ปีการศึกษา 2533

ดิจิตอล แอล - ซี มิเตอร์

โดย

นาย ชิดชอบ พวงวาสนา

นาย ถวัลศักดิ์ ธีรวุฒิกุลรักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ภากร หุตะสิงกาศ

ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2533

ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เรื่อง ดิจิตอล แอล - ซี มิเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นาย ชิดชอบ พวงวาสนา
2. นาย ถวัลศักดิ์ ธีรวุฒิกุลรักษ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ภากร หุตะสังกาศ)

เลขหมู่ T33 T63 ส3
เลขทะเบียน 027836
วัน, เดือน, ปี 12 ก.ค. 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิตอล แอล – ซี มิเตอร์

ผู้จัดทำ 1. นาย ชิดชอบ พวงวาสนา
2. นาย ถวัลศักดิ์ ธีรวุฒิกุลรักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ ภากร หุตะสังกาศ

ปีการศึกษา 2533

บทคัดย่อ

ดิจิตอล แอล - ซี มิเตอร์ เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้ทราบค่าแน่นอนของตัวเก็บประจุไฟฟ้าหรือตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ ในกรณีที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีเปอร์เซนต์ผิดพลาดสูง ทำให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าเหมาะสมกับวงจรได้สะดวกและทำให้วงจรมีความเที่ยงตรงสูง

ดิจิตอล แอล - ซี มิเตอร์ อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้าไปเป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะได้จากการส่งสัญญาณรูปสามเหลี่ยมผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าหรือตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งต่อร่วมกับอุปกรณ์ตัวอื่น เป็นวงจร Differential แรงดันที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าหรือค่าความจุไฟฟ้า แล้วนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้แสดงค่าออกมาโดยใช้โวลท์มิเตอร์ ค่าที่แสดงออกมาจะเป็นค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งวิธีนี้จะทำให้วัดค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความผิดพลาดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIGITAL L - C METER

CHITCHOB POUNGVASSANA

TAWANSAK TEERAWUTGULLARUX

PAKRON HUTASUNGGARD Advisor

Academic Year, 1990

Abstract

Digital L-C Meter is an instrument for measuring the value of capacitance and inductances . We can known their true value and error by measuring so we can choose the device for suitable , convenient and high accuracy of circuit.

The principle of Digital L-C Meter by changes the value of capacitances or inductances to voltages. These voltages can built up by supply triangle signal through L-C with join the other devices, called " DIFFERENTIAL CIRCUIT "

These voltageswill be variable the capacitances or inductances, and can measure L-C by voltmeter . Volt meter will show the direct value of - capacitances or inductances and low error.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ		
สารบัญ		
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	การเหนี่ยวนำไฟฟ้า	2
บทที่ 3	การประจุไฟฟ้า	25
บทที่ 4	คุณสมบัติฮอพแอมป์และการใช้งานไอซีโวลท์เตจคอมพาราเตอร์	50
บทที่ 5	คุณลักษณะ Digital L-C Meter	75
บทที่ 6	บทสรุปและวิจารณ์	89
ภาคผนวก		91
หนังสืออ้างอิง		100
กิตติกรรมประกาศ		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านอีเลคทรอนิคส์ ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันทั้งทางตรงและทางอ้อมของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นที่อยู่อาศัย การเดินทางจนถึงที่ทำงานนับตั้งแต่ตื่นนอนเราก็ได้ยินเสียงนาฬิกาปลุกอีเลคทรอนิคส์ เครื่องเสียง สเตอริโอ โทรทัศน์ โทรสัพท์ คอมพิวเตอร์ และอื่น ๆ อีกมากมาย อุปกรณ์อีเลคทรอนิคส์นั้นได้มีผลต่อธุรกิจไปในทุก ๆ ด้าน แต่ถ้าหากอุปกรณ์อีเลคทรอนิคส์เหล่านี้ เกิดขัดข้องขึ้นมามนุษย์จะมีความรู้สึกอารมณ์เสียและหงุดหงิด ทำงานหนักกว่าเดิมและใช้เวลามาก

อุปกรณ์อีเลคทรอนิคส์เกือบทุกชนิดจะมีส่วนประกอบของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor), ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductor) ฯลฯ เมื่อเราต้องการแก้ไขในส่วนของ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) หรือ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductor)

เมื่อเราต้องการทราบค่าจากอุปกรณ์แต่ว่า ตัวอักษรไม่สามารถมองเห็นได้จึงต้องอาศัยเครื่องวัด Digital L-C Meter ซึ่งไม่ต้องไปเปิดอุปกรณ์ดูว่าค่าเหล่านั้นมีค่าเป็นเท่าไร ซึ่งเป็นการสะดวกและประหยัดเวลาได้เป็นอย่างมาก ในการใช้ Digital L-C Meter ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าและวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

1.2 จุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์เรื่อง Digital L-C Meter ตาม PROJECT นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับวัดแสดงค่าความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ 1pF.-20 mF.และ 1 μH.-2H. ในส่วนของการวัดค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า และสะดวกในการอ่านค่าเพราะ แสดงค่าเป็นตัวเลขซึ่งผู้จัดทาหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับผู้อ่านและผู้สนใจดังนี้

1.2.1 เพื่อใช้เป็นเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

1.2.2 เป็นการสะดวกและรวดเร็วในการวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยสามารถอ่านเป็นตัวเลขได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเหนี่ยวนำ
(INDUCTANCE)

2-1 การเหนี่ยวนำ (Inductance)

การเหนี่ยวนำ เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ที่จะพยายามขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจร นั่นคือ ถ้ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัว (Self-Induced Voltage)ต่อต้านกับการเปลี่ยนแปลงนี้จึงทำให้เกิดการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นไปอย่างช้าๆและถ้ากระแสไฟฟ้าลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวจะช่วยเสริมหรือช่วยขยายเวลาในการไหลของกระแสไฟฟ้าออกไป จึงทำให้การลดของกระแสไฟฟ้าเป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้น ผลที่สังเกตเห็นได้อย่างง่ายๆของการเหนี่ยวนำ คือกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้อย่างรวดเร็วเหมือนกับในวงจรที่ไม่มีการเหนี่ยวนำ (Noninductive Circuit)

การขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า เป็นผลอย่างหนึ่งของการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้าได้เมื่อตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก หรือให้เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดกับตัวนำไฟฟ้า นั่นคือ เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์(Relative Motion) ขึ้นระหว่างสนามแม่เหล็กและตัวนำไฟฟ้า จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวขึ้นในตัวนำไฟฟ้า

2-2 การเหนี่ยวนำภายในตัว (Self Inductance)

ถึงแม้ว่าตัวนำไฟฟ้าที่ยาวเป็นเส้นตรงอย่างเดียว ก็จะมีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นได้บ้าง ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวนำไฟฟ้าตลอดทั้งความยาวของมัน เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงค่าไป สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เป็นผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัว" (Self Induced e.m.f) ทั้งนี้เพราะว่ามันถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าในวงจรกำลังเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ (Flux) ที่คล้องกับ (Linking With) วงจรก็จะค่อยๆ เพิ่มตามไปด้วย ฟลักซ์ที่กำลังเพิ่มขึ้นนี้ จะตัดกับตัวนำไฟฟ้าและทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ โดยมีทิศทางขัดขวางต่อการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ ในทำนองเดียวกัน เมื่อกระแสไฟฟ้ากำลังลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงข้ามกันกับในตอนแรก และจะขัดขวางต่อการลดของกระแสไฟฟ้า ผลที่เกิดขึ้นนี้ ได้สรุปไว้ใน

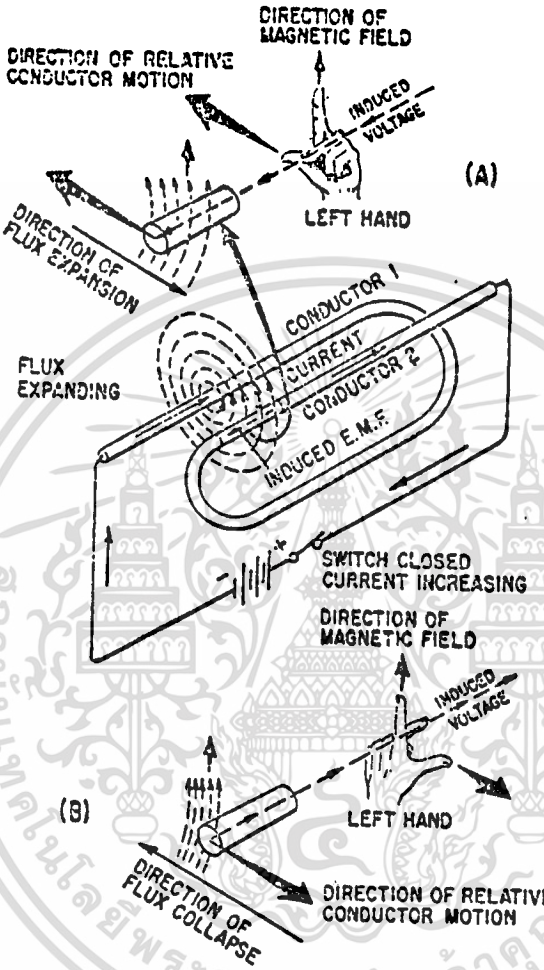
กฎของเลนซ์ (Lenz's Law) ซึ่งกฎนี้ได้กล่าวไว้ว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรใดๆจะมีทิศทางตรงกันข้าม กับผลที่ทำให้มันเกิดเสมอ"

การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้าที่นำมาพันเป็นขดลวด จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆแต่ละส่วนของตัวนำ ตัดกับตัวนำส่วนอื่นๆ ของขดลวด ดังแสดงให้เห็นในรูป 2-1(A) ความยาวของตัวนำจะถูกขดให้เป็นวง จึงทำให้ส่วนทั้งสองของตัวนำวางใกล้กันและขนานกัน ส่วนเหล่านี้ใช้แทนตัวนำไฟฟ้า 1 และตัวนำไฟฟ้า 2 เมื่อสับสวิทช์ลงไป หรือปิดสวิทช์ อิเลกตรอนจะไหลผ่านตัวนำ จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบทุกๆส่วนของตัวนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกจึงได้แสดงให้เห็นสนามแม่เหล็กเพียงส่วนเดียว ซึ่งเกิดขึ้นตั้งฉากกับตัวนำไฟฟ้าทั้งสอง ถึงแม้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นในตัวนำทั้งสองพร้อมๆกัน แต่จะพิจารณาส่วนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า 1 และผลที่มีต่อตัวนำไฟฟ้า 2 ในขณะที่กระแสไฟฟ้าค่อยๆ เพิ่มขึ้น สนามแม่เหล็กจะขยายตัวออกจากตัวนำไฟฟ้า 1 ตัดกับส่วนของของตัวนำไฟฟ้า 2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า 2 แสดงให้เห็นด้วยลูกศรไข่ปลา ซึ่งจะเห็นว่ามันมีทิศทางตรงกันข้ามหรือขัดขวางกับกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์

ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ สามารถหาได้โดยการใช้ "กฎมือซ้ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า"(Leff Hand Rule For Generator) กฎอันนี้จะนำไปใช้กับส่วนหนึ่งของตัวนำไฟฟ้า 2 ซึ่งถูกยกขึ้นไปและขยายให้ชัดเจนขึ้นในส่วน (A) ของรูป 2-1 เมื่อใช้กฎนี้ หัวแม่มือของมือซ้ายจะชี้ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำไฟฟ้าผ่านสนามแม่เหล็ก (ในกรณีนี้ สนามแม่เหล็กกำลังเคลื่อนที่หรือกำลังขยายตัวออกไปในทิศทางหนึ่ง ซึ่งก็เหมือนกับว่าตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม) นิ้วชี้จะชี้ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก นิ้วกลางที่กางออกตามที่แสดงนั้น จะชี้บอกทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ในส่วน (B) เป็นส่วนเดิมของตัวนำไฟฟ้า 2 แต่เป็นตอนเปิดสวิทช์และฟลั๊กถูกตัด เมื่อนำกฎมือซ้ายมาใช้ในกรณีนี้ จะเห็นว่า เมื่อทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลั๊ก(Flux) เปลี่ยนไป จะทำให้ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปด้วย อย่างไรก็ตาม ข้อสำคัญที่ควรสังเกตก็คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัว จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งสองครั้ง ซึ่งมันจะหน่วงเหนี่ยวการไหลของกระแสไฟฟ้าในตอนแรก โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนของแบตเตอรี่ และหน่วงเหนี่ยวการลดของกระแสไฟฟ้าโดยทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศทางไปทางเดียวกันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่

รูป 2-1 การเหนี่ยวนำภายในตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-3 หน่วยของการเหนี่ยวนำ (Unit of Inductance)

หน่วยที่ใช้วัดค่าการเหนี่ยวนำ L คือ เฮนรี่(Henry) ซึ่งได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ(Inductor) ด้วยอัตรา 1 แอมป์ต่อวินาที แล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวขึ้น 1 โวลท์ ตัวเหนี่ยวนำนี้ จะมีค่าการเหนี่ยวนำ 1 เฮนรี่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การเหนี่ยวนำ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา แสดงให้เห็นโดยทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

e = Lx อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

หรือการเหนี่ยวนำภายในตัว (L) = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ / อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

หรือ $e = L\, di/dt$ (2-1)

เมื่อ e แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นโวลท์

L ค่าการเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ , h ,

di อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเป็นแอมแปร์ในเวลา dt วินาที

(d เป็นสัญญลักษณ์ที่หมายถึง "การเปลี่ยนใน_____")

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday' Law) เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ได้สรุปความจริงที่เกิดขึ้นไว้ 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 กล่าวว่า "เมื่อสนามแม่เหล็กที่คล้องกับวงจรเปลี่ยนแปลงค่าไป จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำไฟฟ้าเสมอ " หรือ

"เมื่อตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำไฟฟ้าเสมอ "

กฎข้อที่ 2 กล่าวไว้ว่า "จำนวนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น จะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก "

จากกฎข้อที่ 2 ของฟาราเดย์ แสดงให้เห็นโดยทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนสนามแม่เหล็กที่คล้องกับวงจร

หรือ $e = d\phi / dt$ (2-2)

เมื่อ e แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นโวลท์

$d\phi$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลั๊ก (Flux) เป็นเวเบอร์ ในเวลา dt วินาที

จากสมการ 2-1 จะได้

L = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ / อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

$L = e / di/dt$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการ 2-2 แทนค่า e จะได้

$$L = d\phi/dt \;/\; di/dt$$

นั่นคือ

จำนวนเฮนรี่ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก/อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

เพราะฉะนั้น $L = \phi/t \;/\; I/t$

$$= \phi/I \qquad (2\text{-}3)$$

เมื่อ ϕ สนามแม่เหล็ก (Flux) เป็นเวเบอร์ (Wb)

I กระแสไฟฟ้าเป็นแอมแปร์

ดังนั้น

เฮนรี่ = เวเบอร์ / แอมแปร์

เฮนรี่ (Henry) เป็นหน่วยใหญ่ที่ใช้วัดค่าการเหนี่ยวนำ(Inductance) ของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ขนาดใหญ่ หน่วยเล็กๆ ลงไปใช้เป็นมิลลิเฮนรี่ (Millihenry) mH และไมโคร-เฮนรี่ (Microhenry) μH

2-4 อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อการเหนี่ยวนำภายในตัว (Factors Affecting Self Inductance)

มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำภายในตัวของวงจร ตัวที่สำคัญตัวหนึ่ง คือ จำนวนของการคล้องระหว่างตัวนำไฟฟ้าทั้งหลายของวงจรกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของมัน ในตัวนำไฟฟ้าที่เป็นเส้นตรง จะมีการคล้องของสนามแม่เหล็กระหว่างส่วนหนึ่งของตัวนำไฟฟ้า กับส่วนอื่นๆนั้นน้อยมาก ดังนั้นการเหนี่ยวนำของมันจึงมีค่าน้อย ตัวนำไฟฟ้าจะมีการเหนี่ยวนำมากเมื่อนำมาพันเป็นขดลวด ดังแสดงในรูป 2-2 เพราะว่าการคล้องของสนามแม่เหล็ก ระหว่างตัวนำไฟฟ้าของรอบที่อยู่ประชิดกันในขดลวดจะคล้องได้มากที่สุด

รูปลักษณะของขดลวดก็จะมีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำของขดลวด ในรูป 2-2(A) เป็นตัวเหนี่ยวนำ อย่างเลวเมื่อเทียบกับตัวอื่นๆ เพราะว่ารอบของมันมีช่วงห่างมาก ดังนั้นจำนวนฟลักที่คล้องระหว่างขดลวดจะลดลง การเคลื่อนที่ของฟลักที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งแสดงโดยลูกศรไข่ปลา จะไม่คล้องตัวมันด้วย เพราะว่ามีขดลวดเพียงชั้นเดียว ขดลวดที่มีการเหนี่ยวนำมากอันหนึ่ง แสดงให้เห็นในรูป (B) จำนวนรอบทั้งหมดจะอยู่ชิดกันมาก และฟลักทั้งสองชั้นนี้จะคล้องซึ่งกันและกันด้วยจำนวนของฟลักเป็นจำนวนมาก ทั้งระหว่างการเคลื่อนที่ของฟลักข้างเคียงทั้งหมดด้วย จะเห็นว่ารอบที่อยู่ใกล้ๆกันทั้งหมด เช่น (a) จะอยู่ประชิดกับรอบอื่นถึง 4 รอบ (แรเงา) ดังนั้นมันจึงสามารถเพิ่มจำนวนฟลักที่คล้องให้มากขึ้นได้

ขดลวดที่มีการเหนี่ยวนำมากขึ้นไปอีกนั้น จะพันเป็น 3 ชั้น และมีแกนที่มีความแทรกซึมสูง ดังรูป 2-2 (C) การเพิ่มจำนวนชั้น (พื้นที่หน้าตัด) จะทำให้การคล้องของฟลักข้างเคียงดีขึ้น จะเห็นว่าในบางรอบเช่น (b) จะอยู่ประชิดกันกับรอบอื่นถึง 6 รอบ(แรเงา) คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็กจะทำให้จำนวนฟลักของขดลวดเพิ่มขึ้นเป็นหลายๆ เท่าของขดลวดแกนอากาศ ที่มีจำนวนรอบเท่าๆ กัน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ จะเห็นว่า ตัวประกอบเบื้องต้นในการบังคับการเหนี่ยวนำของขดลวดคือ (1) จำนวนรอบของขดลวดตัวนำไฟฟ้า (2) อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดต่อความยาว และ (3) ความแทรกซึมของวัสดุที่ใช้เป็นแกน จำนวนกระแสไฟฟ้าจะมีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำของขดลวดที่แกนของมันเป็นสารแม่เหล็ก และเมื่อแกนของมันเป็นอากาศ การเหนี่ยวนำของมันจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า

สูตรต่างๆ ที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าการเหนี่ยวนำ ภายในตัวเหนี่ยวนำนั้น สำหรับขดลวดตัวนำไฟฟ้าชั้นเดียว ซึ่งมีความยาวเป็น 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือมากกว่า จะใช้สูตรดังนี้คือ

$$L = 0.4\pi\mu N^2 A / 10^8 l \qquad (2\text{-}4)$$

เมื่อ L เป็นการเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี่ N เป็นจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด π เท่ากับ 3.14 μ เป็นความแทรกซึมของแกน (ถ้าสารที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก $\mu = 1$) A เป็นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเป็นตารางเซนติเมตร และ 1 เป็นความยาวของขดลวดเป็นเซนติเมตร ดังนั้นจะเห็นว่า การเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบของมันเพิ่มขึ้น และการเหนี่ยวนำของขดลวดจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่หน้าตัดของมันเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปโดยทำให้ขดลวดมีระยะสั้นมากๆ หรือความแทรกซึมของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น การเหนี่ยวนำก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ตัวอย่าง จงหาค่าการเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งยาว 20 ซ.ม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซ.ม. และแกนมีความแทรกซึม 200 มีจำนวนรอบทั้งหมด 200 รอบ

ดังนั้น

$$L = 0.4\pi * 200 * 200^2 * 0.7854 * 2^2 / 10 * 20 = 0.0158 \ H$$

นอกจากสูตรที่แสดงในสมการ (2-4) แล้ว ยังสามารถนำสมการ (2-3) มาพิสูจน์ได้อีก ถ้าหากว่าตัวนำไฟฟ้านำมาพันเป็นขดลวดมี N รอบ ดังนั้นจากสมการ (2-3) จะได้

$$L = N\phi / I \qquad (1)$$

$$\phi = BA$$

เพราะฉะนั้น $$L = BAN / I \qquad (2)$$

$$B = \mu H$$

เพราะฉะนั้น $$L = \mu HAN / I \qquad (3)$$

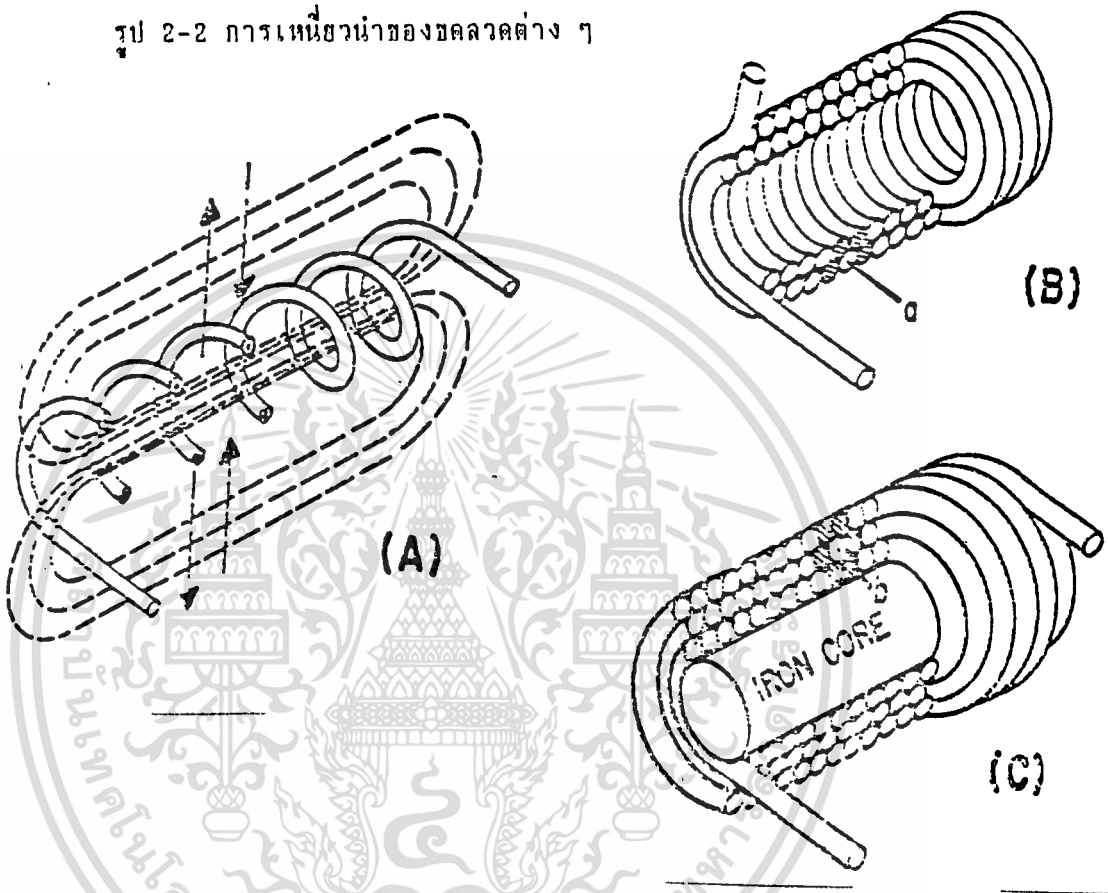
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H = NI / l$$

