบบ differential amplifier ซึ่งหลักการและวิธีการต่อวงจรแบบนี้โดยใช้ออปแอมป์ทั่วๆไปจะแสดงดังรูป 2.14



DIFFERENTIAL AMPLIFIER

Vo = V1 − V2 : R1=R2=R3=R4

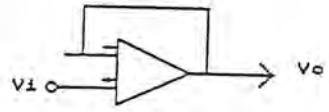
Vo = −(R1/R2)V1+[(1+(R1/R2))(R3/(R3+R4))]V2

รูปที่ 2.14 differential amplifier

เมื่อเปรียบเทียบรูป 2.13 กับรูป 2.14 แล้วพบว่าในกรณีของไอซี741 ตัวที่ 1 นี้จะไม่ต่อค่า R_1, R_2, R_3, R_4 แต่เนื่องจากวงจรภายในของออปแอมป์เอง จะมีค่าความต้านทานภายในตัวเองอยู่แล้ว นอกจากนี้ยังประมาณให้ค่าความต้านทานของสายที่ส่งสัญญาณเข้าไอซีมีค่าน้อยมาก จนทำให้สมการที่ 2 ของรูป 2.14 เป็นจริง นั่นคือจะได้ $V_2 - V_1 = V_o$ ซึ่งเป็นการนำสัญญาณเอาท์พุทมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทนั่นเอง ทำให้เมื่อสัญญาณอินพุทมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆก็จะทำให้สัญญาณที่เอาท์พุทมีค่าเป็นบวก และเป็นค่าผลต่างที่มากขึ้นด้วย จากหลักการดังกล่าวนี้ จะทำให้สามารถพิจารณาการทำงานของวงจรได้ดังนี้

เนื่องจากวงจรนี้ได้รับสัญญาณจากหม้อแปลงกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณรูปชายน์ สัญญาณนี้จะถูกตรวจจับและสุ่มค่า (Sample and hold) ไอซี 741 ตัวที่ 1 เมื่ออยู่ในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงของศักดาเป็นบวก ของรูปสัญญาณซีกบวก ค่าที่สุ่มออกมาได้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งค่าเหล่านี้จะแสดงออกที่เอาท์พุทขา 6 ของไอซีตัวนี้ จะไปทำให้เกิดการอัดประจุของตัวเก็บประจุโดยผ่านไดโอดได้ ตัวเก็บประจุจะคงค่าศักดาที่เกิดขึ้นไว้ ช่วงต่อมาที่เหลือทั้งหมดของคาบของรูปสัญญาณ ตัวเก็บประจุจะไม่สามารถคายประจุได้เนื่องจากคาบเวลาของรูปสัญญาณที่เข้านี้ มีค่าน้อยมากนั่นเอง จากหลักการดังกล่าวนี้ก็จะทำให้วงจรสามารถตามยอดสัญญาณที่เข้าได้ ส่วนไอซีตัวที่ 2 จะต่อแบบ Voltage follower ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ขยายวงจร สามารถส่งสัญญาณเข้า Z-80 ได้ หลักการและวิธีการต่อวงจร Voltage follower โดยใช้ออปแอมป์ทั่วๆไปได้แสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



VOLTAGE FOLLOWER
Vo = Vi

รูปที่ 2.15 Voltage follower

จากที่กล่าวมาทั้งหมดก็จะทราบได้ว่า วงจรจะส่งค่ายอดสัญญาณออกมาได้อย่างไรแต่ในกรณีที่ค่ายอดสัญญาณลดลงเข้ามา ในช่วงเวลาเอาท์พุทของไอซี เบอร์ 741 จะมีค่าเป็นลบ ในขณะที่คักดาคร่อมตัวเก็บประจุยังคงเป็นบวกอยู่ ดังนั้นในกรณีนี้จะทำให้ไดโอดถูกป้อนแรงดันกลับทาง (Reverse bias) ทำให้ไดโอดตัดวงจรออกจากกัน นั่นจะทำให้ตัวเก็บประจุมีโอกาสคายประจุออกมาได้ผ่านออกมาทางไอซีตัวที่ 2 และคักดาที่คร่อมตัวเก็บประจุซึ่งจะแสดงที่เอาท์พุทของไอซีตัวที่ 2 และเป็นเอาท์พุทของวงจรอยู่แล้ว ก็จะลดลงตามที่ตัวเก็บประจุคายประจุออกมา ตัวเก็บประจุจะคายประจุจนกระทั่งคักดาคร่อมมีค่าน้อย จนทำให้ไดโอดถูกป้อนแรงดันไปข้างหน้า (Forward bias) และตัวเก็บประจุถูกอัดประจุอีกครั้ง ซึ่งก็จะเป็นดังที่อธิบายในตอนแรก นั่นคือจะทำให้วงจรเปลี่ยนค่าตามการเปลี่ยนแปลงของยอดสัญญาณได้ และคงค่าได้ในขณะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่านี้จะถูกป้อนให้วงจรเอทูดีต่อไป

3.วงจร A/D

วงจร A/D เป็นวงจรที่ใช้แปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล ในโครงงานนี้ใช้เพื่อแปลงข้อมูลค่ากระแส ในการป้อนกลับให้ Z-80 วงจร A/D จะประกอบด้วย A/D และวงจรสร้างคักดาอ้างอิง

A/D ที่ใช้ในวงจรจะใช้ไอซีเบอร์ ADC0804 ซึ่งเป็น A/D แบบ Successive approximation ที่มีข้อมูลออกเป็น 8 bit และช่วงของศักดาที่ป้อนเข้าระหว่าง 0-5 โวลท์ ทำงานที่แรงดันอ้างอิง 2.5 โวลท์ และใช้เวลาในการแปลงค่า 100 ns ซึ่งรายละเอียดของ A/D สามารถดูได้จาก Data book

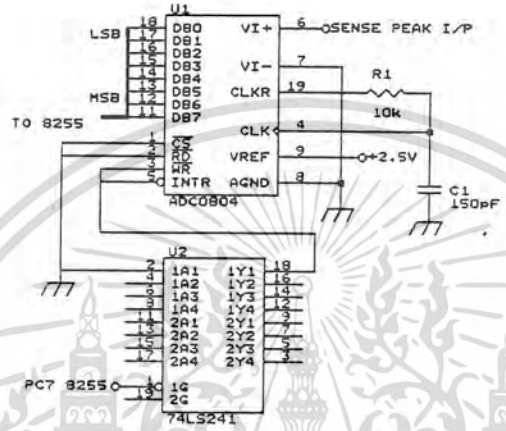
เนื่องจาก A/D ส่งข้อมูลเป็นระบบ 8 bit ทำให้สามารถส่งข้อมูลออกได้แตกต่างกัน 256 ค่าหรือจะแบ่งข้อมูลเข้าออกเป็น 256 ระดับ