เพราะฉะนั้น $$L = \mu AN^2 / l \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อ L การเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ A พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเป็นตารางเมตร N เป็นจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด l ความยาวของขดลวดยาวเป็นเมตร

รูป 2-2 การเหนี่ยวนำของขดลวดต่าง ๆ



2-5 การเพิ่มและการลดของกระแสไฟฟ้าในวงจรอนุกรม R - L

(GROWTH AND DECAY OF CURRENT IN R-L SERIES CIRCUIT)

ถ้านำเอาการเหนี่ยวนำบริสุทธิ์ (Pure Inductance) ต่อเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจนถึงค่าสูงสุดของมัน ซึ่งหาค่าได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพราะว่าเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน(Counter emf) ขึ้น โดยการเหนี่ยวนำภายในตัวของขดลวด เมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นไหล จะทำให้สนามแม่เหล็กค่อยๆ ขยายตัวออก ตัดกับรอบของขดลวดตัวนำไฟฟ้า จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ การต่อต้านนี้จะทำให้เวลาที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า ถึงค่าสูงสุดของมันล่าช้าออกไป เมื่อปลดแบตเตอรี่ออก สนามแม่เหล็กจะยุบตัวตัดกับขดลวดตัวนำไฟฟ้าอีกและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น จะมีทิศทางที่พยายามยืดเวลาการไหลของกระแสไฟฟ้าให้มากออกไป

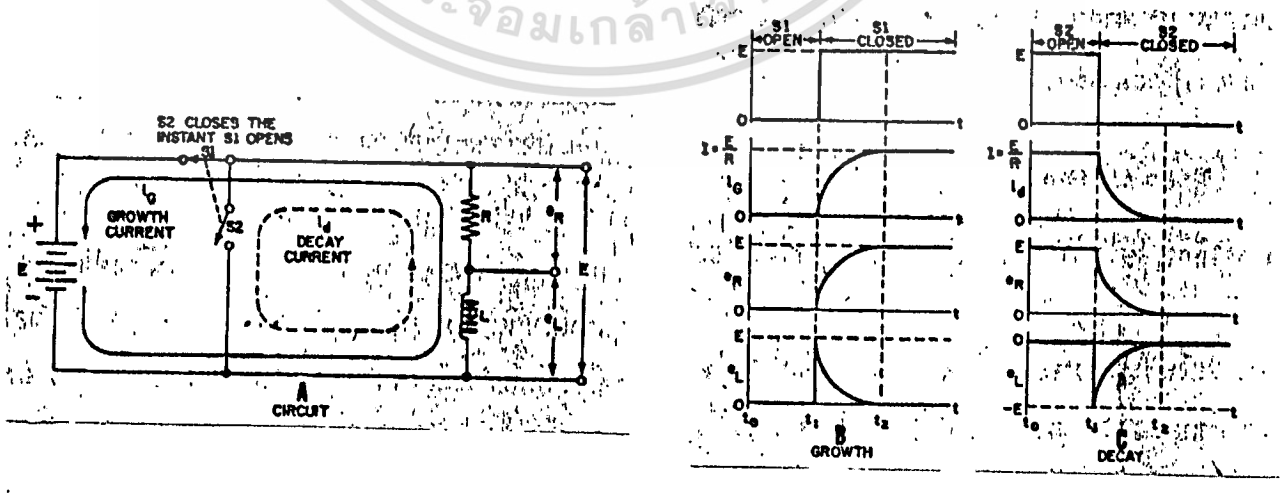
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรไฟฟ้าวงจรหนึ่งประกอบด้วยความต้านทาน และการเหนี่ยวนำต่อเข้าด้วยกันโดยมีสวิทช์พิเศษ ดังแสดงในรูป 2-3 (A) ซึ่งเป็นการต่อแบบอนุกรม และเรียกว่าวงจรอนุกรม R-L

ถ้าปิดสวิทช์ S1 (ดังแสดงในรูป [illegible]) แรงเคลื่อนไฟฟ้า E จะปรากฏอยู่ระหว่างวงจรจึงทำให้กระแสไฟฟ้าพยายามไหล แต่ตัวเหนี่วนำจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านไว้ ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านนี้จะมีค่าเท่ากับ E ในชั่วขณะตอนเริ่มต้นนั้น กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรไม่ได้ ในกรณีนี้ จึงไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกระหว่างความต้านทาน R ในรูป 2-3 (B) แสดงให้เห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดจะปรากฏอยู่ระหว่าง L และจะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าปรากฏอยู่ที่ R ในชั่วขณะที่ปิดสวิทช์ S1

เมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลผ่านไปได้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะค่อยๆ ปรากฏขึ้นที่ R คือ eR และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ที่ L คือ eL จะลดลงเป็นจำนวนเท่าๆ กัน เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง L ลดลง นั่นก็หมายความว่า การเพิ่มของกระแสไฟฟ้า ig กำลังเพิ่มขึ้น และเนื่องจากเหตุนี้ eR ก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ในรูป 2-3(B) แสดงให้เห็นว่า eL ในตอนสุดท้ายจะเป็นศูนย์ เมื่อ ig ไม่เพิ่มต่อไปอีก ซึ่งขณะนี้ eR จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ E เมื่อกระแสไฟฟ้าถึงค่าสูงสุดของมัน ภายใต้สภาพที่คงที่ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลง) ตัวต้านทาน (Resistor) จะเป็นตัวจำกัดค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจร

การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า(Electrical Inductance) ก็เหมือนกับแรงเฉื่อยทางกล(Mechanical Inertia)และการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าในวงจรการเหนี่ยวนำ ก็เหมือนกับอัตราเร่งของเรือบนผิวน้ำ เรือเริ่มต้นเคลื่อนที่ในชั่วขณะของแรงคงที่อันหนึ่งที่มันได้รับ ในชั่วขณะนี้อัตราเร่งของมันจะสูงมาก และแรงที่มันได้รับทั้งหมดก็จะใช้ เพื่อเอาชนะแรงเฉื่อยของเรือ ภายหลังจากความเร็วของเรือเพิ่มขึ้น(อัตราเร่งของมันจะลดลง)แรงทั้งหมดก็จะนำมาใช้เพื่อเอาชนะความฝืดของน้ำกับตัวเรือ เมื่อความเร็วของเรือได้ระดับอัตราเร่งของมันจะเป็นศูนย์ ที่ความเร็วนี้ แรงที่จ่ายให้จะเท่ากับแรงต้านทานของความฝืดและผลของแรงเฉื่อยก็จะหมดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
027836

รูป 2-3 การเพิ่มและการลดของกระแสไฟฟ้าในวงจรอนุกรม R-L

ขณะที่ปิดสวิทช์ของแบตเตอรี่ในวงจรอนุกรม R-L ในรูป 2-3 (A) อัตราการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าในวงจรการเหนี่ยวนำจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งในขณะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทั้งหมดจะถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากการ เหนี่ยวนำภายในตัว ซึ่งเกิดขึ้นมากที่สุด เพราะว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเท่ากับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวเหนี่ยวนำ ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทานจะเป็นศูนย์ เมื่อระยะเวลานานขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ส่วนมากจะไปปรากฏอยู่ที่ตัวต้านทาน และปรากฏระหว่างตัวเหนี่ยวนำน้อยลงไป เมื่ออัตราการเปลี่ยนของกระแสไฟฟ้ามีน้อย แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นน้อยด้วยและเมื่ออัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าคงที่แล้ว แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกระหว่างตัวเหนี่ยวนำจะเป็นศูนย์แรงเคลื่อนจากแบตเตอรี่ทั้งหมด จะถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะความต้านทานของวงจรเท่านั้น

ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน จะเปลี่ยนค่าไปในระหว่างช่วงเวลาของการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเหมือนกับแรงที่ใช้กับเรือ ซึ่งจะแยกตัวมันเองเป็นแรงเฉื่อย และผลของความฝืด ในตัวอย่างทั้งสองนี้ จะเห็นว่าแรงที่ใช้ไปในตอนแรกนั้น เพื่อเอาชนะแรงเฉื่อยจากผลของการเหนี่ยวนำและในตอนสุดท้าย เพื่อเอาชนะความฝืดจากผลของความต้านทานในวงจร

ถ้าปิดสวิทช์ S2 (ปลดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดออกไปจากวงจร) สนามแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นรอบๆ L ยุบตัวตัดกับขดลวด ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ eL ใน L ซึ่งมีขั้วตรงกันข้ามกับ E และมีขนาดเท่ากัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ eL จะเป็นเหตุทำให้กระแสไฟฟ้า id ไหลผ่าน R ในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเมื่อตอนเปิดสวิทช์ S1 แรงเคลื่อนไฟฟ้า eR ซึ่งเกิดขึ้นระหว่าง R ในตอนแรกนั้นมีค่าเท่ากับ E มันจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการยุบตัวของฟลักซ์ eL ระหว่าง L ลดลงเป็นศูนย์

2-6 เวลาคงที่ L / R (Time Constant)

เวลาที่ต้องการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นถึง 63% (ที่จริง 63.2%) ของค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด หรือลดลงถึง 37% (ที่จริง 36.8%) ของค่าต่ำสุด เรียกว่า "เวลาคงที่" ของวงจร การรับและการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจร R-L แสดงให้เห็นโดยกราฟ รูป 2-4 ค่าเวลาคงที่เป็นวินาทีจะเท่ากับการเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ หารด้วยความต้านทานของวงจรเป็นโอห์ม ซึ่งค่าต่างๆ แสดงไว้ในกราฟ รูป 2-4 L / R เป็นสัญญลักษณ์ที่นำมาใช้สำหรับค่าเวลาคงที่ในที่นี้

ความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่ง L/R เวลาคงที่จะเป็นไปตามนี้ คือ

L(เป็นเฮนรี่) / R(เป็นโอห์ม) = t (เป็นไมโครวินาที)

L(เป็นไมโครเฮนรี่) / R(เป็นโอห์ม) = t (เป็นไมโครวินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาคงที่ (Time Constant) อาจจะกำหนดเป็นเวลาที่ต้องการสำหรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในการเพิ่มหรือการลดถึงค่าตอนสุดท้ายของมัน เมื่อการเพิ่มหรือการลดมีต่อเนื่องกันไปตามอัตราตอนแรก ซึ่งจะเห็นได้ในรูป 2-4 (B) ความเอียงของเส้นสัมผัสเส้นไข่ปลา OX แสดงให้เห็นถึงอัตราตอนแรกของการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา ด้วยอัตราอันนี้ กระแสไฟฟ้าจะถึงค่าสูงสุดของมันในเวลา L/R วินาที ในทำนองเดียวกัน ความเอียงของเส้นสัมผัส เส้นไข่ปลา YZ แสดงอัตราตอนแรกของการลดของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา และการลดจะเป็นไปอย่างสมบูรณ์ในเวลา L/R วินาที

สมการลดลงการเพิ่มลงกระแสไฟฟ้า iL ผ่าน L คือ

$$iL = E / R * (1 - 1 / Rt/(2.718) L \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อ iL กระแสไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneouse current) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจร (ในกรณีนี้มีค่า 100 โวลท์) R ความต้านทาน เป็นโอห์ม t เป็นวินาที และ L ค่าการเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ ในรูป 2-4 (B) เป็นกราฟของสมการนี้

เมื่อ t = L/R เลขกำลัง (Exponent) Rt/L ในสมการ (2-6) จะลดลงเป็น 1 เพราะฉะนั้น 1/2.718 = 0.368 ดังนั้น

iL = E/R (1 - 0.368) = 0.632 E/R

หรืออาจจะกล่าวได้ว่า เมื่อ t = L/R , iL จะเท่ากับ 63.2% ของอัตราส่วน E/R ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเป็น 10 แอมแปร์ (E = 100 และ R = 10) กระแสไฟฟ้าผ่าน L จะเพิ่มถึง 6.32 แอมแปร์ ในเวลา L/R = 10/10 หรือ 1 วินาที

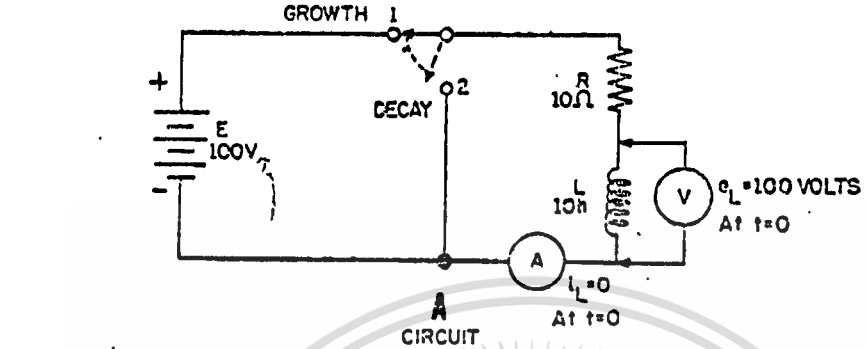
สมการสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ eL จะเป็นไปตามการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า คือ

$$eL = E (1 / Rt/(2.718) L \qquad (2\text{-}7)$$

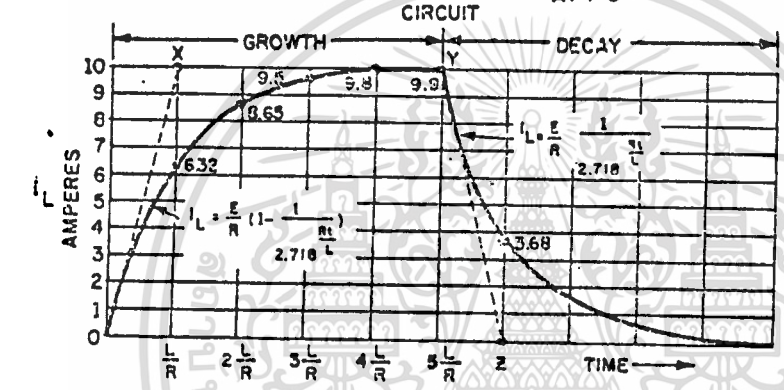
กราฟของสมการนี้ได้แสดงในรูป 2-4 (B) ด้วย เมื่อ t = L/R, eL = 0.368 E นั่นคือ eL = 0.368 x 100 = 36.8 โวลท์

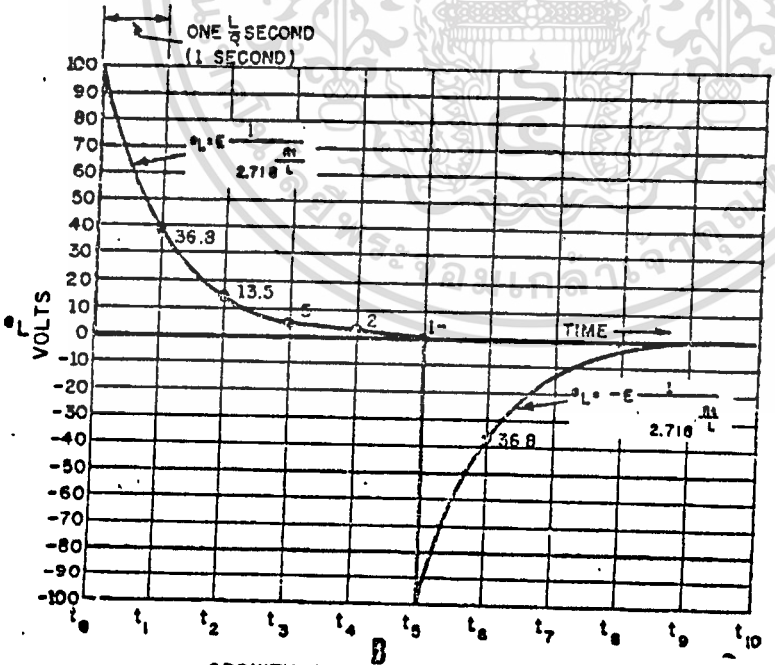
รูป 2-4 เวลาคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A
CIRCUIT





B
GROWTH AND DECAY GRAPHS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-7 การเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

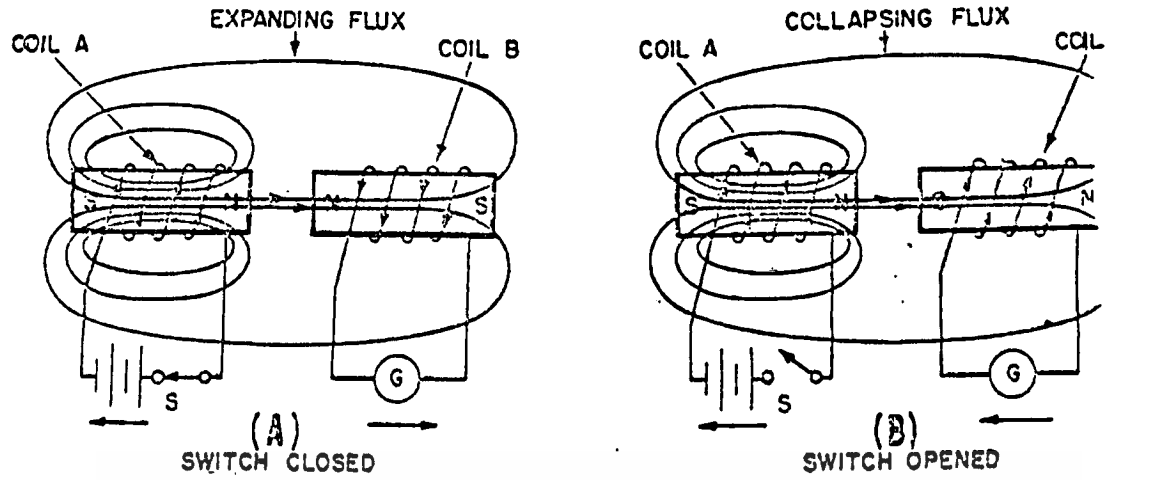
เมื่อขดลวดสองชุดนำมาวางใกล้ๆ กัน โดยทำให้ฟลักของขดลวดชุดที่หนึ่งคล้องกับรอบทั้งหมดของขดลวดชุดที่สอง ถ้าฟลักในขดลวดชุดที่หนึ่งเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดชุดที่สอง นี้แสดงว่าขดลวดทั้งสองชุดมีการเหนี่ยวนำร่วมกัน (Mutual Inductance) จำนวนของการเหนี่ยวนำร่วมกันนี้ จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขดลวดทั้งสองชุด ถ้าขดลวดทั้งสองชุดวางห่างกันมาก ฟลัก (Flux) ที่คล้องกับขดลวดทั้งสองจะมีค่าน้อย การเหนี่ยวนำร่วมกันก็จะมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าขดลวดทั้งสองชุดวางใกล้กันมากหรือทับกัน จำนวนสนามแม่เหล็กทั้งหมดของขดลวดชุดหนึ่งสามารถคล้องจำนวนรอบของชุดที่สองได้หมด จะทำให้การเหนี่ยวนำร่วมกันมีค่าสูง และการเหนี่ยวนำร่วมกันจะมีค่าสูงมากขึ้น ถ้าขดลวดทั้งสองชุดพันรอบแกนเหล็กอันเดียวกัน

เมื่อขดลวดทั้งสองชุดนำมาวางใกล้ๆ กัน โดยแกนของมันอยู่ในแนวเดียวกัน ดังรูป 2-5 ขดลวดชุด A ต่อเข้ากับแบตเตอรี่โดยมีสวิทช์ S ต่ออยู่ด้วย และขดลวดชุด B ต่อเข้ากับแกลวานอมิเตอร์ (Gavanometer) G เมื่อเป็นสวิทช์ S (รูป 2-5 (A)) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดชุด A จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และจะไปคล้องกับขดลวดชุด B เป็นเหตุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นและไหลผ่านแกลวานอมิเตอร์ จึงทำให้เข็มของมันเบนไป เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดชุด A ถึงค่าคงที่ของมัน เข็มของแกลวานอมิเตอร์จะกลับไปอยู่ศูนย์ และเมื่อต่อสวิทช์ (รูป (2-5 B)) เข็มของแกลวานอมิเตอร์จะเบนไปอีกทิศทางหนึ่ง นั่นแสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด B และมีทิศทางตรงกันข้ามกับในตอนแรก การไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด B นี้ เนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด B ซึ่งเกิดขึ้นจากฟลักในขดลวด A ขยายตัวและยุบตัวตัดกับขดลวด B