ในกรณีของเอทูดีที่ใช้ในโครงงานนี้ ข้อมูลแต่ละระดับจะแตกต่างกัน 0.0195 โวลท์ เมื่อพิจารณาจากรูป และจากการทำงานของวงจรตรวจจับขนาดยอดสัญญาณ จะพบว่าข้อมูลแต่ละระดับที่เอทูดีรับ จะหมายถึงกระแสในวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่แตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= ((5-0)/√2)/256 = 0.0138016 แอมป์

ซึ่งในการกำหนดช่วงของกระแสที่จะทำให้ข้อมูลแตกต่างกันในแต่ละระดับ ดังที่แสดงดังข้างต้นนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายๆอย่างคือ ความสามารถของอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (A/D,D/A) ช่วงของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงจริงในวงจรกำลัง การต้องการความละเอียดในการทำงานของโครงงาน



ANALOG TO DIGITAL CONVERTER

รูปที่ 2.16 วงจรเอทูดี

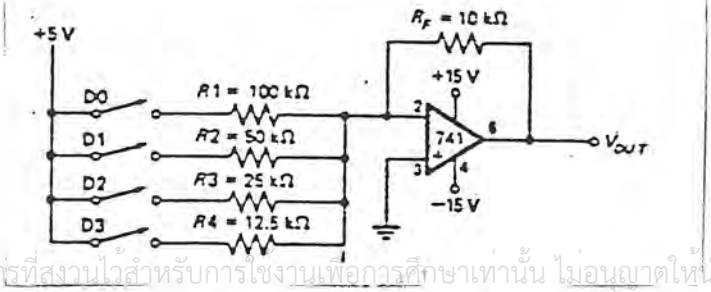
4.วงจรดีทูเอ

วงจรดีทูเอคือวงจรที่ใช้เปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกซึ่งต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์เพื่อรับข้อมูลหลังการประมวลผลว่าต้องการให้ อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่เท่าไหร่

วงจรดีทูเอแบบต่างๆ

แบบที่ 1 แบบใช้ตัวต้านทานหลายค่า

วงจรเปลี่ยนสัญญาณดีทูเอชนิดนี้ใช้ตัวต้านทานต่างๆและออปแอมป์เพื่อเปลี่ยนสัญญาณลอจิก 2 ระดับเป็นแรงดันที่ได้สัดส่วนกันรูปที่ แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลขนาด 4 บิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

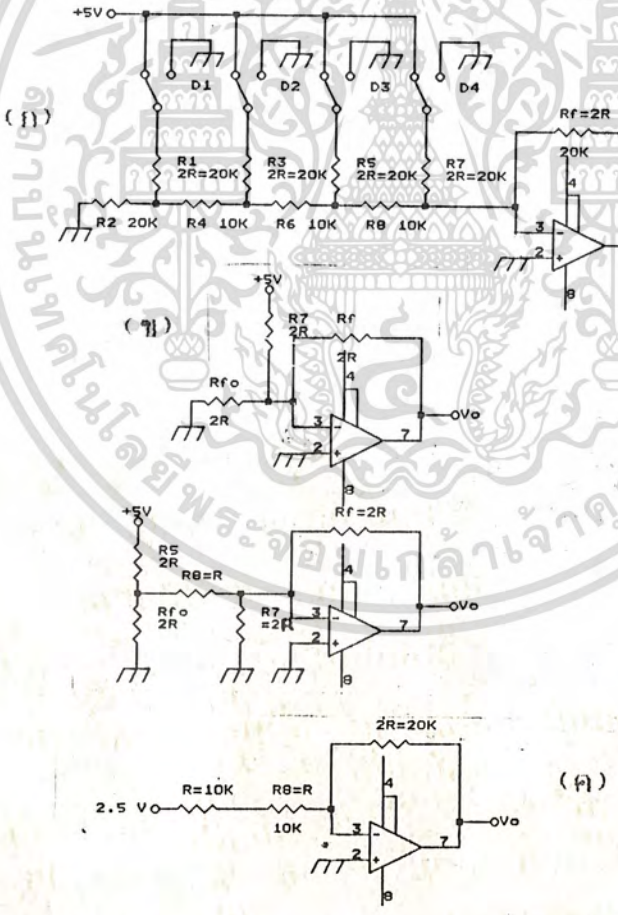
รูปที่ 2.17 วงจรดีทูเอใช้ตัวต้านทานหลายค่า

ขณะที่สวิทช์ D_0 ปิดจะมีแรงดันตกคร่อม R_1 5 โวลท์ ทำให้มีกระแสไหลเท่ากับ 0.05 แอมป์ ดังนั้นเอาท์พุทจึงมีค่าเท่ากับ -0.05*10K = 0.5 โวลท์ เมื่อปิดสวิทช์ D_1 จะมีแรงดันตกคร่อม R_2 เท่ากับ 0.1 แอมป์ ทำให้กระแสรวมที่ไหลผ่าน R_F = 0.05+0.1 = 0.15 แอมป์ ดังนั้นเอาท์พุทจึงเป็น -0.15*10K = 1.5 โวลท์

เมื่อเปิดปิดสวิทช์ D_0-D_3 ต่างกันไปก็จะได้แรงดันที่ต่างกันออกไปโดยมีลักษณะเป็นขั้นๆ

แบบที่ 2 ใช้ความต้านทาน 2 ค่า (R/2R Ladder D/A Converter)

เนื่องจากไอซีที่เข้ามาในวงจรงานนี้ใช้หลักการนี้ดังนั้นจะขอกล่าวโดยละเอียด ดังนี้เมื่อวงจรดีทูเอมีขนาดมากกว่า 4 บิต วงจรตามรูปที่ 2.17 จะเกิดปัญหาเนื่องจากต้องการค่าความต้านทานที่มีช่วงกว้างมากวิธีที่ใช้หลักการไบนารี่เวตเหมือนกัน แต่ใช้ความต้านทานเพียง 2 ค่าแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งกระแสจะถูกเปลี่ยนค่าแรงดันโดยออปแอมป์และตัวต้านทานป้อนกลับ R_F เหมือนวงจรในรูปที่ 2.17 วิธีนี้เรียกว่าการใช้ความต้านทาน 2 ค่า



รูปที่ 2.18 วงจรดีทูเอใช้ตัวต้านทานสองค่า

สังเกตให้ดีหลักการของความต้านทาน 2 ค่า ดูไปก็คล้ายกับกฎของเคียร์ชอฟเพียงแต่ว่าค่าความต้านทานที่ใช้เป็นอัตราส่วนที่ทำให้คำนวณได้ง่าย แรกเลยสมมติว่าสวิทช์ D_3 ซึ่งเป็นสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบิทที่มีนัยสำคัญสูงสุดนั้นต่อกับแรงดันอ้างอิง 5 โวลท์ ในขณะที่สวิทช์ตัวอื่นปิดลงกราวน์ ดังนั้น R_1 และ R_2 จึงต่อขนานกันลงกราวน์ สังเกตตัวต้านทาน 2R ต่อขนานกับ 2R อีกตัวหนึ่ง จึงมีค่าเท่ากับ R ค่า R นี้จะถูกบวกกับ R_4 กลายเป็นค่า 2R แล้วขนานกันกับ R_3 ลงกราวน์ การรวมของ R_3 และตัวต้านทานก่อนหน้าจึงทำให้เหลือค่าเพียงค่า R ต่ออนุกรมกับ R_5 พิจารณาเช่นเดียวกันกับวงจรส่วนที่เหลือก็จะได้เป็นวงจรที่ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 2.18 ข.