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด A ฟลักที่เกิดขึ้นในขดลวด A จะมีขั้วเหนือใกล้ๆ กับขดลวด-B ฟลักบางส่วนจะกระจายจากทางซ้ายไปทางขวา ตัดกับจำนวนของขดลวดชุด B ซึ่งฟลักจำนวนนี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าในขดลวดชุด B มีทิศทางขัดขวางต่อการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าและฟลักในขดลวดชุด A ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในขดลวดชุด B จึงพยายามสร้างขั้วเหนือขึ้นใกล้ๆ กับขดลวดชุด A (ขั้วชนิดเดียวกันผลักกัน)

เมื่อเปิดสวิทช์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดชุด A จะยุบตัว การยุบตัวของสนามแม่เหล็กจะตัดกับขดลวดชุด B ในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนปิดสวิทช์ จึงทำให้เกิดขั้วใต้ใกล้ๆ กับขดลวดชุด B - (ขั้วต่างชนิดกันจะดูดกัน) ขั้วแม่เหล็กนี้จะช่วยเพิ่มอำนาจแม่เหล็กให้ขดลวดชุด A ซึ่งพยายามป้องกันการยุบตัวของสนามแม่เหล็กของมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2-5 การเหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน

2-8 อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อการเหนี่ยวนำร่วมกัน

(Factors affecting mutual Inductance)

การเหนี่ยวนำร่วมกันของขดลวดทั้งสองชุดที่อยู่ใกล้กันจะขึ้นอยู่กับ (1) ขนาดของรูปร่างของขดลวดทั้งสองชุด (2) จำนวนรอบของขดลวดแต่ละชุด (3) ระยะห่างของขดลวดทั้งสอง (4) ตำแหน่งแนวแกนของขดลวดทั้งสองชุด และ (5) ความแทรกซึมของแกน

ถ้าขดลวดทั้งสองชุดวางไว้ในตำแหน่งที่ฟลักซ์ทั้งหมดของขดลวดชุดที่ 1 คัดกับจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดชุดที่ 2 ค่าการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันหาได้จาก

$$M = 0.4\pi\mu AN1\ N2 / 10^{8}\ l \qquad (2\text{-}8)$$

เมื่อ M การเหนี่ยวนำร่วมกันของขดลวดทั้งสองชุดเป็นเฮนรี่, N1 และ N2 เป็นจำนวนรอบของขดลวดของชุดที่ 1 และที่ 2, A เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเป็นตารางเซนติเมตร, μ เป็นความแทรกซึมของแกน และ 1 เป็นความยาวของแกนเป็นเซนติเมตร

ถ้าขดลวดทั้งสองชุดวางไว้ให้ชิดกันมากจนกระทั่งสนามแม่เหล็กในขดลวดชุดที่ 1 คัดกับขดลวดชุดที่ 2 ได้ทั้งหมดแล้ว ขดลวดทั้งสองชุดนี้จะมี"สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันเป็นหนึ่ง"(Unity Coefficient of Coupling) ถ้าจำนวนฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในขดลวดชุดที่ 1 ทั้งหมดคัดกับขดลวดชุดที่ 2 ได้เพียง - ครึ่งเดียว สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันจะเป็น 0.5 สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันใช้แทนด้วย K สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันจะเท่ากับจำนวนร้อยละของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดชุดหนึ่งที่คัดกับขดลวดชุดอื่น ตามปกติแล้วค่าจะมีค่าไม่ถึง 1 แต่มันจะใกล้เคียงค่าหนึ่งมากที่สุดในแกนหม้อแปลงแบบเชลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้

การเหนี่ยวนำร่วมกันระหว่างขดลวดสองชุด คือ L1 และ L2 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของการเหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละชุด และสัมประสิทธิ์ของการร่วมกัน K ได้ดังนี้

$$M = K\sqrt{L1L2} \qquad (2\text{-}9)$$

เมื่อ M เป็นหน่วยเดียวกันกับการเหนี่ยวนำของ L1 และ L2

2-9 ตัวเหนี่ยวนำที่ไม่มีสนามแม่เหล็กร่วมกัน ต่อกันแบบอนุกรม

(Series Inductors Without Magnetic Coupling)

เมื่อตัวเหนี่ยวนำถูกป้องกันไว้อย่างดี หรือวางให้ห่างมากพอ ที่จะไม่ทำให้เกิดผลทางการ - เหนี่ยวนำร่วมกัน การเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจะรวมเข้าด้วยกันเหมือนกับความต้านทานของตัวต้าน-ทาน นั่นคือ

$$Lt = L1 + L2 + L3 + - - + Ln \qquad (2\text{-}10)$$

เมื่อ Lt เป็นค่าการเหนี่ยวนำทั้งหมด L1,L2,L3 เป็นค่าการเหนี่ยวนำของ L1,L2,L3 และ Ln หมายถึงจำนวนตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ทั้งหมด

2-10 ตัวเหนี่ยวนำที่มีสนามแม่เหล็กร่วมกัน ต่อแบบอนุกรม

(Series Inductors With Magnetic Coupling)

ตัวเหนี่ยวนำสองตัวต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน และได้จัดวางให้สนามแม่เหล็กจากตัวที่หนึ่งไปคล้องกับตัวที่สอง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำร่วมกันขึ้น ซึ่งค่าเหนี่ยวนำทั้งหมดหาได้จาก

$$Lt = L1 + L2 + 2M \qquad (2\text{-}11)$$

เมื่อ Lt เป็นค่าการเหนี่ยวนำทั้งหมด L1,L2 เป็นค่าการเหนี่ยวนำภายในตัวของ L1 และ L2 ตามลำดับ และ M เป็นค่าการเหนี่ยวนำร่วมกันระหว่างตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง เครื่องหมายบวก จะใช้กับ M เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำทั้งสองเสริมกัน และเครื่องหมายลบจะใช้เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กลบล้างกัน ตัวประกอบ 2 ที่ใส่เข้าไปเป็นอิทธิพลของ L1 ต่อ L2 และ L2 ต่อ L1

ถ้าขดลวดถูกจัดให้ชุดหนึ่งหมุนไปได้ จะทำให้สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันเปลี่ยนแปลงไป ค่าการเหนี่ยวนำของขดลวดทั้งสองชุดจะเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นการเหนี่ยวนำร่วมทั้งหมดก็จะเปลี่ยนไปเท่ากับ 4 M

2-11 ตัวเหนี่ยวนำที่ไม่มีอำนาจแม่เหล็กร่วมกัน ต่อแบบขนาน

(Parallel Inductors Without Magnetic Coupling)

ค่าการเหนี่ยวนำทั้งหมด Lt ของตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานกัน หาได้โดยการคำนวณเหมือนกับความต้านทานของตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน ดังนั้น

$$1/Lt = 1/L1 + 1/L2 + 1/L3 + -- + 1/Ln \qquad (2\text{-}12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L1,L2 และ L3 เป็นค่าการเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L1,L2 และ L3 และ Ln หมายถึง จำนวนตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ทั้งหมด

2-12 ผลของการเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้า

(EFFECTS OF INDUCTANCE IN AN ELECTRIC CIRCUIT)

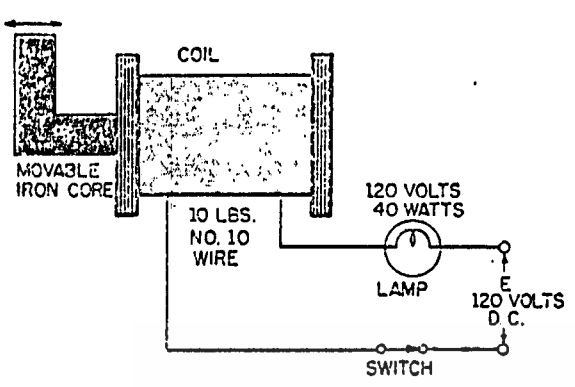
ปฏิกิริยาของตัวเหนี่ยวนำต่อการเปลี่ยนของฟลักซ์

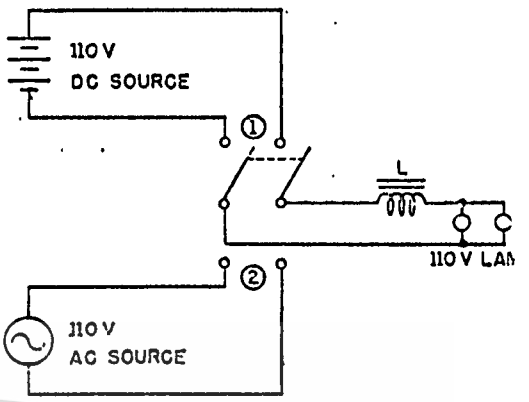
(Reaction of Inductor to Flux change)

ตราบจนกระทั่งถึงตอนนี้ ได้พิจารณาแล้วว่า ตัวเหนี่ยวนำชนิดพิเศษ จะควบคุมผลของการเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้าในแต่ละกรณี เช่น เวลาที่ต้องการในการเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าในวงจรดังรูป 2-3 จะพิจารณาถึงคุณสมบัติภายในของตัวเหนี่ยวนำ L กล่าวคือ อัตราส่วนของการเหนี่ยวนำของมันต่อความต้านทานของมันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภายใน หรืออัตราตามธรรมชาติ รูปร่างของเส้นโค้ง L/R ของตัวเหนี่ยวนำชนิดพิเศษ จะมีลักษณะเหมือนเดิม นั่นคือ มันแสดงการขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ตามธรรมชาติแบบเดิมของมัน อย่างไรก็ตาม ในตอนนี้จะชี้ให้เห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำสามารถแสดงความต้านทานของมันออกมาได้หลายขั้น ซึ่งกรณีนี้จะทำได้โดยใช้อำนาจภายนอกไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ที่คล้องตัวเหนี่ยวนำ การเปลี่ยนแปลงต่างๆเหล่านี้ เช่นการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่จ่ายให้ ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นในอัตราที่พร้อมกับอัตราภายในของตัวเหนี่ยวนำ เมื่ออำนาจภายนอกมาทำให้การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่ามากกว่าที่ฟลักซ์เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ นั่นคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวของตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับอัตราของเวลาที่ฟลักซ์คล้องมันเปลี่ยนแปลงไป

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ เทียบกับเวลาซึ่งแสดงให้เห็นโดยอาศัยเครื่องมืออย่างง่าย ๆ ดังรูป 2-6 เมื่อปิดสวิทช์ กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจนถึงค่าสูงสุด และหลอดไฟฟ้าจะสว่างไปตามปกติของมัน ถ้านำแกนเหล็กใส่เข้าไปภายในขดลวดอย่างรวดเร็ว ฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (เพราะว่าเพิ่มการเหนี่ยวนำให้กับขดลวด) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขัดขวางกับแรงเคลื่อนของแหล่งกำเนิด ซึ่งไปตามกฎของเลนซ์ ดันนั้น จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดไฟฟ้าได้น้อยลง และมันจะหรี่ลงชั่วขณะหนึ่ง ถ้าดึงแกนเหล็กออกจากขดลวดอย่างรวดเร็ว ฟลักซ์บางส่วนที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวดจะยุบตัวตัดกับขดลวด ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะพยายามขัดขวางต่อการลดของฟลักซ์ (เป็นไปตามกฎของเลนซ์) ซึ่งมันจะมีทิศทางเสริมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด กระแสไฟฟ้าในขดลวดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้หลอดไฟฟ้าสว่างขึ้นชั่วขณะหนึ่ง ถ้าการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กยิ่งเร็วมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ต่อหน่วยเวลา ก็ยิ่งมากขึ้น และผลของหลอดก็ยิ่งจะปรากฏชัดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ หรือนำไปหาประโยชน์ในเชิงการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ทั้งนี้ต้องขออนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนก่อนการนำไปใช้ในทุกรูปแบบ





รูป 2-6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัว รูป 2-7 ผลของการเหนี่ยวนำในวงจร D.C. และ A.C. ที่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์

2-13 ผลของการเหนี่ยวนำในวงจร เอ.-ซี.
(Effects of Inductance In an A-C circuit)

เมื่อวงจรที่ประกอบด้วยขดลวดได้รับแรงกระตุ้นจากไฟฟ้ากระแสตรง ผลของขดลวดที่มีต่อวงจรจะปรากฏขึ้นเฉพาะในตอนที่วงจรได้รับแรงกระตุ้น หรือในตอนปลดแรงกระตุ้นออกเท่านั้น เช่น เมื่อสวิทช์ในรูป 2-7 อยู่ที่ตำแหน่ง (1) การเหนี่ยวนำของขดลวด L จะเป็นเหตุให้หลอดสว่างช้าไป หลังจากที่หลอดไฟฟ้าสว่างเต็มที่ตามปกติของมันแล้ว การเหนี่ยวนำก็จะไม่มีผลอะไรต่อวงจรตราบเท่าที่สวิทช์ยังปิดอยู่ เมื่อเปิดสวิทช์ จะมีประกายไฟฟ้า (Electric Spark) เกิดขึ้นระหว่างปุ่มสัมผัสของสวิทช์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้เกิดประกายไฟ (Spark) นั้น เนื่องมาจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กตัดกับขดลวดของตัวนำไฟฟ้า

เมื่อวงจรการเหนี่ยวนำได้รับแรงกระตุ้นจากไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current) ผลของตัวเหนี่ยวนำจะมีต่อเนื่องกันไปในวงจร และจะมีค่ามากกว่าเมื่อได้รับแรงกระตุ้นจากไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรมีค่าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรเนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าน้อยกว่าไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้จากวงจรของรูป 2-7 เมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลในขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับ (Alternating magnetic field) ขึ้นพร้อม ๆ

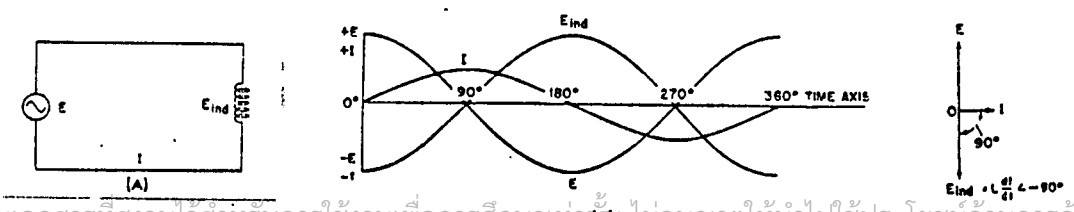
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน รอบ ๆขดลวดสนามแม่เหล็กสลับนี้ และจะตัดกับรอบทั้งหลายของขดลวด กิริยาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดนี้ จะขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเสมอ เมื่อสวิทช์อยู่ที่ตำแหน่ง (1) หลอดไฟฟ้าจะมีความสว่างเนื่องมาจากไฟฟ้ากระแสตรงแต่เมื่อสวิทช์ไปอยู่ตำแหน่งที่ (2) แม้ว่าค่าที่วัดได้ (Effective Value) แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้จะมีค่าเท่ากับของไฟฟ้ากระแสตรง หลอดไฟฟ้าก็จะหรี่ เพราะการขัดขวางที่เกิดขึ้นระหว่างการเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้เป็นส่วนมากจะไปปรากฏอยู่ที่ L จะเหลืออยู่ที่หลอดไฟฟ้าเพียงส่วนน้อยเท่านั้น

2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า

(Relation Between Induced voltage and cuurent)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงใด ๆของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ไม่ว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะเป็นเหตุให้ฟลั๊กรอบ ๆ ขดลวดเปลี่ยนแปลงไปด้วย รูป 2-8 (A) ถ้ากระแสไฟฟ้าในวงจรเปลี่ยนแปลงค่าไปตามลักษณะของไซน์ (Sinusoidal) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างเป็นรูปคลื่นของไซน์ (Sine Wave) ด้วย เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจะมีอัตราสูงมากที่สุด ขณะที่มันกำลังเคลื่อนที่ผ่านศูนย์กลางของมันที่ตำแหน่ง 0 ° ,180 ° และ 360 ° ตามรูป 2-8 (B) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของฟลั๊กจะมีค่ามากที่สุดตามเวลาต่าง ๆ เหล่านั้น เนื่องจากสาเหตุที่กล่าวนี้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในขดลวดจะมีค่ามากที่สุด ตามช่วงเวลาเหล่านี้ ตามกฎของเลนซ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีทิศทางตรงกันข้าม หรือขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเสมอ ดังนั้นเมื่อกระแสไฟฟ้ากำลังเพิ่มไปในทิศทางบวกที่ 0 ° แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีขั้วไฟฟ้าตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย และขัดขวางต่อการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า ต่อไปเมื่อกระแสไฟฟ้ากกำลังลดลงไปสู่ศูนย์ของมันที่ 180 ° แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีขั้วเหมือนกันกับกระแสไฟฟ้า และจะพยายามรักษาค่ากระแสไฟฟ้าไม่ให้ลดลง ดังนั้นจะเห็นว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงค่าล้าหลังกระแสไฟฟ้า 90 ° แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ E จะมากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_{IND} เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานของขดลวด รูปของเวกเตอร์ (Vector Diagram) ซึ่งใช้แสดงให้เห็นถึงทิศทางตรงกันข้ามระหว่าง E กับ E_{IND} นั้น แสดงไว้ในรูป 2-8 (C)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม 90 ° และเปลี่ยนแปลงก่อนหรือน่าหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมุม 90 ° แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงมีขั้วตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จ่ายให้แก่วงจรเสมอ จึงเรียกได้ว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน" (Counter e.m.f)หรือ "แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ" (Back e.m.f) ทั้งนี้เพราะว่ามันขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ผลของการเหนี่ยวนำที่มีต่อวงจรไฟฟ้าสลับ

2-15 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว (Alternating Current Circuit Containing Only Inductance)

การเหนี่ยวนำจะพยายามขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงใด ๆของกระแสไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้าในวงจรการเหนี่ยวนำเริ่มต้นเพิ่มค่าขึ้นไป แรงเคลื่อนไฟฟ้าของการเหนี่ยวนำภายในตัวจะขัดขวางต่อการเพิ่มอันนี้ จึงเป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้าค่อย ๆเพิ่มขึ้นไปทีละน้อยจนกว่าจะถึงค่าสูงสุดของมัน ในทำนองเดียวกันเมื่อกระแสไฟฟ้าในวงจรการเหนี่ยวนำลดค่าลงไป การเหนี่ยวนำก็จะพยายามขัดขวางต่อการลดอันนี้

ถ้าความแทรกซึม (Permeability) ของวงจรแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ในวงจรมีค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced voltage) จะมีค่าเป็น

$$Eav = L\ I/t \qquad 2\text{-}13$$

เมื่อ Lเป็นสัมประสิทธิ์ของการเหนี่ยวนำภายในตัวมีหน่วยเป็นเฮนรี่ (H) การเหนี่ยวนำภายในตัว (Self-inductance) จะมีค่า 1 H เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น 1 A/Sec แล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับขึ้น 1 โวลท์ หรือ กำหนดเป็นอีกอย่าง คือถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจร 1 แอมแปร์ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น 10^8 เส้น ในสมการ 2-12 นั้น Eav เป็นค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นโวลท์ I กระแสไฟฟ้าเป็นแอมแปร์และ t เวลาเป็นวินาที

ในสมการ 2-12 นั้นหมายถึงการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าไปเป็น I แอมแปร์ในเวลา t วินาที หรือเขียนค่าชั่วขณะได้ดังนี้ คือ

$$e = L * \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า}$$

$$e = L\ di/dt$$

เมื่อ di เป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา dt โดยกำหนดให้ dt เกิดขึ้นได้น้อยมากจนกระทั่ง di/dt คงที่ในชั่วเวลานั้น ๆ

ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ จะเห็นว่าเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า เมื่อสัมประสิทธิ์ของการเหนี่ยวนำภายในตัว (Coefficeint of Self-induction) มีค่าคงที่ ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว ตามที่กล่าวมานั้นเป็นการสมมติอย่างหนึ่งทั้งนี้เพราะว่า ตัวนำอย่างง่าย ๆ หรืออุปกรณ์ที่มีการเหนี่ยวนำจะประกอบขึ้นจากขดลวด ดังนั้นมัน

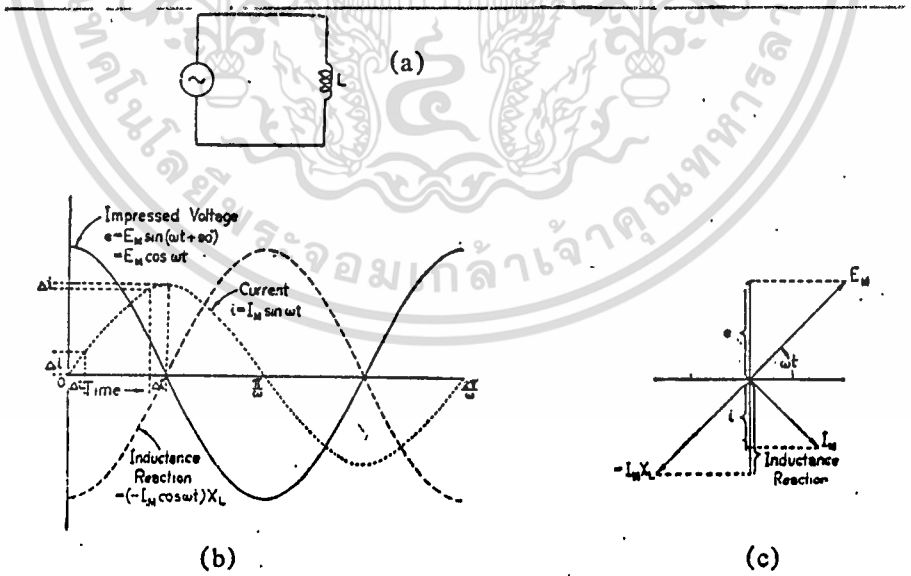
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รวมถึงการนำไปดัดแปลงเพื่อการค้า

จึงต้องมีความต้านทาน (Resistance) อยู่ด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามหลักทฤษฎีแล้ว ความต้านทานของขดลวดก็สามารถละทิ้งไปได้ ดังนั้นจึงพิจารณาเพียงผลของการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว

เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบ Sine wave ให้กับ inductor ตัวหนึ่งมันจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ทุก ๆชั่วขณะ จึงทำให้เกิดการสมดุลย์ขึ้น

รูปร่าง (Shape) ขนาด (Magnitude) และตำแหน่ง (Position) หรือเฟส (Phase) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับจะเท่ากับและตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้เสมอ นั่นก็คือเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ จึงมีรูปร่างเป็นแบบไซน์ (Sinusoidal form)ดังแสดงในรูป 2-9 b

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจึงอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีรูปร่างและขนาดตามความต้องการ นั่นคือกระแสไฟฟ้าจะปรับตัวของมันเองให้เหมาะกับความต้องการของวงจร เพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเกิดขึ้นได้สมดุลย์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร



รูป 2-9 รูป curve และ vectorของวงจรที่มีแต่การเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว กระแสไฟฟ้าจะล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม 90 °

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยงนำนั้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ถ้าค่าการเหนี่ยวนำ (L) คงที่ ดังนั้นเมื่อพิจารณาดู sinecurveของกระแสไฟฟ้าในรูป 2-9 b เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าก็พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้ากำลังผ่านค่าศูนย์ของมันนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดนั่นคือที่มุม 0 °, 180 °,และ 360 ° ของcycle ดังนั้นในตำแหน่งเหล่านี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Voltage Reaction) จึงมีค่ามากที่สุดดังแสดงให้เห็นโดยcurveเส้นไข่ปลาในรูป 2-9 b และเมื่อกระแสไฟฟ้ากำลังผ่านค่าสูงสุดของมันนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมันจะมีค่าน้อยที่สุดจนถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย นั่นคือที่มุม 90 °, และ 270 ° ของ cycle ดังนั้น ณ ตำแหน่งเหล่านี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวจึงมีค่าเป็นศูนย์ ดัง curveเส้นไข่ปลาในรูป 2-9 b เมื่อได้พิจารณาดูcurveของกระแสไฟฟ้ากับcurveของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ก็จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้านำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเป็นมุม 90 ° จากกฎของLen'sแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองจึงต่างเฟสกันเป็นมุม 180 ° นั่นคือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้นำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ 180 ° ไฟฟ้า ดังรูปที่ 2-9 b ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม 90 ° หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้านำหน้ากระแสไฟฟ้าเป็นมุม 90 ° ดังรูป 2-9 b ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในวงจรสามารถแสดงแทนได้ โดยใช้สมการชั่วขณะนั่นคือ

$$\text{เมื่อ } i = Im \sin \omega t \qquad 2\text{-}14$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } e = Em \sin(\omega t + 90^\circ) = Em \cos \omega t \qquad 2\text{-}15$$

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า จากรูปcurveของกระแสไฟฟ้ารูป 2-3 b จะเห็นว่าในหนึ่งcycle กระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนค่าจากศูนย์จนถึงค่าสูงสุดหรือจากค่าสูงสุดจนถึงค่าศูนย์ถึงสี่ครั้ง หรือในแต่ละ 1/4 ของ cycle ด้วยกัน เวลาที่ใช้ไปภายใน 1/4 ของ cycleจะเท่ากับ 1/4 f วินาที ดังนั้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจาก 0 จนถึง Im หรือจาก Im ลงไปเป็น 0 ภายในเวลา 1/4 ของ cycle จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราการเปลี่ยนแปลงของมันเป็น Im / 1/4f = 4 fIm Ampere/second ดังนั้นค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวจะเป็น

$$Eav = L * I/t$$

$$\text{แต่ } I/t = 4\,fIm$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } Eva = 4\,fLIm \qquad 2\text{-}16$$

ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Em = Eav / 2 = 4\pi fLIm / 2/\pi = 2\pi fLIm \qquad 2\text{-}17$$

ดังนั้น

$$Em/Im = 2\pi fL \qquad 2\text{-}18$$

หรือ

$$E/I = 2\pi fL \qquad 2\text{-}19$$

เนื่องจาก E/I นั้นมีหน่วยเป็น ohm ดังนั้น $2\pi fL$ ก็มีหน่วยเป็น ohm ด้วยและเรียกว่า "ความต้านทานเนื่องจากการเหนี่ยวนำ" (Inductive reactance) ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับใช้ X_L เป็นสัญญลักษณ์ ดังนั้น

$$X_L = 2\pi fL$$

หรือ

$$X_L = E / I \qquad 2\text{-}20$$

ในรูป vector 2-9 c ที่ใช้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นว่าแรงเคลื่อนต้านกลับ (ImX_L) เขียนห่างออกไปจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ (Em) เป็นมุม 180 ° และเขียนค่ากระแสไฟฟ้าล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม 90 °

2-16 กำลังไฟฟ้าในวงจรที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว (Power in circuit containin only inductance)

รูป curve ของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะของวงจรที่มีการเหนี่ยวนำอย่างเดียวนั้น ได้จากการนำค่าผลคูณของค่าชั่วขณะ ของกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาเขียน ถ้าสมการของกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็น $i = Im \sin \omega t$ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น $e = Em \sin (\omega t + 90°) = Em \cos \omega t$ กำลังไฟฟ้าชั่วขณะจะมีค่าเป็น

$$P = ei$$

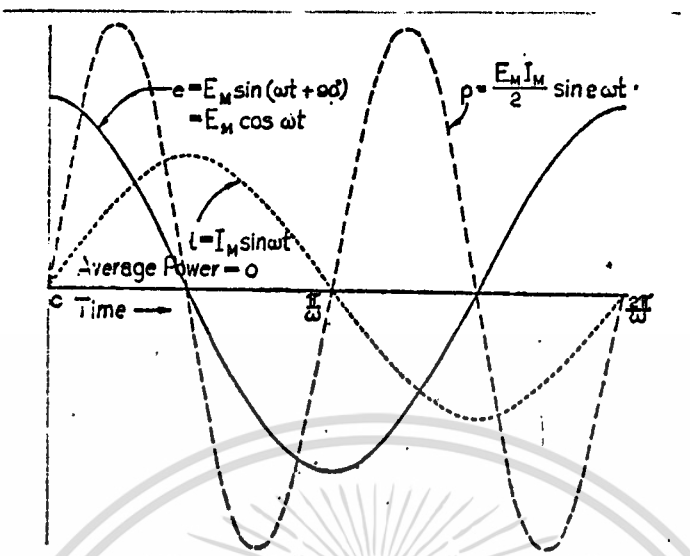
$$= Em \cos \omega t \; Im \sin \omega t$$

$$= Em \; Im \; (\sin t \cos \omega t)$$

$$= Em \; Im / 2 \; \sin 2\omega t \qquad 2\text{-}20$$

ในรูป 2-10 curve เส้นเต็มนั้นเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร curve เส้นไข่ปลาเป็นกระแสไฟฟ้า(ล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้า 90°) และ curve เส้นขาดเป็นกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ ซึ่งจะเห็นว่ามันมีความถี่เป็นสองเท่า โดยมีค่าบวกและค่าลบเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2-10 curve ของกำลังไฟฟ้าในวงจรที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวนั้น ค่าด้านบนและด้านล่างของแกนจะเท่ากัน นั่นแสดงว่าค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าในวงจรเช่นนี้เท่ากับศูนย์ ส่วนที่เป็นบวกแสดงว่าวงจรเก็บพลังงานเอาไว้ ส่วนที่เป็นลบแสดงว่าวงจรจ่ายพลังงานกลับคืนไปยังแหล่งกำเนิด

เมื่อกระแสไฟฟ้าในวงจรที่มีก่รเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น จะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะแสดงถึงพลังงานที่เก็บเอาไว้ ดังนั้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น วงจรไฟฟ้าอันนี้ก็จะเก็บพลังงานเอาไว้โดยการรับมาจากแหล่งกำเนิด กำลังไฟฟ้าที่วงจรได้รับจากแหล่งกำเนิดจะให้เป็นบวกเสมอ ในระหว่างช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้ากำลังลดลง สนามแม่เหล็กจะยุบตัว และพลังงานที่มันเก็บไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กจะถูกจ่ายกลับคืนไปยังแหล่งกำเนิดเมื่อวงจรจ่ายพลังงานกลับคืนแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายออกไปนั้นจะกำหนดให้เป็นลบ พลังงานที่สะสมไว้ในการเหนี่ยวนำจะหาค่าได้จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า กับค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นั่นคือ ถ้ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากค่าศูนย์จนถึงค่าที่สูงสุด I ของมันแล้วค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าจะเป็น I/2 ถ้า L เป็นค่าการเหนี่ยวนำของวงจร ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $e = LI / t$ เมื่อ t เป็นเวลาในการเปลี่ยนจาก 0 จนถึง I

ค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้า = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ * ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า

$= L * I/t * I/2 = LI^2 / 2t$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น พลังงานไฟฟ้า = กำลังไฟฟ้า * เวลา

เพราะฉะนั้น พลังงานที่สะสมไว้ = $LI^2/2$ จูล (Joule)

$$W = LI^2/2 \qquad 2\text{-}21$$

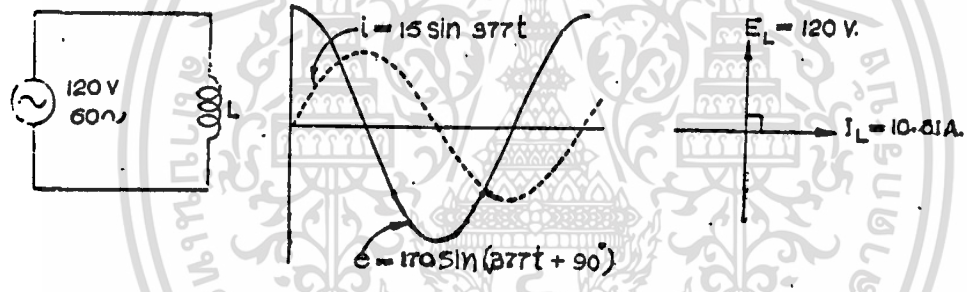
เมื่อ L เป็นเฮนรี่ I เป็นแอมแปร์

เมื่อหาก่าลังไฟฟ้าเฉลี่ยของสมการ (2-20) คือ $P = E_m I_m/2 \sin 2\omega t$ ตลอด cycle จะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือค่านวณได้จาก

$$P = EI \cos \theta$$

$$= EI \cos 90^\circ$$

$$= 0 \quad \text{WATT}$$



รูปที่ 2-11 วงจรที่มีการเหนี่ยวน่าอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การประจุ
(CAPACITANCE)

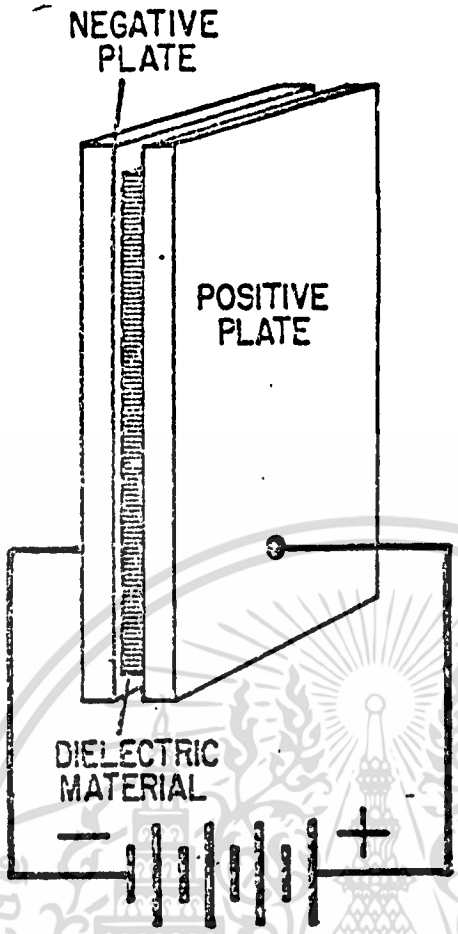
3-1 การประจุ (Capacitance)

การประจุ (Capacitance) เป็นคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งมันพยายามต่อต้านหรือขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร นั่นคือ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มันเพิ่มขึ้น การประจุจะขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ และจะพยายามหน่วงเหนี่ยวการเพิ่มของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรให้เป็นไปอย่างช้า ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มันลดลง การประจุจะพยายามรักษาค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มันได้รับในตอนสุดท้ายเอาไว้ ดังนั้น จึงทำให้การลดเป็นไปอย่างช้า ๆตามที่กล่าวมานี้ ผลที่ปรากฏอย่างชัดแจ้งของการประจุในวงจร คือวงจรไฟฟ้าที่มีการประจุแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรจะสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว เหมือนกับในวงจรที่ไม่มีการประจุ (Noncapacitive circuit) การประจุ ได้กำหนดให้คุณสมบัติของวงจรที่สามารถเก็บพลังงานเอาไว้ในรูปของสนามไฟฟ้า (Electric field)

3-2 ตัวประจุ (Capacitor)

ในรูป 3-1 เป็นภาพของตัวประจุ (Capacitor) ที่มีรูปร่างอย่างง่าย ๆซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าสองแผ่น วางแยกกันโดยมีแผ่นฉนวนบาง ๆเป็นชั้น ๆกั้นอยู่ตรงกลาง เมื่อนำแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าทั้งสองไปต่อเข้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด (Battery) ดังรูป แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะออกแรงดันให้ electron ไปอยู่ในแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าแผ่นหนึ่ง ซึ่งจะทำให้แผ่นนี้เป็นลบและดึงเอา electron ออกจากแผ่นโลหะตัวนำอีกแผ่นหนึ่ง ซึ่งจะทำให้แผ่นอันหลังเป็นบวก electron ไม่สามารถไหลผ่านฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า "Di-electric" ไปได้ เนื่องจากปริมาณของ electron จำนวนหนึ่งได้บรรจุหรือได้รับการประจุไฟฟ้าเข้าไปในตัว Capacitor ตัวหนึ่ง จึงกล่าวได้ว่ามันมี Capacity คุณสมบัติอันนี้หมายถึง Capacitance ของมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-1 ตัวประจุแบบง่าย ๆ

กิริยาเบื้องต้นของตัวประจุ ดังรูป 3-2 รูป (A) ตัวประจุอยู่ในสภาพสมดุลย์หรือไม่มีประจุ เมื่อเปิดสวิทช์ไปอยู่ตำแหน่ง 1 รูป (B) กระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งของ Battery จะ charge เข้าไปอยู่ในตัว capacitor โดยทันทีทันใด แนวโน้มตามธรรมชาติของ capacitor นั้นมันจะพยายามกลับคืนสู่สภาพสมดุลย์ตามอย่างเดิมของมัน โดยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่าน Battery ในทิศทางทวนเข็ม แนวโน้มอันนี้จะมีค่าน้อยในตอนแรก ๆแต่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆเมื่อ capacitor กำลัง charge อยู่ในวงจร

คุณสมบัติอันนี้ กล่าวโดยทั่วไปแล้ว เป็น Counter e.m.f เนื่องจากมันเป็น Voltaic Force จริง ๆ ดังนั้น เมื่อ Counter e.m.f ของ capacitor เพิ่มขึ้นจนเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ Battery จึงกล่าวได้ว่า capacitorได้ charge อย่างสมบูรณ์ และกระแสไฟฟ้าในวงจรจะเป็นศูนย์ เมื่อ charge ได้อย่างสมบูรณ์แล้ว สวิทช์จะถูกปิดกลับไปอยู่ตำแหน่ง 2 ดังรูป 3-2 (C)

ในสภาพเช่นนี้ capacitor จะเป็นแหล่งของพลังงานศักย์เหมือนกับ battery charge แผ่นประจุไฟฟ้าทั้งสองของมันจะทำให้เกิดมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้ว 2 และขั้ว 3 ของสวิทช์ นอกจากนี้แล้ว electric field static จะเกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองจะออกแรงกระทำผ่านทาง Dieletric ซึ่งเป็นแรงจริง ๆทาง physic อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการดึงดูดซึ่งกันและกันของประจุไฟฟ้าที่ต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น Dielectric จึงต้องมีโครงสร้างแข็งแรงพอที่จะต่อต้านความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ เมื่อสวิทช์ไปอยู่ตำแหน่ง 3 capacitor จะ Discharges ดังนั้นมันจะทำให้ตัวของมันกลับไปอยู่สภาพสมดุลย์อีก เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของแผ่นโลหะทั้งสองเป็นศูนย์ ประจุไฟฟ้าทั้งสองแผ่นจะเท่ากัน electric field static จะผ่อนคลายลงไป

ความจริงที่น่าสังเกตสองอย่างจากการต่อในรูป 3-2 (B) คือ

1) หลังจาก electron จำนวนหนึ่งไหลไปได้ชั่วขณะหนึ่งไฟฟ้ากระแสตรงจะหยุดไหลอย่างสมบูรณ์

2) free electron ไม่สามารถผ่าน dielectric ไปสู่อีกแผ่นหนึ่งได้ เพราะว่า dielectric เป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี

จำนวน eletron ที่กระจายอยู่ในแผ่นลบนั้น มันจะถูกยึดเอาไว้โดยแรงดึงดูดซึ่งกันและกันจากประจุไฟฟ้าของแผ่นบวก นั่นแสดงว่าเกิดมีชั้วสนามไฟฟ้าขึ้นสองข้าง (บวกและลบ) แล้วส่งแรงดึงดูดซึ่งกันและกันผ่านทาง dielectric

เส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแผ่นประจุไฟฟ้าลบนั้น จะถูกส่งออกไปและสิ้นสุดที่แผ่นประจุไฟฟ้าบวก เส้นแรงไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้แม้ว่าจะเป็นสูญญากาศ โลหะตัวนำไฟฟ้าเป็นส่วนมากไม่สามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เพราะว่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในโลหะตัวนำได้อย่างอิสระ จึงทำให้กระแสไฟฟ้าเท่ากัน ถ้ามีแรงเกิดขึ้นจาก charged bodies ต่างชนิดกันสองตัว จึงต้องแยกมันออกจากกันโดยฉนวนไฟฟ้า

3-3 วัสดุไดอีเล็คตริค (Dielectric Materials)

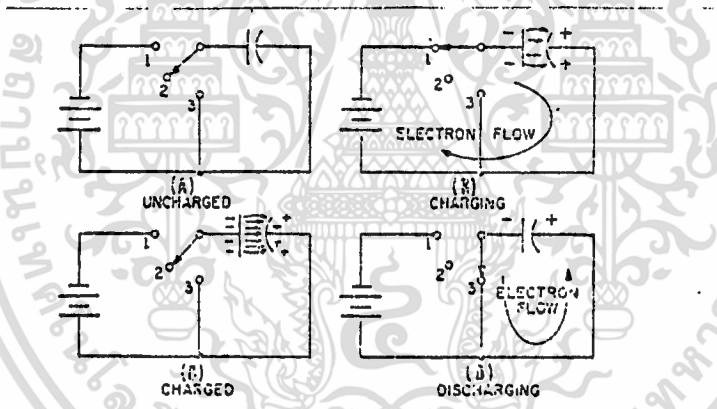
วัสดุต่าง ๆ ที่มีความสามารถแตกต่างกันต่อการรับสนามไฟฟ้า หรือใช้เป็น dielectric สำหรับ capacitor ปรากฏการณ์เช่นนี้ค่อนข้างจะคล้ายกับความแทรกซึมในวงจรแม่เหล็ก วัสดุ dielectric หรือตัวฉนวน เป็นอัตราความสามารถของมันต่อการรับสนามไฟฟ้าได้ในเทอมของตัวเลขซึ่งเรียกว่า Dielectric (Constant dielectric) ที่มีค่าคงที่สูง ๆจะเป็น dielectric ที่ดี

Dry air เป็น dielectric มาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบ โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ค่าคงที่ของ dielectric ของวัสดุ dielectric อย่างหนึ่ง ได้จากอัตราส่วนของค่า capacitance ของ capacitor ซึ่งใช้วัสดุชนิดพิเศษเป็น dielectric ต่อค่า capacitance ของ capacitor ตัวเดียวกัน เมื่อใช้อากาศเป็น dielectric โดยวิธีของการเปรียบเทียบ ค่าคงที่ของ dielectric ของน้ำบริสุทธิ์เป็น 81, แก้วอย่างดีผสมตะกั่ว (Flint glass) เป็น 9.9 กระดาษชุบไข (Paraffin Paper) เป็น 3.5

ขอบเขตของค่าคงที่ของ dielectric มีขอบเขตจำกัดมากกว่าความแทรกซึมค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ dielectric สำหรับวัสดุธรรมดาบางชนิด กำหนดให้ดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	ค่าคงที่ของ Dielectric
อากาศ	1
กระดาษparaffin	3.5
ไมก้า	6
แก้วอย่างดีผสมตะกั่ว	9.9
เมทิลอัลกอฮอล์	3.5
กลีเซอรีน	56.2
น้ำบริสุทธิ์	81



รูป 3-2 กิริยาของตัวประจุ

3-4 หน่วยของการประจุ (Unit of capacitance)

การประจุ (Capacitance) ของตัวประจุ (Capacitor) เป็นสัดส่วนกับปริมาณของประจุไฟฟ้า (Charge) ที่มันสามารถเก็บไว้ได้จากแต่ละแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายระหว่างแผ่นทั้งสองของมัน ตัวประจุมีค่าการประจุ 1 ฟาราด (Farad) เมื่อปริมาณของประจุไฟฟ้า (Charge) 1 คูลอมบ์ (Coulomb) ที่จ่ายให้กับมัน แล้วทำให้มันเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น 1 โวลท์ (1 คูลอมบ์ จะเท่ากับจำนวนอีเล็คตรอน $6.28 * 10^{18}$ ตัว) ความสัมพันธ์ระหว่างการประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของประจุไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าแสดงเป็นสูตรเบื้องต้นของตัวประจุได้ดังต่อไปนี้ คือ

$$C = Q / E \qquad 3\text{-}1$$

เมื่อ C ค่าการประจุเป็นฟาราด Q ปริมาณของประจุไฟฟ้า เป็นคูลอมบ์ และ E ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นโวลท์