โดยเหตุที่กราวน์เทียมของออปแอมป์มีแรงดัน 0 โวลท์ ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเหล่านี้ลงกราวน์จึงไม่ต้องสนใจส่วนนี้ ดังนั้น แรงดัน 5 โวลท์ ที่ปลายข้างหนึ่งของ R_7 ค่า 20 กิโลโอห์ม ทำให้มีกระแส 0.25 มิลลิแอมป์ ผ่านที่จุดต่อและผ่าน R_F 20 กิโลโอห์ม แรงดันเอาท์พุทที่ได้จากบิทที่มีนัยสำคัญสูงสุดจึงมีค่า -5 โวลท์

แรงดันที่ได้จากบิทที่มีนัยสำคัญรองลงมาก็หาได้โดยปิดสวิทช์ D_2 ไปยัง +5 โวลท์ และ D_3 ลงกราวน์ ตัวต้านทานทั้งหมดที่อยู่ทางซ้ายของ R_5 ในรูปที่ 2.18 ก. ลดรูปเหลือเพียง 2R ต่อลงกราวน์การวิเคราะห์วงจรสามารถนำทฤษฎีของเทวินินมาใช้ได้โดยมีการแบ่งแรงดันระหว่าง R_5 และ 2R ที่ต่อลงกราวน์ดังรูป 2.18 ค.แรงดันเทวินินคือแรงดันที่รอยต่อหรือ 2.5 โวลท์ ตัวต้านทานเทวินินมีค่าเท่ากับตัวต้านทาน 2 ตัวต่อขนานกัน (หรือ R) อุปกรณ์ที่อยู่ทางด้านซ้ายของ R_5 สามารถลดรูปได้เหลือค่า R ต่อกับ 2.5 โวลท์ สามารถละทิ้ง R_7 ได้ เพราะจุดปลายทั้งสองค่าต่อลงกราวน์ ค่าความต้านทานรวมระหว่างที่จุดรวม(จุดกราวน์เทียม) และแรงดันเทวินินคือ 2R หรือ 20 กิโลโอห์ม ทำให้เกิดแรงดันเอาท์พุท -2.5 โวลท์ (สำหรับบิทที่มีนัยสำคัญถัดมา)

ด้วยการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันนี้ สามารถหาแรงดันเอาท์พุทที่บิตต่ำลงมาอีกได้ 1.25 โวลท์ต่ำสุดได้ 0.625 โวลท์ ในขณะที่ค่าดิจิตอลสูงสุด(สวิทช์ทุกตัวต่อไปที่ +5 โวลท์) ได้เอาท์พุทเต็มสเกลคือ 9.375 โวลท์

แม้ว่าดีทูเอ คอนเวอร์เตอร์แบบ R/2R แลดเดอร์ จะวิเคราะห์ยากกว่าแบบใช้ตัวต้านทานหลายค่า(Weighted resistor)แต่จะง่ายกว่าสำหรับการต่อวงจรให้ถูกต้อง เพราะใช้ค่าความต้านทานเพียง 2 ค่าเท่านั้น จำนวนบิตก็เพิ่มได้โดยเพิ่มส่วนของ R/2R ลงไป วงจรนับ 4 บิตที่เป็น TTL หรือ CMOS อาจนำมาต่อแทนตำแหน่งของสวิทช์ในวงจรรูป 2.18 ก. เพื่อแรงดันเอาท์พุทเป็นขั้นบันไดได้

<u>แบบใช้ไอซี</u>

ซึ่งโครงงานนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ DAC0808 มาใช้ในการทำงานซึ่งมีหลักการทำงานแบบ R/2R แลดเดอร์ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ไม่ว่าการใช้ประโยชน์ด้านใดๆ ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์เท่านั้น

ใน DAC0808 R/2R แลดเดอร์ แบ่งกระแสที่ได้จากภาคขยายเป็น 8 ระดับ ขึ้นอยู่

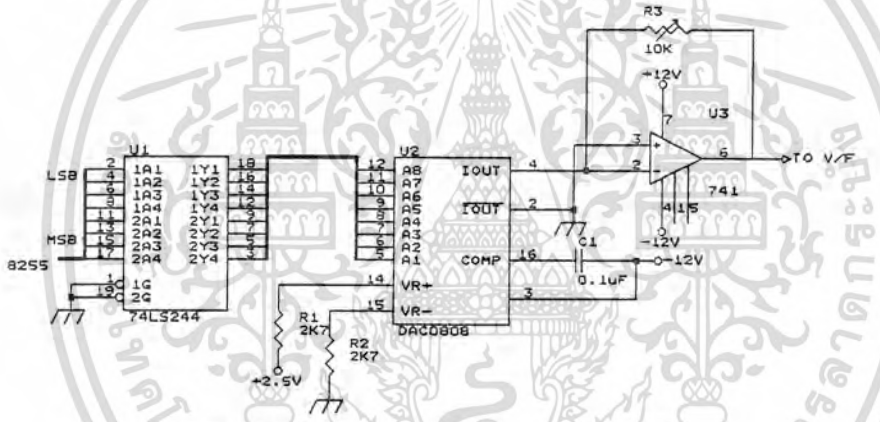
กับค่าทางเลขฐานสอง (binary) ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะสวิทช์ให้กระแสที่ได้สอดคล้องกับอินพุท A_1 ถึง A_8 การเรียงจากบิทที่มีนัยสำคัญสูงสุดถึงบิทที่มีนัยสำคัญต่ำสุดจะกลับกันกับของวงจรนับทั่วๆไป แต่วงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกบางตัวก็จะไม่ได้เรียงอย่างนี้ ดังนั้นควรอ่านคู่มืออย่างละเอียดถี่ถ้วนเสียก่อน

DAC0808 มีกระแสเอาท์พุทที่สามารถเปลี่ยนเป็นแรงดันได้ด้วยออป-แอมป์และตัวต้านทานดังแสดงดังรูป 2.19

จากค่าที่เลือกไว้ ได้แรงดันเอาท์พุทเต็มสเกล(อินพุท A_1 ถึง A_8 เป็น "1")คือ

2 โวลท์ * (5 กิโลโอห์ม/ 1 กิโลโอห์ม) * (255/256)

ซึ่งเราถือว่าเป็นวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบ 10 โวลท์ เต็มสเกล