ตัวประจุ (Capacitor) ขนาด 1 ฟาราด จะมีขนาดมหึมา เนื่องจากการใช้ฟาราดเป็นหน่วยที่จำกัดไว้ในนิยามและใช้ในการคำนวน ในทางปฏิบัติหน่วยของการประจะเป็นไมโครฟาราด (μF) และไมโครไมโครฟาราด (pF) ตัวประจุที่มีค่า 1 ไมโครฟาราด จะสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ 1 ไมโครคูลอมบ์ ($6.28 * 10^{12}$ อีเล็คตรอน) เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ระหว่างแผ่นทั้งสอง 1 โวลท์

3-5 อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อค่าของการประจุ

(Factors Affecting The Value of Capacitance)

การประจุของตัวประจุจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบทั้ง 3 ดังต่อไปนี้คือ

1. พื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้า
2. ระยะห่างระหว่างแผ่น
3. ค่าคงที่ของไดอีเล็คตริคของวัสดุที่ใช้ระหว่างแผ่น

ตัวประกอบทั้งสามเหล่านี้ จะสัมพันธ์กับการประจุของตัวประจุ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นวางขนานกันสองแผ่นจะมีสูตรดังนี้

$$C = 0.2249 (KA / D) \qquad 3\text{-}2$$

เมื่อ C เป็นไมโครฟาราด A พื้นที่ของแผ่นโลหะแผ่นเดียวเป็นตารางนิ้ว D เป็นระยะห่างของแผ่นเป็นนิ้ว K เป็นค่าคงที่ของไดอีเล็คตริคที่ใช้กั้นระหว่างแผ่น

ตัวอย่าง การประจุ (Capacitance) ของตัวประจุ (Capacitor) ที่มีแผ่นวางขนานกันมีอากาศเป็นไดอีเล็คตริค วางห่างกัน 1.0394 นิ้ว พื้นที่ของแต่ละแผ่นเป็น 15.5 ตารางนิ้ว ค่าการประจุโดยประมาณจะเป็น

$$C = 0.225 (1*15.5 / 0.1394) = 88.5 \text{ ไมโครฟาราด}$$

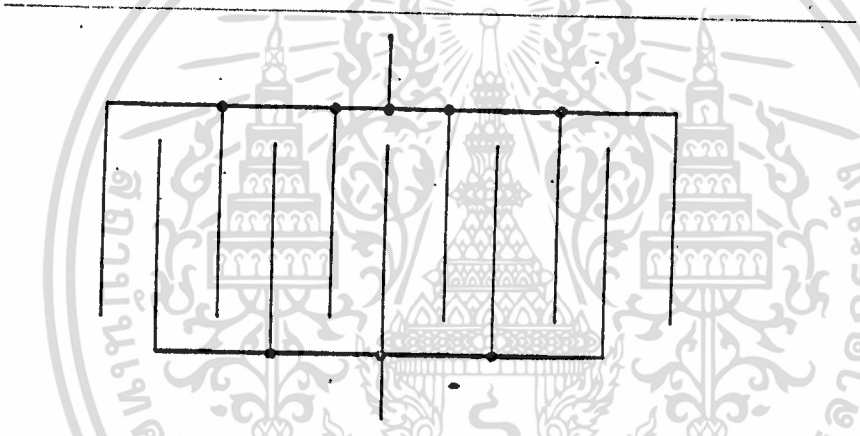
จากสูตรนี้จะเห็นว่า ค่าการประจุจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ของแผ่นโลหะเพิ่มขึ้น และค่าของมันจะลดลงเมื่อความห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วค่าของมันจะเพิ่มถ้าค่า K เพิ่มขึ้น

ค่าคงที่ของไดอีเล็คตริค K เป็นการประจุสัมพันธ์ (Relative Capacitance) เมื่อใช้วัสดุอื่นซึ่งมีค่ามากกว่าอากาศเป็นฉนวนกั้นระหว่างแผ่น เช่น ถ้าใช้ไมก้าเป็นไดอีเล็คตริคแทนอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประจุจะเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่า เพราะว่าค่าคงที่ของไดอีเล็คตริคของไมก้าเป็น 6 และของอากาศเป็น 1

ถ้าตัวประจุประกอบด้วยแผ่นขนานกันมากกว่าสองแผ่น การคำนวณหาค่าการประจุจะต้องคูณสูตร 3-2 ด้วย N -1 เมื่อ N เป็นจำนวนแผ่น ซึ่งแผ่นทั้งหลายที่วยางไขว้กันแสดงให้เห็นดังรูป 3-3 จะทำให้ผลของการประจุเพิ่มขึ้นมากกว่าสองแผ่น โดยตัวประกอบซึ่งอยู่ในรูปมี 11 แผ่นดังนั้น การประจุจะเป็น 10 เท่าของตัวประจุที่มี 2 แผ่น ซึ่งมีพื้นที่ของแผ่นระยะห่างและวัสดุไดอีเล็คตริคเหมือนกัน



รูป 3-3 โครงสร้างของตัวประจุหลายแผ่น

3-6 การประจุไฟฟ้าและการจ่ายประจุไฟฟ้าของวงจรอนุกรม R-C

(Charge And Discharge of An R-C Series Circuit)

กฎของโอห์มกล่าวว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างความต้านทานจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมัน คูณกับค่าความต้านทานของมัน" นี่ก็หมายความว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างความต้านทานเฉพาะ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านมันเท่านั้น

ตัวประจุ (Capacitor) ตัวหนึ่ง สามารถเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) ของอีเล็คตรอนไว้ได้เมื่อไม่มีประจุไฟฟ้า (uncharge) แผ่นทั้งสองจะมีจำนวนอีเล็คตรอนอิสระเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้รับประจุไฟฟ้าจะทำให้แผ่นหนึ่งมีอีเล็คตรอนอิสระมากกว่าอีกแผ่นหนึ่ง ความแตกต่างของจำนวนอีเล็คตรอนเป็นการวัดอย่างหนึ่งของประจุไฟฟ้าในตัวประจุ การสะสมของประจุไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วของตัว ประจุและการสะสมประจุไฟฟ้าจะกระทำต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งแรงคลื่อนไฟฟ้าของมันมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มันประจุไฟฟ้า ในตัวประจุ จะมีค่าสัมพันธ์กับ การประจุ (Capacitance) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าดังแสดงต่อไปนี้ คือ

$$Q = CE$$

เมื่อ Q เป็นปริมาณประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์, C เป็นการประจุเป็นฟาราด E เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นโวลท์ ดังนั้น เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่ามากจะทำให้ประจุไฟฟ้าในตัวประจุไฟฟ้ามีค่ามากตามไปด้วยตัวประจุจะรักษาประจุไฟฟ้าของมันไว้ได้เป็นเวลานาน เว้นแต่จะมีทางสำหรับให้มันจ่ายประจุ ไฟฟ้า (Discharge) ออกไป อย่างไรก็ตาม ตัวประจุไฟฟ้าที่ใช้ในทางปฏิบัติบางชนิด จะมีการรั่วไหลผ่านทางไดอีเล็คตริคได้บ้าง ดังนั้นประจุไฟฟ้าของมันจะค่อย ๆ รั่วออกไป

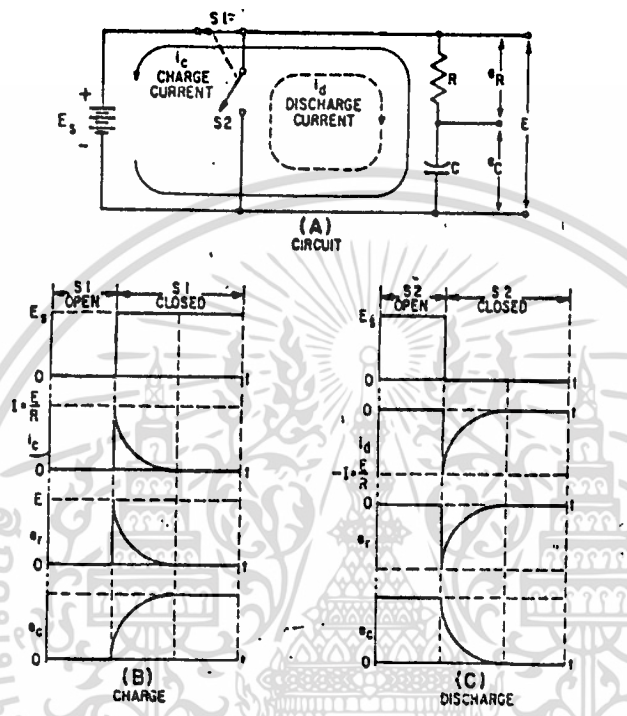
วงจรซึ่งประกอบด้วยความต้านทานและการประจุสามารถต่อเข้าเป็นวงจรโดยผ่านสวิทช์ ดังแสดงในรูป 3-4 (A) การต่อวงจรอนุกรมแบบนี้เรียกว่า "วงจรอนุกรม R-C" ถ้าปิดสวิทช์ S_1 อีเล็คตรอนจะไหลทวนเข็มนาฬิการอบวงจรที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่ ตัวประจุ และตัวต้านทาน อีเล็คตรอนจะหยุดไหล เมื่อ C ได้รับประจุไฟฟ้าจนทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของมันเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ในชั่วขณะที่กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล จะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวประจุ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกระหว่าง R จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า (Charging) ในตอนแรก, I จงมีค่าเท่ากับ E_b/R ในรูป 3-4 (B) แสดงให้เห็นว่า ในชั่วขณะที่ปิดสวิทช์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายให้วงจร E_b จะปรากฏอยู่ระหว่าง R และแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง C จะเป็นศูนย์

การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร จะทำให้ตัวประจุได้รับประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว เพราะว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในตัวประจุจะเป็นสัดส่วนกับประจุไฟฟ้า (Charge) ของมัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง คือ e_c จะปรากฏอยู่ระหว่างตัวประจุ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามหรือขัดขวางกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองนี้จะลบล้างกัน เป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า e_r ระหว่างตัวต้านทานมีค่าเป็น $E_b - e_c$ ซึ่งจะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตก (i_cR) ระหว่างตัวต้านทาน เพราะว่า E_b มีค่าคงที่ เมื่อ e_c เพิ่มขึ้นจะทำให้ i_c ลดลง

กรรมวิธีการประจุไฟฟ้าจะดำเนินต่อไป จนกระทั่งตัวประจุได้รับประจุไฟฟ้าจนเต็มที่ (Fully Charged) และทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าของมันมีค่าเท่ากับของแบตเตอรี่ ซึ่งในขณะนี้แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง R จะเป็นศูนย์ และจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมัน รูป 3-4 (B) แสดงการแบ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ E_s ระหว่างความต้านทานและการประจุ ตลอดเวลาที่ทำการประจุไฟฟ้า



รูป 3-4 การรับประจุไฟฟ้าและการจ่ายประจุไฟฟ้าของวงจรอนุกรม R - C

ถ้า S_2 ปิด (S_1 เปิด) ตามรูป 3-4 (A) จะทำให้ตัวประจุจ่ายกระแสไฟฟ้า i_d ออกไป เพราะว่า i_d มีทิศทางตรงกันข้ามกับ i_c จึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทาน มีขั้วตรงกันข้ามกับขั้วในเวลาของการประจุไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม แรงเคลื่อนไฟฟ้าอันนี้จะมีขนาดเท่าเดิม และจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปในรูปลักษณะแบบเดิม ในระหว่างการจ่ายประจุไฟฟ้าออกไป แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวประจุจะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกที่ตัวต้านทาน และมีทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูป 3-4 (C) แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว จากค่าในตอนแรกของมัน และจะลดลงเป็นศูนย์ได้อย่างช้า ๆ ดังแสดงในรูป

3-7 เวลาคงที่ของ RC (RC Time Constant)

เวลาที่ตัวประจุต้องการใช้เพื่อรับประจุไฟฟ้า (Charge) จนถึง 63 % (ที่แท้จริงแล้ว 63.2 %) ของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด หรือจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) ของมันออกไปจนถึง 37 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(36.8%) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำสุดของมัน เรียกว่าเวลาคงที่ของวงจร วงจร R - C พร้อมกับกราฟแสดงการรับประจุไฟฟ้าและจ่ายประจุไฟฟ้า แสดงให้เห็นดังรูป 3-5 ค่าของเวลาคงที่เป็นวินาทีจะเท่ากับผลคูณของความต้านทานในวงจรเป็นโอห์ม กับค่าการประจุของมันเป็นฟาราด ซึ่งค่าต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูป 3-5 (A) RC เป็นสัญญลักษณ์ที่ใช้แทนเวลาคงที่

ความสัมพันธ์บางอย่างซึ่งมีประโยชน์ในกสรค่านวณหาเวลาคงที่ RC มีดังต่อไปนี้ คือ

R (โอห์ม)	*	C (ฟาราด)	=	t (วินาที)
R (เมกโอห์ม)	*	C (ไมโครฟาราด)	=	t (วินาที)
R (โอห์ม)	*	C (ไมโครฟาราด)	=	t (ไมโครวินาที)
R (เมกโอห์ม)	*	C (ไมโครไมโครฟาราด)(PF)	=	t (ไมโครวินาที)

เวลาคงที่อาจจะกำหนดให้เป็นเวลาที่ต้องการใช้ในการรับประจุไฟฟ้าหรือจ่ายประจุไฟฟ้า ถ้ามันรับประจุหรือจ่ายประจุไฟฟ้าต่อเนื่องกันไปตามอัตราตอนแรกของมัน ดังจะเห็นได้จากรูป 3-5(E) ความเอียงของเส้นสัมผัสเส้นไข่ปลา OX แสดงให้เห็นอัตรตอนแรกของของการรับประจุไฟฟ้าที่อัตรานี้ ตัวประจุรับประจุไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา RC วินาที ในทำนองเดียวกัน ความเอียงของเส้นสัมผัส เส้นไข่ปลา YZ แสดงให้เห็นอัตราตอนแรกของการจ่ายประจุไฟฟ้าเทียบกับเวลา และอัตรานี้ ตัวประจุไฟฟ้าจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกไปได้อย่างสมบูรณ์ในเวลา RC วินาที

สมการแสดงการเพิ่มของแรงเคลื่อนไฟฟ้า e_c ระหว่างตัวประจุ เป็นดังนี้คือ

$$e_c = E\ (1 / t/Rc_{2.718}) \qquad 3\text{-}3$$

เมื่อ e_c เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วขณะ (instantaneous Voltage) ระหว่างตัวประจุ (Capacitor) E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ให้แก่วงจร (ในกรณีนี้มีค่า 100 โวลท์), t เวลาเป็นวินาที R ต้านทานเป็นโอห์ม, C การประจุเป็นฟาราด (ในกรณีนี้ 0.000,001 ฟาราด หรือ 1 μf) และจำนวน 2.178 เปฯล็อคฐานธรรมชาติ (Natural Logarithm Base) รูป 3-5 (B) เป็นกราฟที่แสดงผลของสมการนี้

เมื่อ t = RC เลขกำลัง, t/RC จะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$e_c = E\ (1-/1/2.718) = 0.632\ E$$

หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าเมื่อ t =Rc e_c จะเท่ากับ 63.2% ของค่าสูงสุดของ E เมื่อค่าสูงสุด 100 โวลท์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวประจุเป็น 63.2 โวลท์ ในเวลา RC วินาที นั่นคือ ใน 10 ไมโครวินาที

สมการของกระแสไฟฟ้าในการประจุไฟฟ้า i_c คือ

$$i_c = (1/t/Rc_{(2.718)})$$

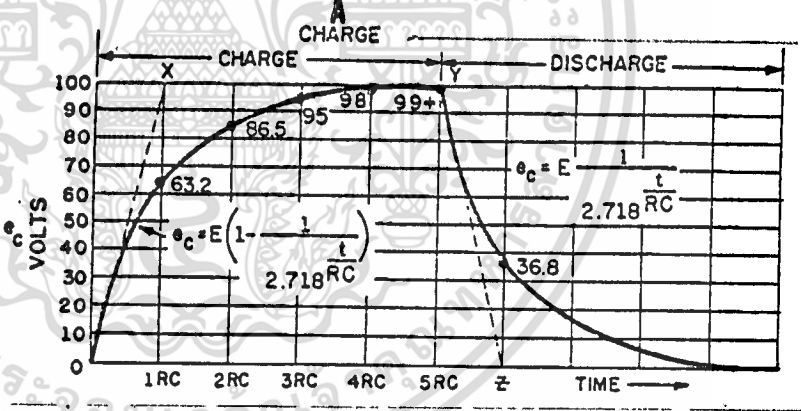
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟของสมการนี้ แสดงไว้ในรูป 3-5 (B) เมื่อ t = Rc i_c = 0.368 E/R,
นั่นคือ เมื่อ t =10 ไมโครวินาที, i_c = 0.386 * 100/10 = 3.68 แอมแปร์

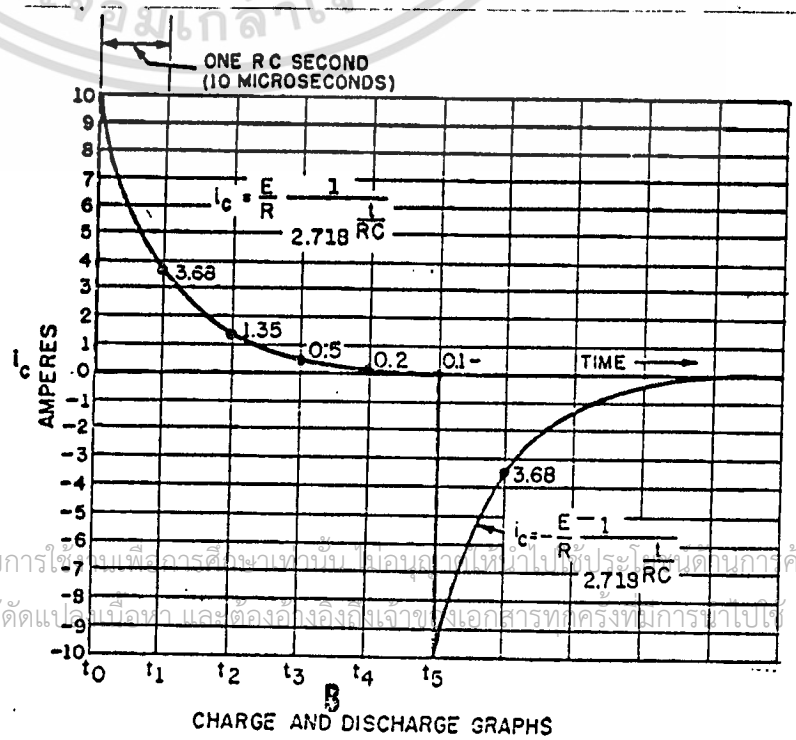
3-8 แผนภูมิเวลาคงที่สากล (Universal Time Constant Chart)

เพราะว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรและค่าของ R และ C R และ L นั้นปกติแล้วจะบอกค่าให้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แผนภูมิเวลาคงที่สากล รูป 3-6 ได้ เส้นโค้ง (Curve) A เป็นกราฟของแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวประจุ (Charge) ซึ่งมันก็เป็นกราฟของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และแรงเคลื่อนไฟฟ้า ระหว่างตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ในการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า เส้นโค้ง (Curve) B เป็นกราฟของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุ (Capacitor) ในการจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) และกระแสไฟฟ้าของตัวประจุ (Capacitor) ในการรับประจุไฟฟ้า และการลดของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำ หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวประจุในการรับประจุไฟฟ้า

มาตราส่วนของเวลา (มาตราส่วนตามแกนนอน) ได้แบ่งเป็นขั้น ๆ ในเทอมของ RC หรือ L/R เวลาคงที่ ดังนั้นเส้นโค้งเหล่านี้ สามารถนำไปใช้กับค่าใด ๆ ของ R และ L หรือ R และ L ได้

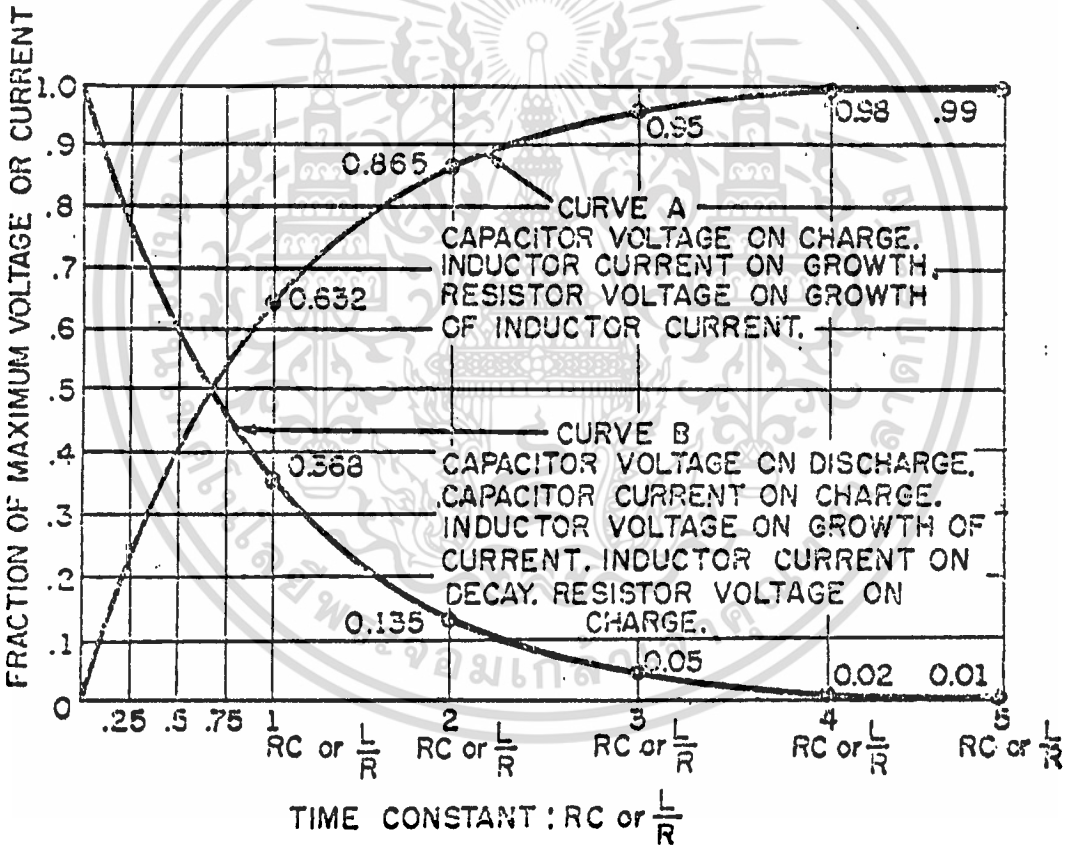


รูปที่ 3-5 เวลาคงที่ R-C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (มาตราส่วนตามแกนตั้ง) ได้แบ่งเป็นขั้น ๆ ในเทอมของเศษส่วนของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นเส้นโค้งเหล่านี้สามารถนำไปใช้กับค่าใด ๆ ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าได้ ถ้าทราบค่าเวลาคงที่และค่าตอนแรกหรือตอนท้ายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจร ปัญหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างส่วนต่าง ๆ ของวงจรสามารถหาได้จากเส้นโค้งเหล่านี้ สำหรับเวลาใด ๆ ภายหลังจากปิดสวิทช์ ไม่ว่าจะเป็นการรับประจะไฟฟ้า (Charge) หรือจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) กระแสไฟฟ้าในวงจรก็สามารถทราบได้จากเหตุผลอย่างเดียวกัน