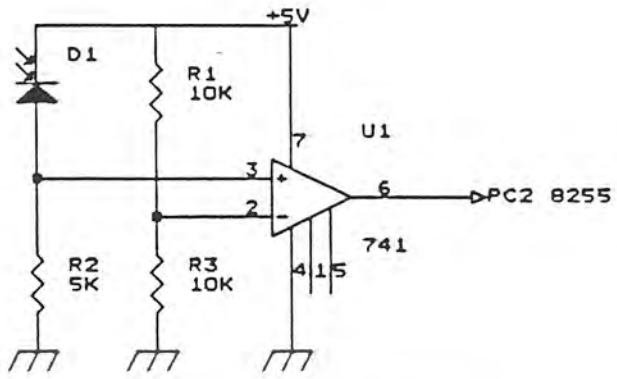
DIGITAL TO ANALOG CONVERTER

รูปที่ 2.19 วงจรดีทูเอ

5.วงจรตรวจจับชิ้นงาน

ใช้คุณสมบัติของ LDR (D1) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เมื่อมีแสงมากระทบมากจะทำให้ความต้านทานตกคร่อมตัวมันน้อยและในทางกลับกันเมื่อแสงตกกระทบตัวมันน้อยก็จะทำให้ความต้านทานตกคร่อมตัวมันมาก จากหลักการนี้เราสามารถนำมาใช้ตรวจจับชิ้นงานโดยให้ชิ้นงานเป็นตัวบังแสงที่ตกกระทบตัว LDR แล้วใช้วงจร Comparator เป็นตัวแยกว่ามีชิ้นงานเข้ามาในเบ้าหลอมหรือยังถ้ายังโวลท์เตจที่ขา 6 ของ 741 ก็จะอยู่ในสถานะ Low ถ้ามีชิ้นงานเข้ามาแล้วก็จะอยู่ในสถานะ High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SENSE OBJECT

รูปที่ 2.20 วงจรตรวจจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

การทดลองที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน แบบมีกับไม่มีระบบควบคุมความถี่

V_{DC} = 100V FREQUENCY = 105 KHz

เวลา (s)	ไม่มี			มี		
	ϕ 0.8	ϕ 1.0	ϕ 1.4	ϕ 0.8	ϕ 1.0	ϕ 1.4
	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)
0	6.8	6.2	7.2	7.5	6.8	7.5
10	6.5	6.2	7.2	7.5	6.8	7.5
20	6.5	6.1	7.1	7.5	6.8	7.5
30	6.4	6.0	7.1	7.5	6.8	7.5
40	6.4	6.0	7.0	7.5	6.8	7.4
50	6.3	5.9	7.0	7.5	6.8	7.4
60	6.2	5.8	6.9	7.5	6.8	7.3
70	6.2	5.8	6.8	-	6.8	7.3
80	6.1	5.7	6.8	-	6.9	7.3
90	-	5.6	6.7	-	6.9	7.3
100	-	5.5	6.7	-	7.0	7.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{DC} = 120 V FREQUENCY = 95 KHz เหล็ก ϕ1.0 cm

เวลา (s)	ไม่มี		มี	
	F (KHz)	I (A)	F (KHz)	I (A)
0	95	9.0	95.0	10.2
10	95	9.0	94.8	10.2
20	95	8.9	94.8	10.1
30	95	8.8	94.8	10.1
40	95	8.6	94.8	10.0
50	95	8.6	94.6	10.0
60	95	8.5	94.6	10.0
70	95	8.4	-	-
80	95	8.4	-	-
90	95	8.4	-	-
100	95	8.2	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเหนี่ยวนำระหว่าง
เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนแบบมีกับไม่มีระบบควบคุมความถี่

V_{DC} = 120 V FREQUENCY = 105 KHz เหล็ก ϕ1.0 cm

เวลา (s)	ไม่มี		มี	
	F (KHz)	I (A)	F (KHz)	I (A)
0	105	7.0	105.0	7.5
10	105	6.8	105.2	7.5
20	105	6.8	105.0	7.5
30	105	6.7	104.8	7.5
40	105	6.6	104.6	7.5
50	105	6.5	104.6	7.5
60	105	6.5	104.4	7.5
70	105	6.5	-	-
80	105	6.5	-	-
90	105	6.5	-	-
100	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{DC} = 120V FREQUENCY = 105 KHz

เวลา (s)	ไม่มี			มี		
	ϕ 0.8	ϕ 1.0	ϕ 1.4	ϕ 0.8	ϕ 1.0	ϕ 1.4
	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)
0	7.8	7.0	8.0	9.0	7.5	9.2
10	7.5	6.8	8.0	9.0	7.5	9.2
20	7.2	6.8	7.9	9.0	7.5	9.2
30	7.1	6.7	7.8	9.0	7.5	9.3
40	7.0	6.5	7.8	9.0	7.5	9.2
50	7.0	6.5	7.6	-	7.5	9.2
60	6.9	6.5	7.5	-	7.5	9.2
70	-	6.5	7.4	-	7.4	9.2
80	-	6.5	7.2	-	-	9.2
90	-	6.4	7.2	-	-	9.2
100	-	-	7.0	-	-	9.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เริ่มต้น
กับเวลาในการเหนี่ยวนำความร้อนของระบบติดตามความถี่

V_{DC} = 120 V เหล็ก ϕ0.8 cm

เวลา (s)	I (95 KHz)	I (105 KHz)
0	12.0	9.0
10	12.0	9.0
20	12.0	9.0
30	11.9	9.0
40	11.9	9.0
50	12.0	9.0
60	-	9.0
70	-	9.0
80	-	9.0
90	-	-
100	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{DC} = 120 V เหล็ก ϕ1.0 cm

เวลา (s)	I (95 KHz)	I (105 KHz)
0	10.2	7.5
10	10.2	7.5
20	10.1	7.5
30	10.1	7.5
40	10.0	7.5
50	10.0	7.5
60	-	7.5
70	-	-
80	-	-
90	-	-
100	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่พบมีดังนี้

1. ปัญหาจากวงจรส่วนตรวจจับสัญญาณ กระแสสูงสุดที่ได้มีสัญญาณรบกวนมาก ดังนั้นเอทูดีจึงเกิดขึ้นเป็นช่วง ทำให้การประมวลผลผิดพลาดได้

2. เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงๆความถี่ที่สูงจะรบกวนการทำงานของวงจรตรวจจับชิ้นงาน

3. ความละเอียดของอุปกรณ์ เนื่องจากไมโครโปรเซสเซอร์จะทำการประมวลผลเชิงปริมาณครั้งละ 8 บิท ทำให้สัญญาณที่ผ่านวงจร ดีทูเอและเอทูดี มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงความแตกต่าง 256 ระดับสัญญาณ ทำให้ค่าที่ได้มีความละเอียดที่ไม่สูงพอในช่วงใช้งานที่กว้าง

แนวทางการพัฒนา

ควรเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรตรวจจับสัญญาณให้มีสัญญาณรบกวนน้อยลง และใช้ระบบการประมวลผลที่มีความละเอียดมากขึ้น นอกจากนี้ควรเพิ่มประสิทธิภาพของส่วนคอนเวอร์ชั่นและส่วนวงจรไฟฟ้าให้มีกำลังที่สูงขึ้นและมีการรบกวนที่น้อยลง และควรเพิ่มส่วนตรวจจับอุณหภูมิที่เข้าไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ORIGIN 2000
        PORT 20H - VCO O/P
        PORT 21H - CURRENT I/P
        PORT 22H - OPTION - LOWER I/P PC0,PC2
                           UPPER O/P PC7
-------------------------------------------------------

2000    CD 93 20    MAIN:CALL "HELLO"
2003    AF                XOR A
2004    21 88 21          LD HL,ADDR_CUR1
2007    7E                LD A,(HL)
2008    23                INC HL
2009    77                LD (HL),A
                          ----------------------------
                            *CONTROL CODE*
200A    AF                XOR A
200B    3E 83             LD A,83H
200D    D3 23             OUT (23H),A
                          ----------------------------
                            *OFF BUFFER*
200F    AF                XOR A
2010    3E 0E             LD A,0EH
2012    D3 23             OUT (23H),A
                          ----------------------------
2014    AF                XOR A
2015    21 8B 21          LD HL,ADDR_VCO1
2018    7E                LD A,(HL)
2019    23                INC HL
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
201A    77              LD (HL),A
201B    D3 20           OUT (20H),A
                        ---------------------------
201D    AF          EYE1:XOR A
201E    DB 22           IN A,(22H)
2020    CB 57           BIT 2,A
2022    CA A7 20        JP Z, "WAIT1"
                        ---------------------------
                          *ON BUFFER*
2025    AF              XOR A
2026    3E OF           LD A,OFH
2028    D3 23           OUT (23H),A
                        ---------------------------
                          *DISPLAY START*
202A    CD BD 20        CALL "WORK"
202D    CD D1 20    LOOP:CALL "DISPLAY_VCO"
2030    AF          EYE2:XOR A
2031    DB 22           IN A,(22H)
2033    CB 47           BIT 0,A
2035    CC ED 20        CALL Z, "KEY"
2038    CB 57           BIT 2,A
203A    CA 07 21        JP Z, "WAIT2"
                        ---------------------------
203D    AF              XOR A
203E    3E OF           LD A,OFH
2040    D3 23           OUT (23H),A
                        ---------------------------
2042    AF              XOR A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
2043    DB 21           IN A,(21H)
2045    21 8A 21        LD HL,ADDR_CUR3
2048    77              LD (HL),A
2049    2B              DEC HL
204A    46              LD B,(HL)
204B    B8              CP B
204C    D2 2A 21        JP NC, "OVER"
                        ----------------------------
204F    AF              XOR A
2050    21 8C 21        LD HL,ADDR_VCO2
2053    7E              LD A,(HL)
2054    0E 00           LD C,00H
2056    B1              OR C
2057    CA 42 21        JP Z, "SEND_00H"
205A    0E FF           LD C,FFH
205C    A9              XOR C
205D    CA 49 21        JP Z, "SEND_FFH"
                        ----------------------------
2060    AF              XOR A
2061    7E              LD A,(HL)
2062    3D              DEC A
2063    D3 20           OUT (20H),A
                        ----------------------------
2065    CD 51 21        CALL "DELAY"