รูป 3-6 แผนภูมิเวลาคงที่สากลสำหรับวงจร R-C และ R-L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาต่อไปนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่า แผนภูมิเวลาคงที่สากลจะสามารถนำไปใช้ได้อย่างไร

ในวงจรหนึ่งต้องการให้ตัวประจุรับประจุไฟฟ้าถึง 1/5 หรือ 0.2 ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการประจุไฟฟ้าภายในเวลา 100 ไมโครวินาที (0.0001 วินาที) เนื่องจากการพิจารณาสาเหตุอื่น ๆ ตัวต้านทานจะต้องมีความต้านทาน 20,000 โอห์ม ตัวประจุจะมีขนาดเท่าไร

เส้นโค้ง A จะใช้ในการพิจารณาหาเวลา RC ที่ต้องการ ทำให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น 0.2 ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเต็มที่ เวลาที่ใช้จะต้องน้อยกว่า 0.25 RC (จากเส้นโค้ง A) โดยประมาณแล้วให้เท่ากับ 0.22 RC เวลา 0.21 RC นี้จะเท่ากับ 100 ไมโครวินาที ดังนั้น RC จะเท่ากับ 100/0.22 = 455 ไมโครวินาที หรือ 0.000452 วินาที นั่นคือ

$$RC = 0.000455$$

แทนค่า R ลงไป จะทำให้ทราบค่า c คือ

$$C = 0.000455/20,000 = 0.000,000,023 \text{ ฟาราด}$$

หรือ 0.023 ไมโครฟาราด

ในกรณีที่แสดงชงรูป 3-5 จะไม่สมบูรณ์นัก นั่นคือการรับประจุไฟฟ้า (Charge) หรือจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) (การเพิ่มหรือการลด) ไม่สมบูรณ์ทีเดียวในเวลา 5 RC หรือ 5 L/R วินาทีอย่างไรก็ตาม เมื่อค่าถึง 0.99 ของค่าสูงสุด (ตรงกับ 5 L/R) กราฟจะมีความแน่นอนที่จะใช้กับจุดประสงค์ต่าง ๆ ได้

3-9 ตัวประจุต่อแบบขนานและแบบอนุกรม

(Capacitors In parallel and In Series)

ตัวประจุ (Capacitors) ทั้งหลายสามารถนำมาต่อเข้าด้วยกันในแบบขนานหรืออนุกรม เพื่อทำให้ได้ค่าตามต้องการ ซึ่งอาจจะรวมค่าแต่ละตัวเข้าด้วยกัน (ในการต่อแบบขนาน) หรือทำให้ค่าของมันน้อยลงไปกว่าตัวที่สุดในวงจร (ในการต่อแบบอนุกรม) ในรูป 3-7 แสดงการต่อแบบขานาและแบบอนุกรม

ในรูป 3-7 (A) แรงเคลื่อนไฟฟ้า E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวประจุทั้งหมด และประจุไฟฟ้าทั้งหมด Q_t จะเท่ากับผลบวกของแต่ละประจุไฟฟ้า Q_1 Q_2 และ Q_3 จากสมการของตัวประจุ 3-5

$$C = Q/E$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุไฟฟ้าทั้งหมดเป็น

$$Q_t = C_t E$$

เมื่อ c_t เป็นการประจุ (Capacitance) ทั้งหมดในการต่อแบบขนาน ดังนั้นประจุไฟฟ้าทั้งหมดคือ

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$C_t E = C_1 E + C_2 E + C_3 E$$

เอา E หารสมการตลอดจะได้

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 \qquad 3\text{-}4$$

ค่าการประจุทั้งหมดของตัวประจุจำนวนหนึ่งที่ต่อขนานกัน จะเท่ากับผลบวกของแต่ละตัว

ในการต่อแบบอนุกรม รูป 3-7 (B) กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทุก ๆ ส่วนของวงจรเท่ากันแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ตัวประจุแต่ละตัวในระหว่างรับประจุไฟฟ้า (Charge) และผลบวกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดจะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า E ที่จ่ายให้แก่วงจรโดยใช้สมการของตัวประจุ แรงเคลื่อนไฟฟ้า E ที่จ่ายให้จะเท่ากับประจุไฟฟ้าทั้งหมดหารด้วยการประจุทั้งหมด นั่น คือ

$$E = Ct/Qt$$

ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมด Qt จะเท่ากับประจุไฟฟ้าในตัวประจุตัวใดตัวหนึ่ง เพราะว่ากระแสไฟฟ้าไหลเท่ากันตลอดเวลา และเพราะว่าประจุไฟฟ้าเท่ากับกระแสไฟฟ้า คูณด้วยเวลาเป็นวินาที (Q=It) ดังนั้น

$$Q_t = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

แต่

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

เมื่อ E_1 , E_2 และ E_3 เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุทั้งสาม ดังนั้น

$$Qt/Ct = Q_1 / C_1 + Q_2 / C_2 + Q_3 / C_3$$

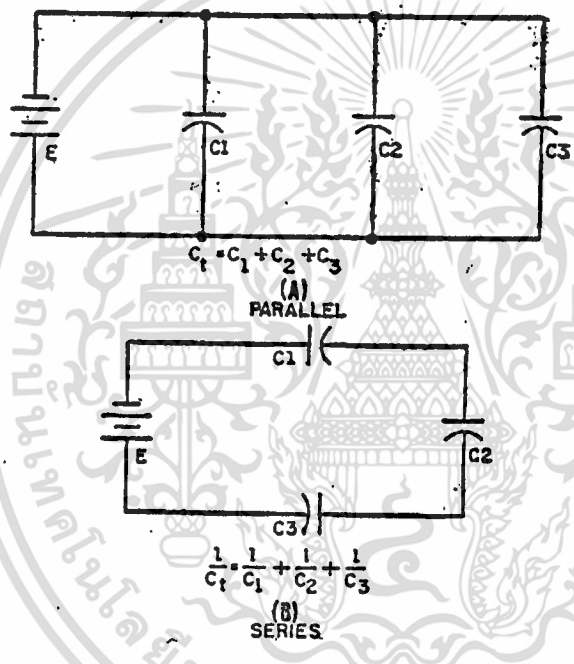
เอา Q_t หารสมการตลอด จะได้

$$1/C_t = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$$

ส่วนกลับของการประจุทั้งหมดของตัวประจุจำนวนหนึ่งที่ต่อแบบอนุกรม จะเท่ากับผลบวกของส่วนกลับของแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมค่าประจุที่ต่อแบบขนาน จะเหมือนกับการรวมค่าตัวต้านทานในแบบอนุกรมและการรวมค่าตัวประจุในแบบอนุกรมจะเหมือนกับการรวมค่าตัวต่อต้านในแบบขนาน



รูป 3-7 ตัวประจุต่อแบบขนานและอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3-10 ชนิดของตัวประจุ (Capacitor Type)

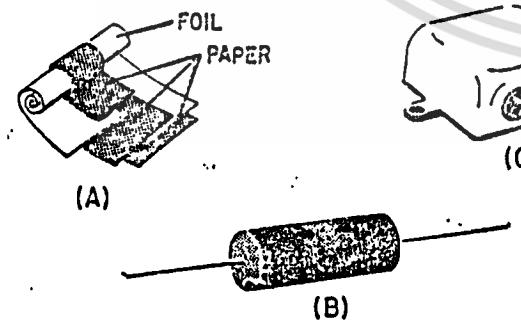
ตัวประจุสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ ชนิดค่าคงที่และชนิดปรับค่าได้

ตัวประจุที่มีค่าคงที่ (Fixed Capacitors)

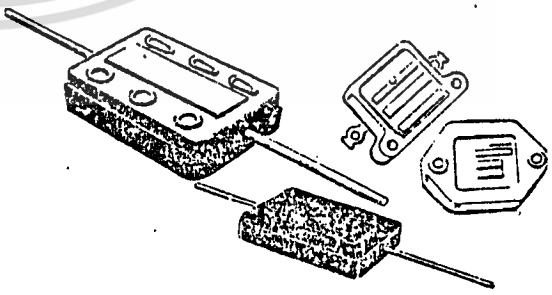
ตัวประจุแบบนี้สร้างขึ้นเพื่อให้มีการประจุคงที่ ซึ่งสามารถแบ่งออกไปตามชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นไดอีเล็คตริค เช่น กระดาษ น้ำมัน ไมก้า และอีเล็คโทรไลท์

ตัวประจุชนิดกระดาษ (Paper Capacitors) แผ่นตัวนำไฟฟ้าของตัวประจุแบบนี้ทำจากแผ่นโลหะบาง ๆ และใช้กระดาษชุบไขกั้นกลาง การประจุของตัวประจุแบบนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 200 ไมโครไมโครฟาราด ถึงหลาย ๆ ไมโครฟาราด แผ่นโลหะบาง ๆ และกระดาษชุบไขจะม้วนรวมเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก แล้วผนึกด้วยไขกันความชื้น และป้องกันการผุและการรั่วไหล โลหะตัวนำสองเส้นจะนำมาต่อเข้ากับแผ่นซึ่งแต่ละเส้นจะโผล่ออกมาภายนอกในแต่ละปลายของตัวประจุ ตัวประจุแบบนี้บางตัวขั้วอันหนึ่งของมันจะทำเครื่องหมายเป็นกราวด์ (Ground) ซึ่งหมายความว่า ขั้วอันนี้ต่อเข้ากับแผ่นโลหะด้านนอกของตัวประจุ

ชนิดของการหุ้มตัวประจุแบบนี้มีหลายอย่าง เช่น ทำเป็นหลอดกระดาษแข็ง หรือเป็นพลาสติกแข็ง ในรูป 3-8 (A) เป็นตัวประจุที่หุ้มด้วยหลอดกระดาษแข็งในรูป (B) เป็นตัวประจุที่หุ้มด้วยกระดาษแข็งอย่างสมบูรณ์ ส่วนในรูป (C) นั้นเป็นตัวประจุที่ผนึกอยู่ในที่หลอดโลหะ ซึ่งใช้เป็นขั้วของมันขั้วหนึ่ง



รูป 3-8 ตัวประจุแบบกระดาษ



รูป 3-9 ตัวประจุแบบไมก้า

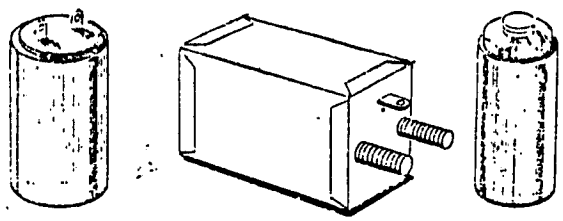
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประจุแบบไมก้า (Mica capacitor) เป็นตัวประจุชนิดคงที่ ซึ่งทำจากแผ่นโลหะบาง ๆ โดยมีแผ่นไมก้าเป็นไดอีเล็คตริคกั้นกลาง เปลือกหุ้มตัวประจุแบบนี้ใช้พลาสติก ไมก้าเป็นไดอีเล็คตริคที่ดีและทนทานแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้สูงกว่ากระดาษ ตัวประจุแบบนี้ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ไมโครไมโครฟาราด ถึงประมาณ 0.02 ไมโครฟาราด ตัวประจุแบบไมก้าลางชนิดแสดงให้เห็นดังรูป 3-9

ตัวประจุแบบอีเล็คโทรไลติค (Electrolytic capacitor) ตัวประจุแบบนี้จะมีการประจุ (Capacitance) อยู่ในระหว่าง 1 ถึง 1,500 ไมโครฟาราด ตัวประจุแบบอีเล็คโทรไลติคจะมีรูปร่างขนาดเล็กมาก แต่มีการประจุมาก ตัวประจุแบบอีเล็คโทรไลติคไม่เหมือนกับตัวประจุแบบอื่น ๆ คือจะต้องบอกขั้วเอาไว้ และจะนำไปใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นห่วง ๆ (Pulsrting - D.C.)อย่างเดียว อย่างไรก็ตามตัวประจุอีเล็คโทรไลติคชนิดพิเศษ ได้ทำขึ้นเพื่อใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับข้อควรจำก็คือจะต้องต่อด้วยประจุอีเล็คโทรไลติคให้ถูกขั้วที่กำหนดไว้ เว้นแต่ตัวที่นำมาใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ

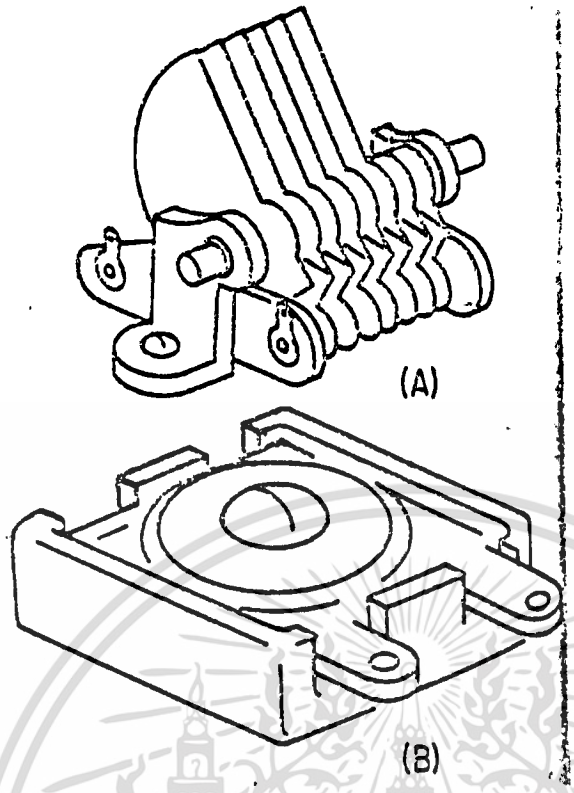
ตัวประจุอีเล็คโทรไลติค ประกอบด้วยแผ่นโลหะสองแผ่น โดยมีอีเล็คโทรไลท์กั้นกลางอีเล็คโทรไลท์อาจจะทำเป็นแบบของเหนียว (Paste) หรือแบบของเหลว ซึ่งจะสัมผัสอยู่กับขั้วลบ การรวมกันแบบนี้ประกอบด้วยอีเล็คโทรดลบ ไดอีเล็คตริคเป็นแผ่นบางที่สุดของอ๊อกไซด์ซึ่งเป็นตะกอนเกาะที่อีเล็คโทรดบวก ซึ่งทำจำแผ่นอลูมินัมและจะพับให้ได้พื้นที่น้อยที่สุด กรรมวิธีในการประดิษฐ์ตัวประจุแบบนี้จะต้องให้กระแสไฟฟ้าผ่านมัน การไหลของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดอ๊อกไซด์เคลือบแผ่นอลูมินัมอย่างบาง ๆ การวางแผ่นอีเล็คโทรดลบและบวกชิดกันมาก ๆ จะทำให้การประจุเพิ่มขึ้น

ตัวประจุอีเล็คโทรไลติคมีใช้อยู่สองชนิด คือแบบเปียก (Wet electrolytic) และแบบแห้ง (Dry electrolytic) อีเล็คโทรไลท์แบบของเหลวจะบรรจุอยู่ในภาชนะที่ป้องกันการรั่วไหล และตัวประจุ

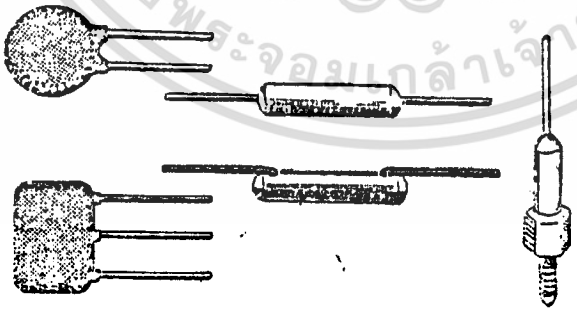


รูป 3-10 ตัวประจุอีเล็คโทรไลติคบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-11 ตัวประจุที่ปรับค่าได้



รูป 3-12 ตัวประจุแบบเซอรามิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบนี้จะต้องอยู่ในแนวตั้ง ส่วนแบบแห้งนั้นจะทำเป็นของเหนียวทาติดไว้กับแผ่นกั้นเป็นวัสดุที่ดูดที่ดูดซึมได้ เช่น ผ้าโปร่ง กระดาษซึม แผ่นกั้นทำหน้าที่ยึดอีเล็คโทรไลท์ให้อยู่กับที่ และป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างแผ่นด้วย ตัวประจุอีเล็คโทรไลชติคบางชนิด แสดงให้เห็นดังรูป 3-10

ตัวประจุที่ปรับค่าได้ (Varialbe Cpapacitors)

ตัวประจุแบบนี้จะมีโครงสร้างเพื่อให้ค่าการประจุ (Capacitance) ของมันเปลี่ยนแปลง ตัวประจุแบบนี้ชนิดหนึ่ง จะเป็นชนิดมีตัวหมุนและตัวอยู่กับที่ ประกอบด้วยแผ่นโลหะสองชุด ซึ่งทำให้แผ่นหมุน หมุนอยู่ระหว่างชุดของแผ่นอยู่กับที่ ใช้อากาศเป็นไดอีเล็คตริค เมื่อตัวหมุน หมุนเปลี่ยนตำแหน่งไป ค่าการประจุของมันจะเปลี่ยนตามไปด้วยรูปลักษณะของตัวประจะแบบนี้ แสดงให้เห็นดังรูป 3-11 (A) และตัวประจุที่ปรับค่าได้โดยปรับสกรู เพื่อให้ระยะห่างระหว่างแผ่นทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ค่าการประจุของมันเปลี่ยนไปด้วย

ตัวประจุแบบเซอรามิค (Ciramic Capacitors)

ตัวประจุแบบใหม่ซึ่งอาจจะสร้างให้มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้นั้น เรียกว่าแบบเซอรามิคซึ่งมีขนาดระหว่าง 1 ไมโครไมโครฟาราด ถึง 0.01 ไมโครฟาราด เซอรามิคใช้เป็นไดอีเล็คตริคและแผ่นตะกนอบาง ๆ ของเงินทำเป็นแผ่นตัวนำไฟฟ้า ตัวประจุนี้มีขนาดเล็กและสร้างให้มีณชรูปร่างต่าง ๆ หลาย ๆ แบบดังแสดงในรูป 3-12

3-11 อัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุ (Voltage Rating of Capacitors)

ในการเลือกตัวประจุเพื่อนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้าโดยเฉพาะจะต้องพิจารณา (1) ค่าการประจุ (Ccpacitance) ที่ต้องการ (2) จำนวนแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุที่กำหนดไว้ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ระหว่างแผ่นของตัวประจุมีค่าสูงมากเกินไป จะทำให้ไดอีเล็คตริคของมันแตกออกจากกัน ทำให้เกิดการอาร์ค (Arcing) ขึ้นในระหว่างแผ่น ซึ่งจะทำให้ตัวประจุลัดวงจรและยอมให้กระไฟฟ้าตรงไหลผ่านตัวมันได้ จึงทำให้เกิดอันตรายต่อส่วนอื่น ๆ ของอุปกรณ์ที่ต่อกับมัน ตัวประจุทั้งหลายจะมีอัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนัก

แรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้แรงงาน (Working voltage) ของตัวประจุเป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทำงานคงที่ได้ โดยไม่เกิดอันตรายจากการอาร์ค แรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้งานขึ้นอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ (1) ชนิดของวัสดุที่ใช้เปนไดอีเล็คตริค และ(2) ความหนาของไดอีเล็คตริค

อัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้า ของตัวประจุเป็นตัวประกอบอย่างหนึ่ง ในการพิจาณาหาค่าประจุเพราะว่าการประจุจะลดลงเมื่อความหนาของไดอีเล็คตริคเพิ่มขึ้น ตัวประจะที่ทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าไฟฟ้าสูง ๆ จะมีไดอีเล็คตริคหนา พื้นที่ของแผ่นจะต้องมาก เพื่อทำให้การประจุเท่ากับตัวประจุที่ใช้กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำซึ่งมีไดอีเล็คตริคบาง อัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความถี่ (Frequency) เพราะว่าการสูญเสียต่าง ๆ และผลของความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

ตัวประจุที่มีความปลอดภัยกับไฟฟ้ากระแสตรง 500 โวลท์ นั้นจะไม่มีความปลออดภัยเมื่อนำไปใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีค่าที่วัดได้ (Effecive Value) ของมันที่ค่า 500 โวลท์ ถ้าไฟฟ้ากระแสสลับมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ของมันมีค่า 500 โวลท์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่า 707 โวลท์ ดังนั้นตัวประจุไฟฟ้าที่ใช้จะต้องมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้งานถึง 750 โวลท์ การเลือกตัวประจุนั้นควรจะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้งานมีค่าสูงกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายให้มันอย่างน้อยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงเคลื่อไฟฟ้าที่วัดได้ และกิริยาของตัวประจุไฟฟ้ากระแสสลับ

3-12 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (Alternating current circuit containing only capacitance)

ตัวประจุไฟฟ้า (Capacitor) นั้นประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นมีฉนวนกั้นตรงกลางเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นตัวนำถึงกันและเมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงให้ระหว่างตัวนำทั้งสอง ในช่วงเริ่มแรกนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอย่างรวดเร็ว โดยมันจะทำให้ electron เคลื่อนที่จากแผ่นบวกไปเพิ่มให้กับแผ่นลบ จึงทำให้แผ่นตัวนำทั้งสองได้รับประจุไฟฟ้า จนทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นเท่ากับของแหล่งกำเนิด ภายหลังจากนี้ก็จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้นั้นมีค่าคงที่อยู่ที่เดิม

ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มีค่าลดลง จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนแรก จึงทำให้ประจุไฟฟ้าที่แผ่นตัวนำทั้งสองลดลง หรือถ้าปลดตัวประจุไฟฟ้าออกจากแหล่งกำเนิด แล้วทำให้แผ่นทั้งสองลัดถึงกัน กระแสไฟฟ้าจะไหลกลับทิศทาง จนกระทั่งแผ่นตัวนำทั้งสองไม่มีประจุไฟฟ้า

คุณสมบัติที่ทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าในตัวประจุไฟฟ้า เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวมันเปลี่ยนไปนี้เรียกว่าการประจุไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นฟาราด ตัวประจุไฟฟ้าจะมีการประจุไฟฟ้า 1 ฟาราด เมื่อมันได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลท์ แล้วทำให้เกิดประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ ขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองของมัน ฟาราดเป็นหน่วยใหญ่เกินไปไม่เหมาะในงานปฏิบัติ ดังนั้นค่าการประจุไฟฟ้าจึงมีหน่วยทั่วไปเป็นไมโครฟาราด หรือ ไมโครไมโครฟาราด (pF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยฟาราดนั้นอาจมีนิยามอีกอย่างคือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลท์ ต่อวินาทีระหว่างตัวประจุไฟฟ้า แล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น 1 แอมแปร์ ตัวประจุตัวนี้จะมีค่าการประจุไฟฟ้า 1 ฟาราด

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในตัวประจุจะขึ้นอยู่กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวมันนั่นคือ

$$Iave = C\ Em/t \qquad 3\text{-}5$$

เมื่อ Iave = ค่าเฉลี่ยของไฟฟ้าเป็นแอมแปร์

C = Capacitance เป็น ฟาราด

Em = ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเป็นโวลท์ในเวลา t

t = เวลาเป็นวินาที

จากสมการ 3-5 นั้น ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะก็จะได้ดังนี้คือ

i = C * อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$i = C\ de/dt \qquad 3\text{-}6$$

เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับให้กับตัวนำทั้งสองของ capacitor ดังรูป 3-13 (C) จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านวงจร ซึ่งในตอนแรกเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะเป็นการ charging ของแผ่นตัวประจุไฟฟ้าในทิศทางหนึ่ง แล้วก็ discharging ออกไป เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลง และมันจะรับประจุไฟฟ้าอีกแต่เป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับในตอนแรก ทั้งนี้เพราะแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในทางลบ ในรูป 3-13 (A) นั้นเป็นรูป sinewave ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ต้านกลับของตัวประจุไฟฟ้าของรูป 3-13 (A) ที่จุดเริ่มต้นของ curve แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นไปในทางบวก ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าบวกสูงสุด และที่จุดของ curve แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าสูงสุด อัตราการเปลี่ยนแปลงของมันจะเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาต่อเนื่องกันไปตลอดcycle จะได้ curve ของกระแสไฟฟ้า และจะเห็นว่ามันนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นมุม 90 ° ดังนั้นถ้าพิจารณาเป็นค่าชั่วขณะก็จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i = Im \sin \omega t$$

$$e = Em \sin (\omega t - 90^{\circ}) = - Em \cos \omega t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยฟาราดนั้นอาจมีนิยามอีกอย่างคือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลท์ ต่อวินาทีระหว่างตัวประจุไฟฟ้า แล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น 1 แอมแปร์ ตัวประจุตัวนี้จะมีค่าการประจุไฟฟ้า 1 ฟาราด

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในตัวประจุจะขึ้นอยู่กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวมันนั่นคือ

$$I_{ave} = C\, E_m/t \qquad 3\text{-}5$$

เมื่อ I_{ave} = ค่าเฉลี่ยของไฟฟ้าเป็นแอมแปร์

C = Capacitance เป็น ฟาราด

E_m = ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเป็นโวลท์ในเวลา t

t = เวลาเป็นวินาที

จากสมการ 3-5 นั้น ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะก็จะได้ดังนี้คือ

i = C * อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$i = C\, de/dt \qquad 3\text{-}6$$

เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับให้กับตัวนำทั้งสองของ capacitor ดังรูป 3-13 (C) จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านวงจร ซึ่งในตอนแรกเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะเป็นการ charging ของแผ่นตัวประจุไฟฟ้าในทิศทางหนึ่ง แล้วก็ discharging ออกไป เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลง และมันจะรับประจุไฟฟ้าอีกแต่เป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับในตอนแรก ทั้งนี้เพราะแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในทางลบ ในรูป 3-13 (A) นั้นเป็นรูป sinewave ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ต้านกลับของตัวประจุไฟฟ้าของรูป 3-13 (A) ที่จุดเริ่มต้นของ curve แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นไปในทางบวก ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าบวกสูงสุด และที่จุดของ curve แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าสูงสุด อัตราการเปลี่ยนแปลงของมันจะเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาต่อเนื่องกันไปตลอดcycle จะได้ curve ของกระแสไฟฟ้า และจะเห็นว่ามันนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นมุม 90 ° ดังนั้นถ้าพิจารณาเป็นค่าชั่วขณะก็จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

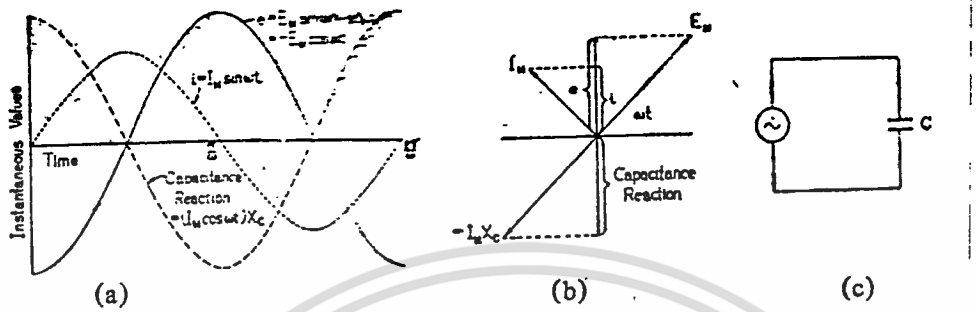
$$i = I_m \sin \omega t$$

$$e = E_m \sin (\omega t - 90^\circ) = - E_m \cos \omega t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = Im\ Sin\omega t$$

$$e = Em\ Sin(\omega t - 90^{\circ}) = -Em\ Cos\ \omega t$$



รูป 3-13 curve and vector ในวงจรการประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นมุม 90 °

เนื่องจาก e เปลี่ยนจาก 0 เป็น Em หรือในทางตรงกันข้ามที่เกิดขึ้นในหนึ่ง cycle จะเปลี่ยนถึง 4 ครั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยเฉลี่ยแล้วจะเท่ากับ Em / 1/4f = 4fEm โวลท์ต่อวินาที ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการ 3-5 แล้วจะได้

$$Iave = C\ Em\ /\ 1/4f = 4fCEm$$

$$Im = Iave\ /\ 2/\pi = 4\pi fCEm/2 = 2\pi fCEm$$

หรือ $$I = 2\pi fCE$$

$$E/I = 1\ /\ 2\pi fC \qquad 3\text{-}7$$

ปริมาณ 1 / 2πfC นั้นเรียกว่าความต้านเนื่องจากการประจุไฟฟ้า (Capacitive Reactance) มีหน่วยเป็นโอห์ม ใช้ X_c เป็นสัญญลักษณ์ ดังนั้น

$$X_c = E\ /\ I$$

$$X_c = 1\ /\ 2\pi fC \qquad 3\text{-}8$$

ในรูป 3-13 (B)นั้นเป็นรูป vector ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรที่มีการประจุไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งจะเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของการประจุไฟฟ้าเยื้องห่างไปจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ 180 ° และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร 90 °

3-13 กำลังไฟฟ้าที่มีการประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (Power in a circuit containing only capacitance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

curve ของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะของวงจรที่มีการประจุไฟฟ้าอย่างเดียวได้จากผลคูณของค่าชั่วขณะของกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ถ้ากระแสไฟฟ้ามีค่าเป็น $i = ImSin\omega t$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น

e = -EmCosωt curve ของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ จะมีค่าเป็น

$$P = ie = -EmCos\omega t\ ImSin\ t$$

$$= -EmIm\ (Sin\omega tCos\omega t)$$

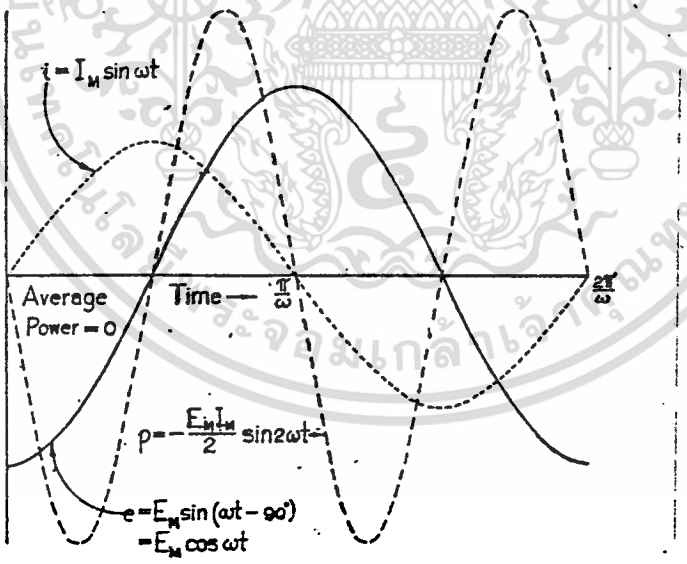
$$= -EmIm/2 * Sin\omega t \qquad 3\text{-}9$$

ในรูป 3-14 curve เส้นเต็มใช้แทนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร curve เส้นไข่ปลาเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้า 90 ° และ curve เส้นขาดเป็นกำลังไฟฟ้าชั่วขณะซึ่งจะเห็นว่า curve ของกำลังไฟฟ้ามีความถี่เป็นสองเท่าและค่าทางด้านบวกจะเท่ากับทางด้านลบ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหรือวัตต์ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์หรือคำนวณจากสูตรกำลังไฟฟ้าคือ

$$P = EICos\theta = EICos\ 90^{\circ} = 0$$

นี่แสดงให้เห็นว่า ในวงจรที่สมมุติว่าไม่มีความต้านทาน (Resistance) จะไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นความร้อนเลย และตัวประจุไฟฟ้าจะจ่ายพลังงานกลับคืนไปในระหว่าง1ใน4ของไซเกิลจากที่มันได้สะสมไว้เป็น1ใน4ของไซเกิลก่อน พลังงานที่สะสมไว้นี้คำนวณค่าได้จาก

$$W = 1/2CE^2 \text{ จูล} \qquad 3\text{-}10$$



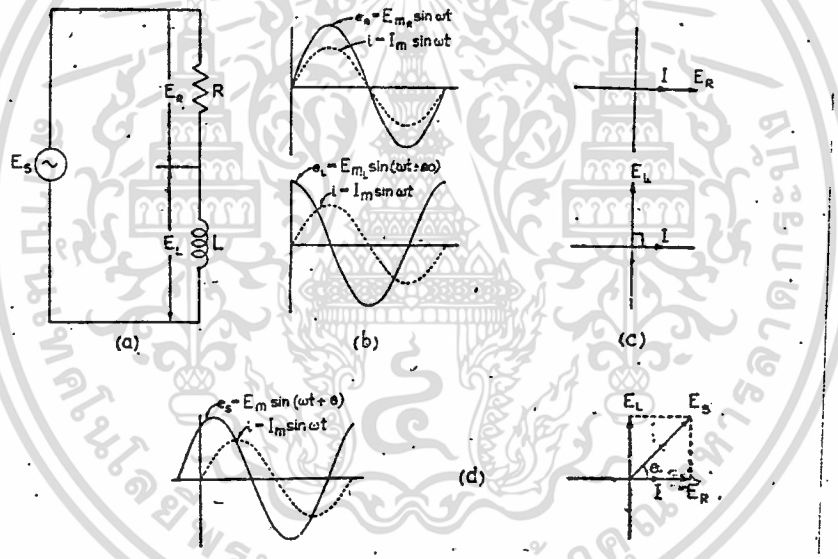
รูปที่ 3-14 เคอฟว์กำลังไฟฟ้าของวงจรที่มีค่าการประจุไฟฟ้าอย่างเดียว ค่าที่อยู่ด้านบนแกนจะเท่ากับด้านล่างแสดงว่าวงจรเก็บและจ่ายพลังงาน ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าจึงเท่ากับศูนย์

เมื่อ C ค่าการประจุไฟฟ้าเป็นฟาราด E แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นโวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3-14 ความต้านทานและความต้านเนื่องจากการเหนี่ยวนำอนุกรม (Resistance and Inductive Reactance in series)

ในรูป 3-15 สมมติว่าจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับให้กับวงจรอนุกรมที่มีตัวต้านทาน R และขดลวดแกนอากาศ X_L ซึ่งมีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างวงจรมีค่าเท่ากับผลบวกทาง vector จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกระหว่างตัวต้านทาน E_R และ E_L ระหว่างขดลวด



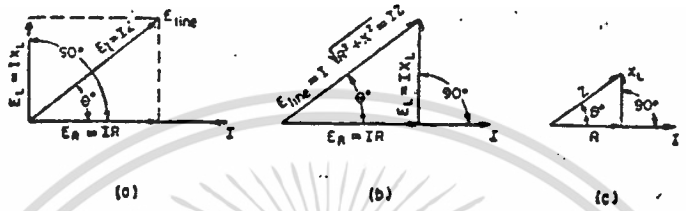
รูป 3-15 วงจรอนุกรมที่มีความต้านทานและการเหนี่ยวนำ

ในรูป 3-15 (B) และ (C) เป็นรูป curve และ vector แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในแต่ละวงจร จะเห็นว่าที่ R นั้น ร่วมเฟสกัน ส่วนที่ L นั้นต่างเฟสกัน 90 ° และในรูป (D) นั้นแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ E และ I ทั้งหมดของวงจร

ในรูป 3-16 เป็นรูป vector ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรอนุกรมนั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทุก ๆ ส่วนของวงจรเท่ากันหมด ดังนั้นการใช้-vector ในวงจรเช่นนี้ จึงต้องใช้ vector กระแสไฟฟ้าเป็นแกนอ้างอิง (Refference vector) และ vector แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเขียนให้อยู่ในตำแหน่งที่สัมพันธ์ กับ vector ของกระแสไฟฟ้าในวงจร



ในรูป 3-16 รูป vector ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจรรูป 3-15 จะเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าตก IZ จะเป็นผลบวกของ vector ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า IR ซึ่งร่วมเฟสกับกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าตก IX_L นำหน้ากระแสไฟฟ้า 90 ° ในรูป (B) ก็เหมือนกับรูป (A) ในรูป (C) เป็นรูป Impedance ของวงจรรูป (A) และ (B) จะเห็นว่า Z เท่ากับผลบวกของ vector R ที่ร่วมเฟสกับกระแสไฟฟ้าและ X_L ซึ่งนำหน้ากระแสไฟฟ้า 90 °

เป็นไปตามรูป 3-15 (A) vector ของกระแสไฟฟ้าจะเขียนตามแกนนอนไปทางขวามือ-แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกที่ตัวต้านทาน E_R จะเท่ากับ IR และเขียนร่วมเฟสกับกระแสไฟฟ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกที่ขดลวด E_L จะเท่ากับ IX_L จะเขียนให้นำหน้ากระแสไฟฟ้า 90 ° ในรูป 3-16 (B) เป็นรูป vector ที่ใช้แสดง vector ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองต่างเฟสกัน 90 ° ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายจึงเท่ากับ square root ของผลบวกกำลังสองของมัน นั่นคือ

$$E_S = \sqrt{E_R^2 + E_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2}$$

$$= \sqrt{I^2 (R^2 + X_L^2)}$$

$$= I\sqrt{R^2 + X_L^2} = IZ \qquad 3\text{-}11$$

ปริมาณ $\sqrt{R^2 + X_L^2}$ เรียกว่า " Impedance" ของวงจรมีหน่วยเป็นโอห์ม ใช้ Z เป็นสัญญลักษณ์ ดังนั้นจากสมการ 3-11 จะได้

$$I = E_S / \sqrt{R^2 + X_L^2} = E / Z \qquad 3\text{-}12$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3-12) ก็เหมือนกับกฎของโอห์ม คือกระแสไฟฟ้าจะแปรผ่าไปกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยตรงและจะเป็นส่วนกลับกับ Impedance แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกระหว่างวงจรเช่นนี้เรียกว่าตกใน Inductive Impedance หรือ IZ_L

เนื่องจาก Z นั้นเท่ากับผลบวกของ vector R และ X_L ที่ทำมุมกัน 90 ° R, XL และ Z ซึ่งเป็นปริมาณทาง vector จึงสามารถเขียนรูป vector impedance ได้ดังรูป 3-16 (C) และจะเห็นว่า R นั้นเขียนได้เฟสเดียวกับ IR หรือ ร่วมเฟสกับกระแสไฟฟ้า X_L เขียนในเฟสเดียวกับ IX_L หรือน่าหน้ากระแสไฟฟ้า 90 ° และ Z จะร่วมเฟสกับ IZ หรือร่วมเฟสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สาย

เนื่องจากมีความต้านทานอยู่ในวงจร ดังนั้นจึงทำให้กระแสไฟฟ้าในรูป 3-15 ล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นมุม θ ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า 90 ° ดังนั้น

$$\text{Tan } \theta = IX_L / IR = X_L / R$$

$$\text{Sin } \theta = IX_L / IZ = X_L / Z \text{ หรือ } X_L = Z \text{ Sin } \theta \qquad 3\text{-}13$$

$$\text{Cos } \theta = IR / IZ = R / Z \text{ หรือ } R = Z \text{ Cos } \theta \qquad 3\text{-}14$$

เนื่องจากวงจรนี้มีความต้านทาน ดังนั้นจึงมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในวงจรซึ่งหาค่าได้จากสูตร

$$P = EI \text{ Cos } \theta = I^2 R$$

ดังนั้นในวงจรที่มีความต้านทานและการเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้าจะล้าหลัง (LAG) แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยกว่า 90 °

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกรองความถี่ต่ำแอคตีฟ

"วงจรกรองความถี่ต่ำแอคตีฟ"(active low-pass filter)เป็นวงจรที่มีแรงดันเอ้าท์พุตคงที่ตั้งแต่ไฟตรงจนถึง "ความถี่คัทออฟ"(cut off frequency) หรือ f_c โดยความถี่คัทออฟนี้เกิดขึ้นที่จุด half-power หรือ 70.7% ของแรงดันเอ้าท์พุทสูงสุด

ความถี่ดังกล่าวนี้ นอกจากเรียกว่าความถี่คัทออฟแล้วบางครั้งอาจพบเรียกว่า ความถี่ 70. ความถี่ -3dB corner frequency หรือ break point frequency

ทั้งนี้ความถี่ที่สูงกว่า f_c จะถูกลดทอนลง

ย่านความถี่ที่ต่ำกว่า f_c เรียกว่า "พาส แบนด์" (pass band)และที่สูงกว่า f_c เรียกว่า "สต็อพ แบนด์" (stop band)

จากเส้นโค้งแสดงการตอบสนองความถี่ตามรูปนั้น ส่วนที่เป็นเส้นประแสดงถึง ideal cut off ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว วงจรกรองจะมีคุณสมบัติไม่ค่อยเป็นไปตามนี้ โดยจะมีการโค้งออก(roll off) หรือบางทีอาจสูงขึ้นก่อนแล้วโค้งออกก็มี

วงจรออพแอมป์ ฟิลเตอร์ สามารถออกแบบให้มีคุณลักษณะ roll off ได้ต่างกัน ทำให้มีสโลป(slop)มากมาย ทั้งนี้สโลป-20 dB/decade หมายความว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น 10 เท่า(x10) จาก f_c แล้วแรงดันเอาท์พุทจะลดลง 20dB โดยยิ่งมี decibel loss/decade มาก สโลปยิ่งชันเป็นสิ่งที่ต้องการมาก

ตามตัวอย่างในรูปนั้นเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ -40 dB/decade โดยมีตัวเก็บประจุ C_2 ขั้นท์กระแสออกจากอินพุทในกรณีความถี่สูงกว่า f_c สำหรับค่า X_c ของตัวเก็บประจุ C_1 นั้นมีค่าต่ำที่ความถี่ในย่านสต็อพแบนด์ และมีการป้อนกลับทางลบป้อนเข้าที่อินพุทมากเป็นผลทำให้ลดอัตราขยายของวงจรลง

ความถี่คัท-ออฟ สำหรับวงจร LPF -40 dB/decade สามารถหาได้จากสูตร

$$f_c = 1/2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

วงจรกรองความถี่สูงแอคตีฟ

"วงจรกรองความถี่สูงแอคตีฟ"(active high-pass filter) ทำหน้าที่ในลักษณะตรงข้ามกับวงจร LPF ในหัวข้อที่แล้ว