2068    AF              XOR A
2069    DB 21           IN A,(21H)
206B    21 8A 21        LD HL,ADDR_CUR3
206E    56              LD D,(HL)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
206F    BA              CP D
2070    D2 5B 21        JP NC, "DEC_FREQ"
                        ----------------------------
2073    AF              XOR A
2074    21 8C 21        LD HL,ADDR_VCO2
2077    7E              LD A,(HL)
2078    3C              INC A
2079    D3 20           OUT (20H),A
                        ----------------------------
207B    CD 51 21        CALL "DELAY"
                        ----------------------------
207E    AF              XOR A
207F    DB 21           IN A,(21H)
2081    21 8A 21        LD HL,ADDR_CUR3
2084    56              LD D,(HL)
2085    BA              CP D
2086    D2 65 21        JP NC, "INC_FREQ"
                        ----------------------------
2089    AF              XOR A
208A    21 8C 21        LD HL,ADDR_VCO2
208D    7E              LD A,(HL)
208E    D3 20           OUT (20H),A
2090    C3 2D 20        JP "LOOP"
-------------------------------------------------------
2093    AF          HELLO:XOR A
2094    3E 03               LD A,03H
2096    D7                  RST 10H
2097    21 70 21            LD HL,DATA_HELLO
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
209A    11 E7 3F          LD DE,3FE7H
209D    06 06             LD B,06H
209F    ED B0             LDIR
20A1    3E 04             LD A,04H
20A3    06 FF             LD B,FFH
20A5    D7                RST 10H
20A6    C9                RET
-------------------------------------------------------------
20A7    AF          wAIT1:XOR A
20A8    3E 03             LD A,03H
20AA    D7                RST 10H
20AB    21 76 21          LD HL,DATA_WAIT
20AE    11 E7 3F          LD DE,3FE7H
20B1    06 06             LD B,06H
20B3    ED B0             LDIR
20B5    3E 04             LD A,04H
20B7    06 FF             LD B,FFH
20B9    D7                RST 10H
20BA    C3 1D 20          JP "EYE1"
-------------------------------------------------------------
20BD    AF                XOR A
20BE    3E 03             LD A,03H
20C0    D7                RST 10H
20C1    21 7C 21          LD HL,DATA_START
20C4    11 E7 3F          LD DE,3FE7H
20C7    06 06             LD B,06H
20C9    ED B0             LDIR
20CB    3E 04             LD A,04H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
20CD    06 FF              LD B,FFH
20CF    D7                 RST 10H
20D0    C9                 RET
-------------------------------------------------------------
20D1    F5      DISPLAY_VCO:PUSH AF
20D2    C5                 PUSH BC
20D3    D5                 PUSH DE
20D4    E5                 PUSH HL
20D5    AF                 XOR A
20D6    3E 03              LD A,03H
20D8    D7                 RST 10H
20D9    21 8C 21           LD HL,ADDR_VCO2
20DC    7E                 LD A,(HL)
20DD    32 F1 3F           LD (3FF1H),A
20E0    3E 07              LD A,07H
20E2    D7                 RST 10H
20E3    3E 04              LD A,04H
20E5    06 FF              LD B,FFH
20E7    D7                 RST 10H
20E8    E1                 POP HL
20E9    D1                 POP DE
20EA    C1                 POP BC
20EB    F1                 POP AF
20EC    C9                 RET
-------------------------------------------------------------
20ED    F5              KEY:PUSH AF
20EE    C5                 PUSH BC
20EF    D5                 PUSH DE
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
20F0    E5              PUSH HL
20F1    AF              XOR A
20F2    DD 21 89 21     LD IX,ADDR_CUR2
20F6    06 04           LD B,04H
20F8    3E 08           LD A,08H
20FA    D7              RST 10H
20FB    21 89 21        LD HL,ADDR_CUR2
20FE    DD 7E 00        LD A,(IX+00H)
2101    7E              LD A,(HL)
2102    E1              POP HL
2103    D1              POP DE
2104    C1              POP BC
2105    F1              POP AF
2106    C9              RET
-------------------------------------------------------------
2107    F5      WAIT2:PUSH AF
2108    C5            PUSH BC
2109    D5            PUSH DE
210A    E5            PUSH HL
210B    AF            XOR A
210C    3E 0E         LD A,0EH
210E    D3 23         OUT (23H),A
2110    AF            XOR A
2111    3E 03         LD A,03H
2113    D7            RST 10H
2114    21 76 21      LD HL,DATA_WAIT
2117    11 E7 3F      LD DE,3FE7H
211A    06 06         LD B,06H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
211C    ED B0           LDIR
211E    3E 04           LD A,04H
2120    06 FF           LD B,FFH
2122    D7              RST 10H
2123    E1              POP HL
2124    D1              POP DE
2125    C1              POP BC
2126    F1              POP AF
2127    C3 30 20        JP "EYE2"
-------------------------------------------------------------
212A    3E 04       OVER:LD A,03H
212C    D7               RST 10H
212D    21 82 21         LD HL,DATA_OVER
2130    11 E7 3F         LD DE,3FE7H
2133    06 06            LD B,06H
2135    ED B0            LDIR
2137    3E 04            LD A,04H
2139    06 FF            LD B,FFH
213B    D7               RST 10H
213C    3E 0E            LD A,0EH
213E    D3 23            OUT (23H),A
2140    18 E8            JR "OVER"
-------------------------------------------------------------
2142    AF          SEND_00H:XOR A
2143    77               LD (HL),A
2144    D3 20            OUT (20H),A
2146    C3 2D 20         JP "LOOP"
-------------------------------------------------------------
2149    3E FE       SEND_FFH:LD A,FEH
```

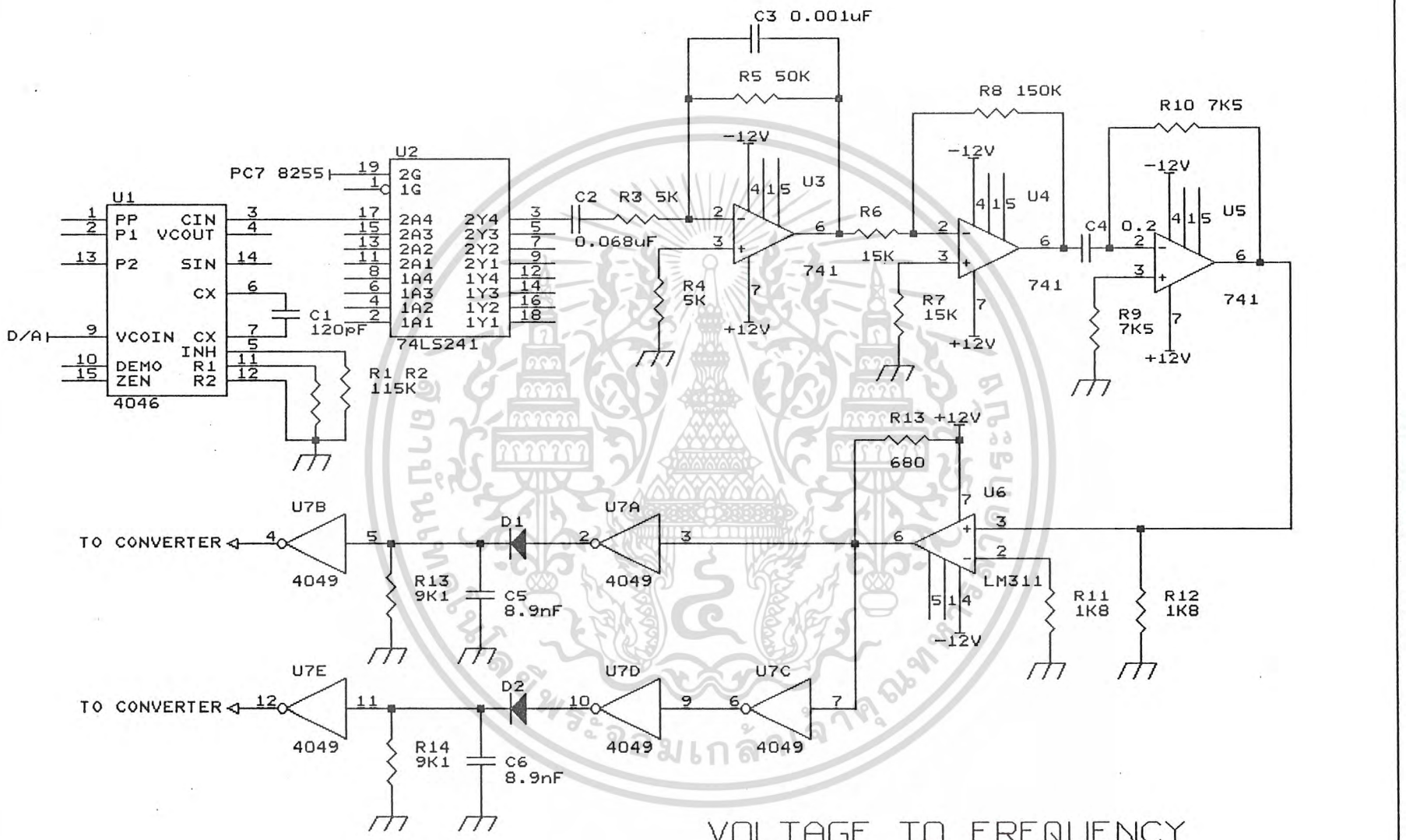
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

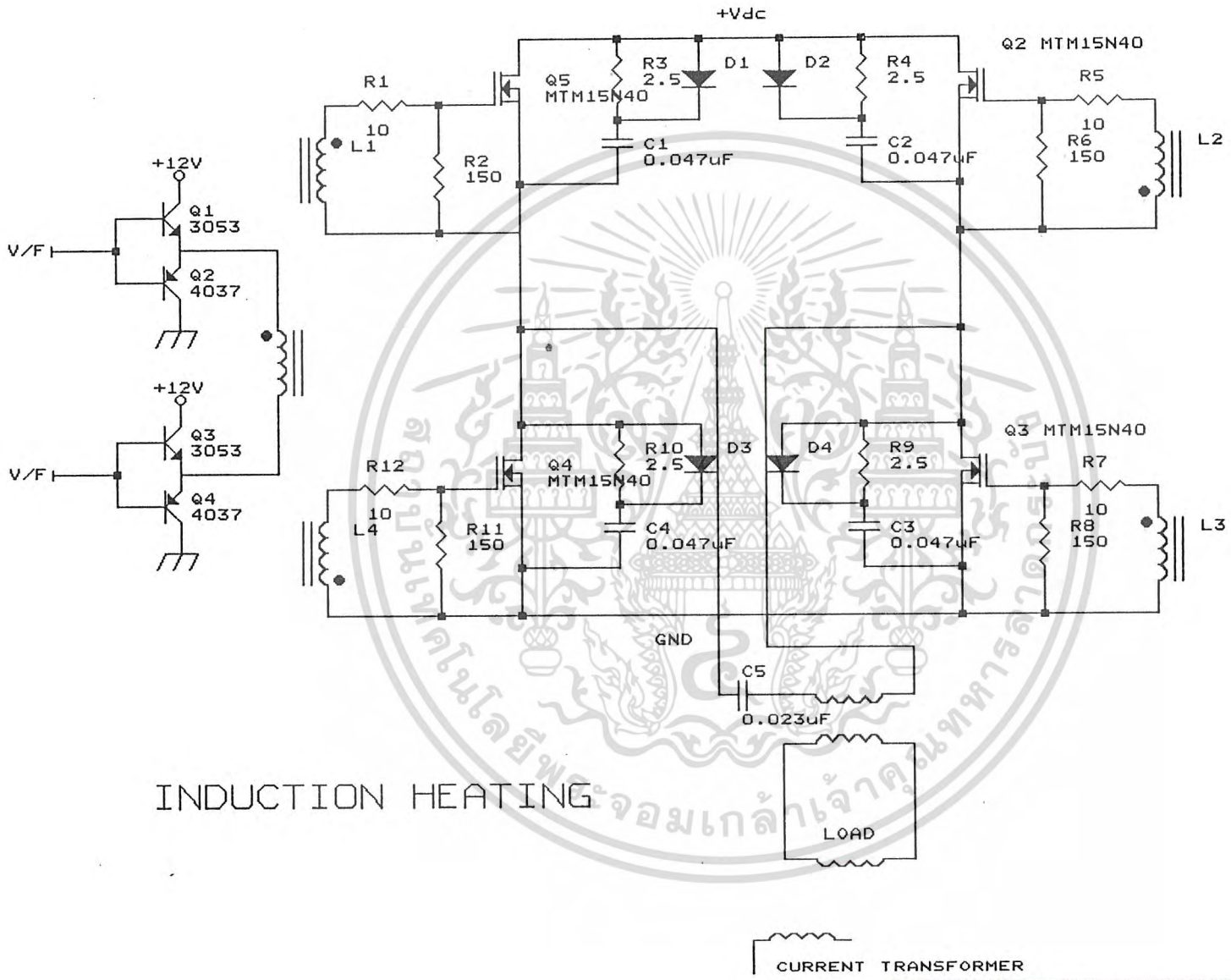
```
214B    77              LD (HL),A
214C    D3 20           OUT (20H),A
214E    C3 2D 20        JP "LOOP"
-------------------------------------------------------
2151    F5          DELAY:PUSH AF
2152    C5                PUSH BC
2153    06 02             LD B,02H
2155    3E 2F             LD A,2FH
2157    D7                RST 10H
2158    C1                POP BC
2159    F1                POP AF
215A    C9                RET
-------------------------------------------------------
215B    21 8C 21  DEC_FERQ:LD HL,ADDR_VCO2
215E    35                DEC HL
215F    7E                LD A,(HL)
2160    D3 20             OUT (20H),A
2162    C3 2D 20          JP "LOOP"
-------------------------------------------------------
2165    AF          INC_FREQ:XOR A
2166    21 8C 21          LD HL,ADDR_VCO2
2169    34                INC (HL)
216A    7E                LD A,(HL)
216B    D3 20             OUT (20H),A
216D    D3 2D 20          JP "LOOP"
-------------------------------------------------------
2170    00767938383F      :DATA_HELLO
2176    00003E770478      :DATA_WAIT
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

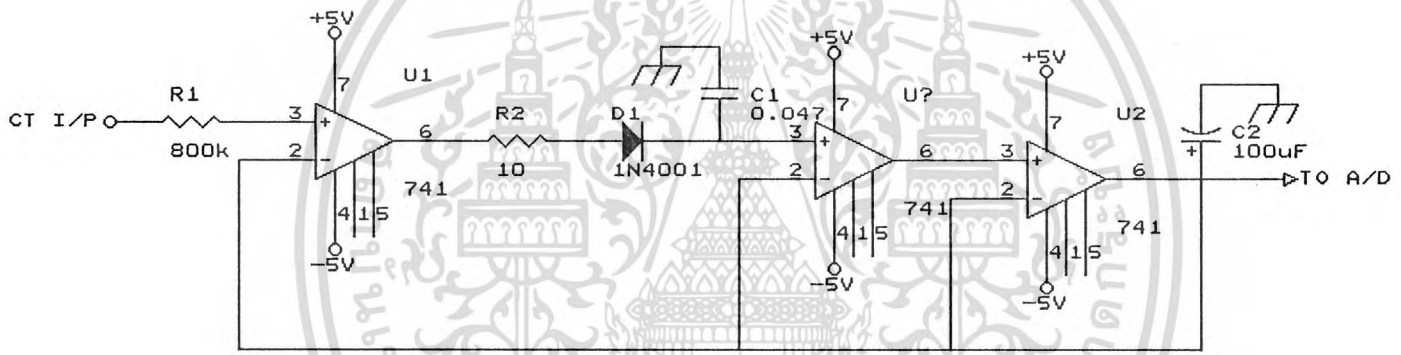
```
217C        006D78775078        :DATA_START
2182        00003F3E7950        :DATA_OVER
-------------------------------------------------------------
2188        FF                  :ADDR_CUR1
2189        FF                  :ADDR_CUR2
218A        00                  :ADDR_CUR3
218B        C0                  :ADDR_VCO1
218C        00                  :ADDR_VCO2
-------------------------------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


C3 0.001uF
R5 50K
R8 150K
R10 7K5
U1
4046
PP
P1
P2
CIN
VCOUT
SIN
CX
VCOIN
INH
DEMO
ZEN
R1
R2
D/A
C1
120pF
R1 R2
115K
U2
74LS241
PC7 8255
2G
1G
2A4
2A3
2A2
2A1
1A4
1A3
1A2
1A1
2Y4
2Y3
2Y2
2Y1
1Y4
1Y3
1Y2
1Y1
C2
R3 5K
0.068uF
R4
5K
U3
741
R6
15K
R7
15K
U4
741
C4
0.2
R9
7K5
U5
741
-12V
+12V
R13 +12V
680
U6
LM311
R11
1K8
R12
1K8
U7A
U7B
U7C
U7D
U7E
4049
TO CONVERTER
TO CONVERTER
D1
D2
R13
9K1
C5
8.9nF
R14
9K1
C6
8.9nF
VOLTAGE TO FREQUENCY
Size
A
Document Number
REV
Date:
March 9, 1994
Sheet
of

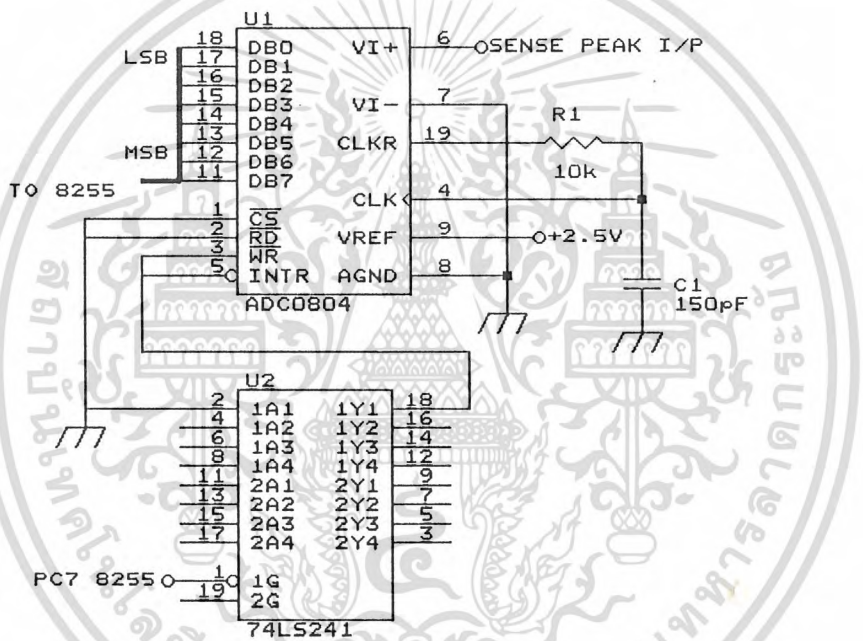


Size	Document Number	REV
A		-
Date: March 11, 1994	Sheet	of



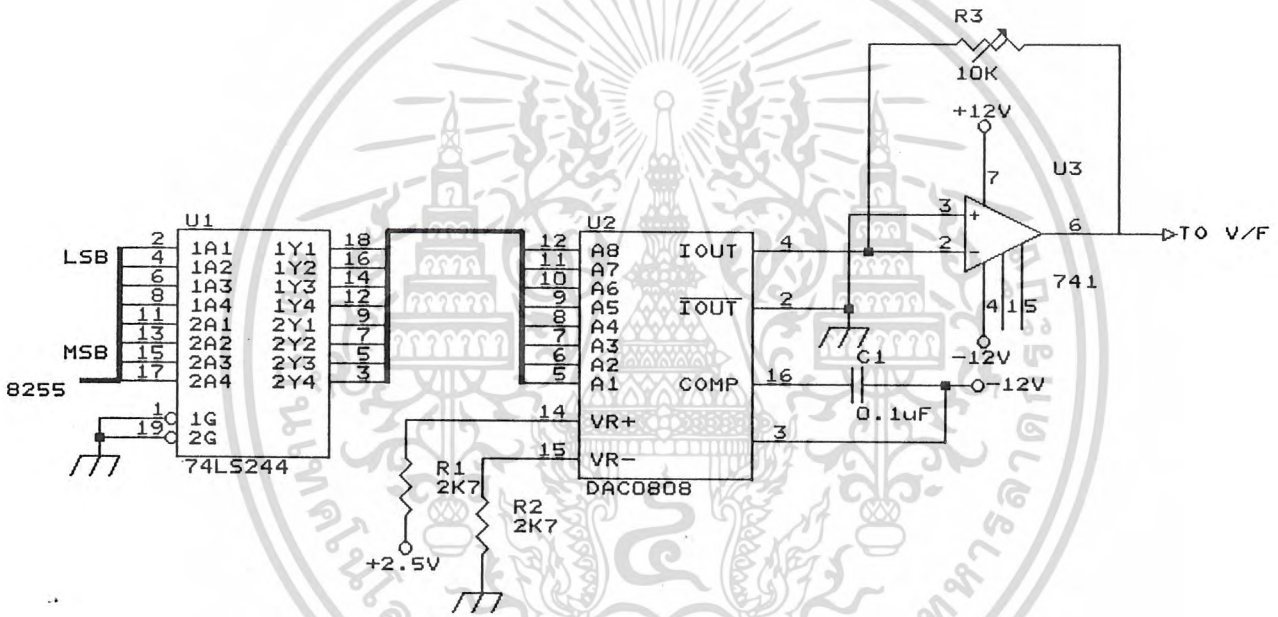
SENSE PEAK

Size	Document Number	REV
A		
Date: March 9, 1994	Sheet of	



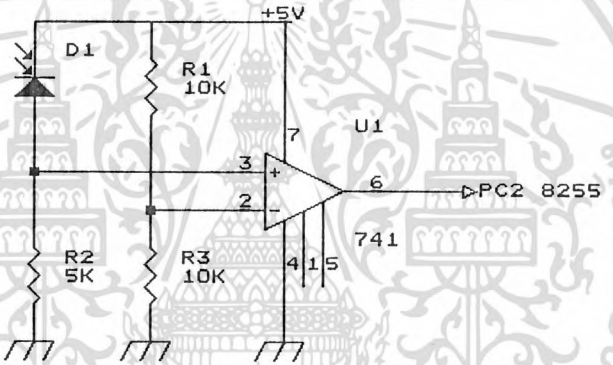
ANALOG TO DIGITAL CONVERTER

Size	Document Number	REV
A		
Date: March 9, 1994	Sheet of	



DIGITAL TO ANALOG CONVERTER

Size	Document Number	REV
A		
Date: March 9, 1994	Sheet of	



SENSE OBJECT

Size A	Document Number	REV
Date: March 9, 1994	Sheet of	

เอกสารอ้างอิง

1. GEORGE CHRYSSIS "HIGH - FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLIES" McGraw-Hill, INC,1984

2. JOHN DAVIES, PETER SIMPSON "INDUCTION HEATING HANDBOOK" McGraw-Hill, INC,1979

3. MOTOROLA TMOS POWER MOSFET DATA

4. WILLIAM MCMERRAY, "SELECTION OF SNUBBERS AND CLAMPS TO OPTIMIZE THE DESIGN OF TRANSISTOR SWITCHING CONVERTERS" IEEE TRANSACTIONS

5. NATIONAL SEMICONDUCTOR , "LINEAR APPLICATION"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ให้ความรู้ ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจ และขอขอบคุณ อาจารย์ สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำตลอดมา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้