วงจรกรองความถี่สูงทำหน้าที่ลดทอนทุกๆความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่คัทออฟ(f_c)เฉพาะอันหนึ่งในขณะที่ยอมให้ความถี่อื่นๆเหนือกว่า f_c ผ่านได้

ความถี่คัทออฟ ของวงจรกรองความถี่สูงเกิดขึ้นที่ 70.7% ของค่าแรงดันเอ้าท์พุทสูงสุด

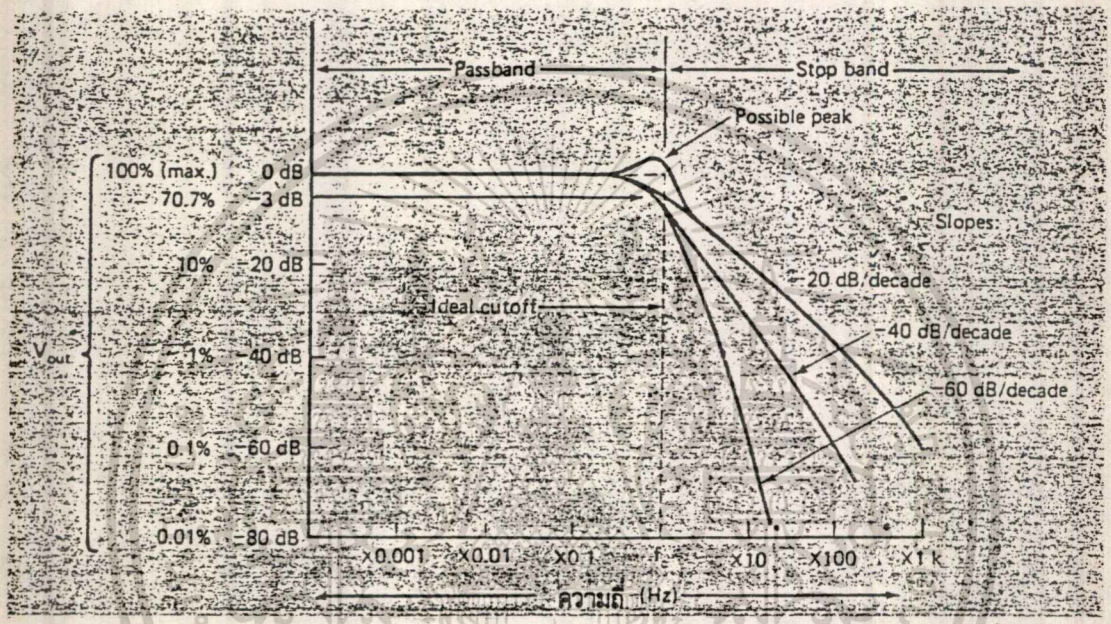
วงจรกรองความถี่สูง -40 dB/decade ตามรูปนั้น ตัวเก็บประจุ C_1 มีค่าเท่ากับ C_2 และตัวต้านทาน R_2 ควรมีค่าเป็น 2 เท่าของ R_1 ตัวต้านทาน R_3 ควรมีค่าเท่ากับ R_2 ใช้สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

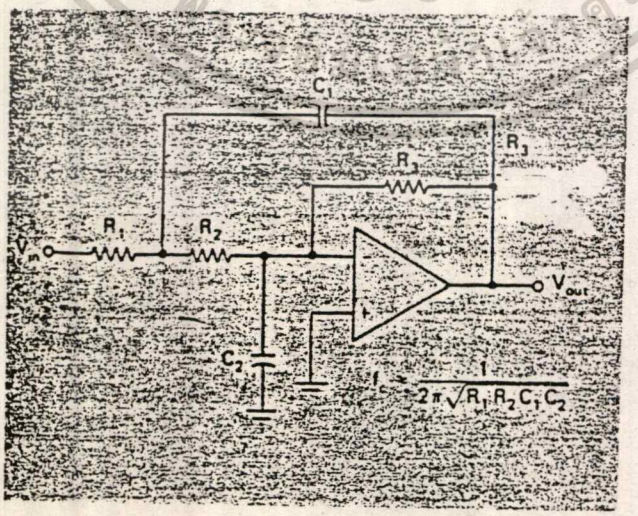
ตามรูป V_{in} ป้อนเข้าทางอินพุทแบบไม่กลับ โดยมี C_1,C_2 และ R_2 ประกอบกันเป็นวงจรแบ่งแรงดัน เมื่อ V_{in} ต่ำกว่า R_2 แล้วค่า f_c ของค่า C_1 กับ C_2 จะมากทำให้ลดแรงดัน V_{in} ส่วนใหญ่ไว้ เมื่อแรงดันคร่อม R_2 ต่ำ V_{out} ก็จะต่ำด้วย แต่เมื่อ V_{in} เพิ่มขึ้นสูงกว่า f_c แล้ว X_c ของ C_1 กับ C_2 จะลดลงทำให้ V_{in} ตกคร่อม R_2 มากผลคือ V_{out} มากตามไปด้วย

ความถี่คัทออฟ ของวงจร HPF-40 dB/decade สามารถหาได้จากสูตร

$$f_c = 1/2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$$



รูปที่ 1 เส้นโค้งตอบสนองความถี่ของวงจร LPF



รูปที่ 2 วงจร LPF 40 dB/decade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกรองเฉพาะแถบแอคตีฟ

"วงจรกรองเฉพาะแถบแอคตีฟ"(active bandpass filter) หรือ BPF จะยอมให้ความถี่กลุ่มหนึ่งผ่านไปได้ในขณะที่ตัดส่วนที่เหลือทิ้ง

แรงดันเอ้าท์พุทสูงสุดของวงจรกรองแบบนี้จะสูงสุด(peak) มีค่าความถี่เฉพาะค่าหนึ่งเรียกว่า "ความถี่เรโซแนนท์"(resonant frequency) หรือ f_r เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจากเรโซแนนท์(resonant) แรงดันเอ้าท์พุทจะลดลง

จุดที่อยู่เหนือและต่ำกว่า f_r ที่แรงดัน V_{out} ตกลงเหลือ 70.7% นั้น หากกำหนดให้ f_H เป็นความถี่ด้านเหนือ และ f_L เป็นความถี่ด้านต่ำแล้วเราจะได้ว่าความถี่ระหว่าง f_L เป็นแถบความถี่หรือแบนด์วิธ($BW = f_H\ F_L$)

วงจรกรองมีแถบความถี่ยิ่งแคบ มันยิ่งมีความสามารถในการเลือก(selectivity)มากนั้นคือเป็นค่า Q หรือ Quality factor ของวงจร

ค่า Q ของวงจรสามารถได้จากสูตร

$$Q = f_r/BW$$

หรืออาจจัดสูตรใหม่เพื่อหาค่าของแถบความถี่ก็จะได้เป็น

$$BW = f_r/Q$$

วงจรกรองที่มีค่า Q สูงจะมีแถบความถี่แคบ และมักจะมีค่าแรงดันเอ้าท์พุท(V_{out}) สูงในขณะที่วงจรกรองที่มีค่า Q ต่ำมีแถบความถี่กว้าง และมักจะมีค่า V_{out} ต่ำ

วงจรกรองความถี่เฉพาะแถบแอคตีฟนี้เป็นการผสมกันระหว่างวงจรกรองความถี่ต่ำกับวงจรความถี่สูงที่สามารถหาความถี่เรโซแนนท์ได้จากสูตร

$$F_r = 1/2\pi\sqrt{R_p\ R_3\ C_1\ C_2}$$

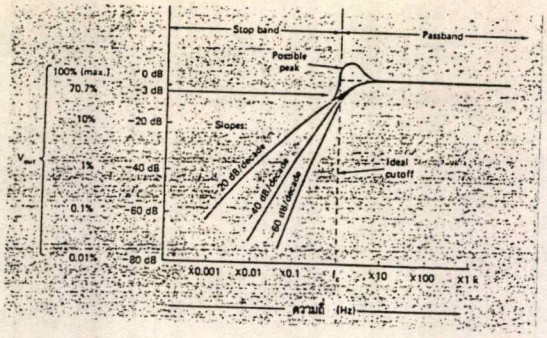
เมื่อ $R_p = R_1R_2/R_1 + R_2$

สำหรับค่า Q ของวงจรกรองสามารถหาได้จากสูตร

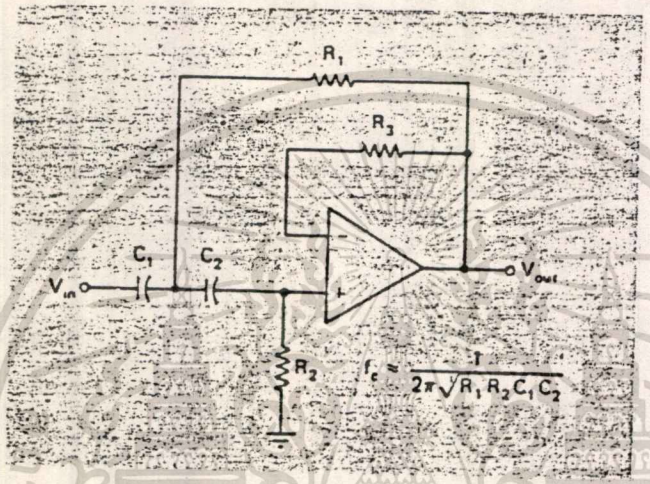
$$Q = 0.5\sqrt{R_3/R_p}$$

เมื่อ $C_1 = C_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 เส้นโค้งตอบสนองความถี่ของวงจร HPF



รูปที่ 4 วงจร HPF -40 dB/decade

วงจรกรองความถี่ทิ้งเฉพาะแถบแอคตีฟ

"วงจรกรองความถี่ทิ้งเฉพาะแถบ"(brandreject filter) หรือบางทีเรียกว่า "วงจรนอทช์ ฟิลเตอร์"(notch filter)นั้นกำหนดที่ในลักษณะตรงข้ามกับวงจรกรองความถี่เฉพาะแถบในหัวข้อที่แล้ว

แรงดันเอ้าท์พุทค่อนข้างจะคงที่พอควรจนกระทั่งความถี่ที่ป้อนเข้าใกล้ f_r ที่จุดซึ่งมันถูกลดทอน เมื่อความถี่ที่ป้อนเพิ่มขึ้น แรงดันเอ้าท์พุทก็จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงระดับเดิมของมัน โดยสต๊อฟแบนด์ (แถบความถี่) เกิดขึ้นที่ขนาดหรือแอมพลิจูดต่ำกว่า 70.7% ของ V_{out} และใช้สูตรในการหาค่า Q และ BW เช่นเดียวกับของวงจรกรองความถี่เฉพาะแถบหนึ่งหรือ BPF

วงจรนอทช์ ฟิลเตอร์แบบหนึ่งมี V_{in} ป้อนเข้าที่อินพุททั้งสอง ตัวต้านทาน R_3 กับ R_4 ประกอบกันเป็นวงจรแบ่งแรงดัน ทั้งนี้ R_3 โดยทั่วๆไปมีค่ามากกว่า R_2 ราว 50 เท่า สำหรับตัวต้านทาน R_1,R_4 และตัวเก็บประจุ C_1,C_2 ทำหน้าที่เป็น Frequency-selective feedback network

ที่ความถี่ต่ำกว่า f_r ค่า X_c ของตัวเก็บประจุมีค่าสูงมากและมีการป้อนกลับน้อย ดังนั้นเอ้าท์พุทจึงสูงสุด และเมื่อความถี่ของ V_{in} เข้าใกล้ f_r ค่ารีแอคแตนซ์และความต้านทานจะมีส่วนสัมพันธ์กันกับมุมเฟส(phase angle) เกิดเป็นการป้อนกลับขึ้นซึ่งทำให้เอ้าท์พุทลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

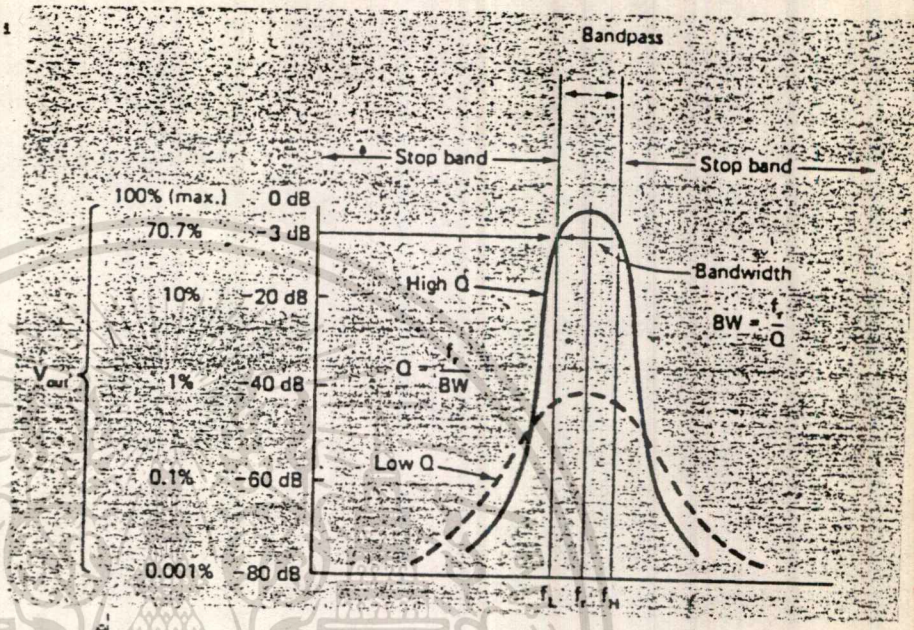
เมื่อความถี่ของ V_{in} เพิ่มขึ้นสูงกว่า f_r แล้วค่า X_c ของตัวเก็บประจุจะลดลงและแฟคเตอร์ป้อนกลับเข้าใกล้ 1 หรืออัตราขยายของโวลเตจฟอลโลเวอร์ V_{out} จะเพิ่มขึ้นถึงระดับเดิมของมัน

ความถี่ f_r ของนอทช์ ฟิลเตอร์ สามารถหาได้จากสูตร

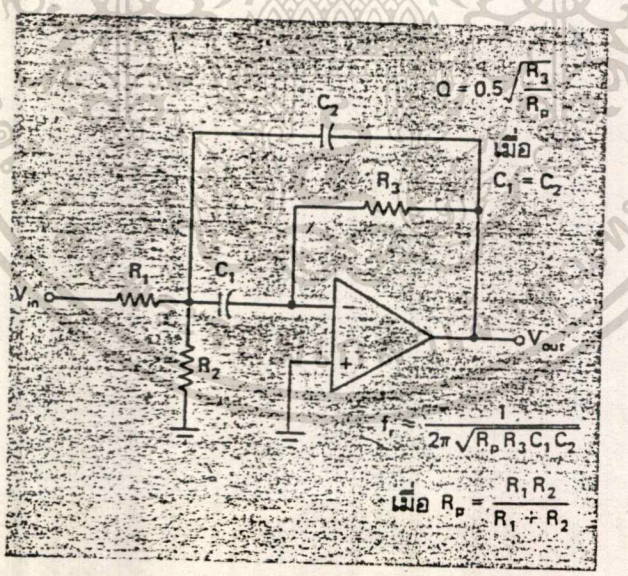
$$f_r = 1/2\pi\sqrt{R_1 R_4 C_1 C_2}$$

และค่า Q ของวงจรนอทช์ ฟิลเตอร์ หาได้จากสูตร

$$Q = 0.5\sqrt{R_4/R_1}$$



รูปที่ 5 เส้นโค้งตอบสนองความถี่ของ BPF



รูปที่ 6 วงจรกรองความถี่เฉพาะแถบแอคตีฟ

วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม

"วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม"(square wave generator) อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "วงจรฟรี-รันนิ่ง(free-running)หรือ แอสเตเบิ้ล มัลติไวเบอร์เตอร์"(astable multivibrator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้อีกด้วย

เอาท์พุทของมันมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ(สูงและต่ำ)ที่คงที่โดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณอินพุทใด ๆ ตามวงจรจะเห็นว่ามีเส้นทางป้อนกลับสัญญาณ 2 เส้นทาง กล่าวคือเส้นทางหนึ่งจากเอ้าท์พุทเข้าที่อินพุทแบบไม่กลับ ประกอบด้วย R_2 และ R_3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ที่อินพุทนั้น ส่วนอีกเส้นทางนั้นเป็นจากเอ้าท์พุทแบบกลับ ประกอบด้วย R_1 และ C ซึ่งเป็นตัวกำหนดความถี่ทำงานมูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณ

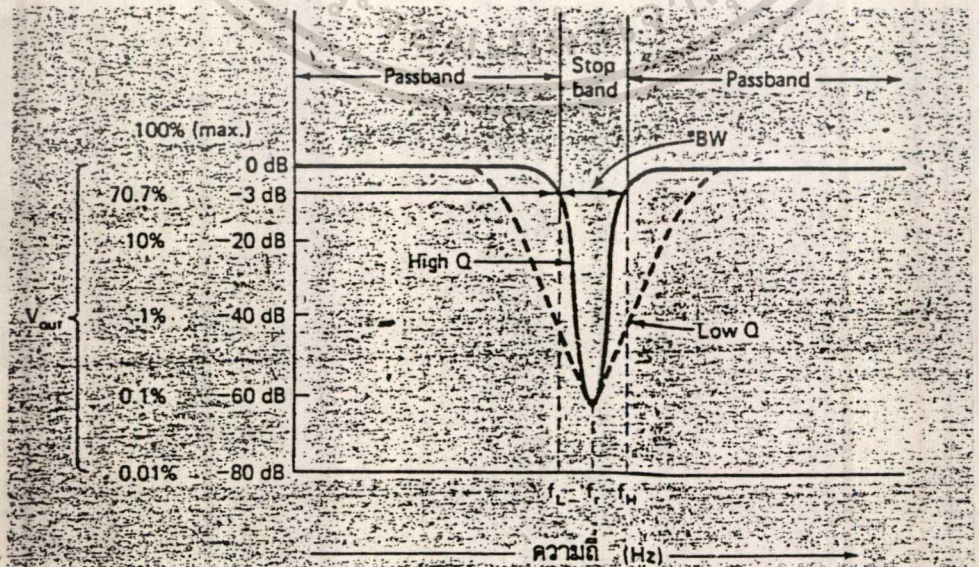
ถ้าหากเลือกค่า R_3 ให้มีค่าราว 86 % ของ R_2 แล้ว สามารถคำนวณหาความถี่โดยประมาณจากสูตร

$$f_{out} = 1/2R_1C$$

ในครั้งแรกเมื่อมีกำลังป้อนเข้าวงจร อินพุทแบบกลับจะเป็น 0 โวลท์ เพราะฉะนั้น V_{out} ก็จะมีค่าเท่ากับ $+V_{sat}$ และอินพุทแบบไม่กลับจะมีศักย์อยู่ที่แรงดันอ้างอิงเทรสโฮลด์ ($+V_T$) บวกจากนั้นตัวเก็บประจุเริ่มทำการประจุ $+V_{sat}$ ผ่านทาง R_1 ครั้นตัวเก็บประจุทำการประจุไปเรื่อย ๆ จนสูงกว่า $+V_T$ ที่อินพุทแบบไม่กลับเล็กน้อย การทำงานของวงจรเปรียบเทียบของออพแอมป์ จะทำให้เอ้าท์พุทออพแอมป์ เปลี่ยนสภาวะและมีแรงดันเป็น $-V_{sat}$ ในตอนนี้ V_{ref} ที่อินพุทแบบไม่กลับจะมีแรงดันเทรดโฮลด์ลบ ($-V_T$) ตัวเก็บประจุก็เปลี่ยนทิศทางการประจุของมันและเริ่มทำการประจุทาง $-V_{sat}$ ในทันทีที่ประจุของตัวเก็บประจุต่ำกว่า $-V_T$ ออพแอมป์จะเปลี่ยนการทำงานกลับไปอยู่สภาวะเดิม และ V_{out} จะมีค่าเท่ากับ $+V_{sat}$ เป็นการควบ Cycle และเริ่มทำงานใน Cycle ใหม่ซ้ำไปเรื่อย ๆ

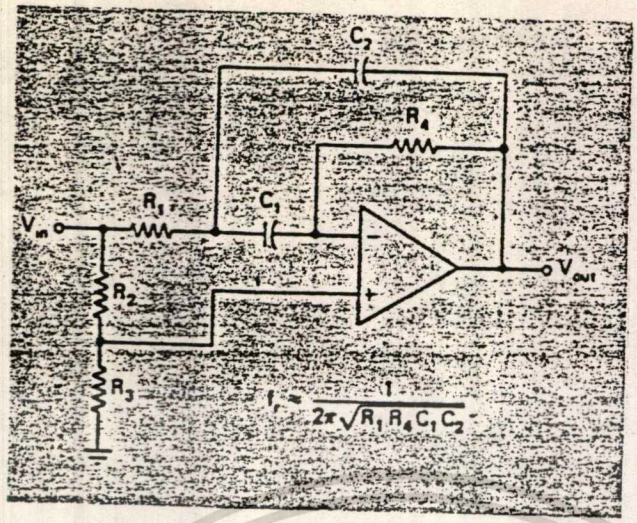
อนึ่งค่าแรงดันเทรดโฮลด์สามารถหาได้จากสูตร

$$^{+}V_T = 0.46(^{+}V_{sat}) \text{ เมื่อ } R_3 = 0.86\ R_2$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7 เส้นโค้งตอบสนองความถี่ของวงจรนอทช์ฟิลเตอร์



รูปที่ 8 แอคทีฟ นอทช์ ฟิลเตอร์

วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth)

"วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นฟันเลื่อย" (Sawtooth wave generator) ในบางครั้งอาจหมายถึง"วงจรกำเนิดแรงดัน Ramp" (Ramp voltage generator) ซึ่งคล้ายคลึงกับวงจรอินทิเกรเตอร์

การทำงานพื้นฐานของวงจรก็คือ แรงดันลบจำนวนหนึ่งที่อินพุทจะทำให้ตัวเก็บประจุทำการประจุในลักษณะแบบเชิงเส้นที่ $+V_{sat}$ ซึ่งในบางช่องของการทำงาน PUT (ทำงานเหมือนสวิทช์) จะต่อลัดวงจรชั่วขณะเพื่อคลายประจุตัวเก็บประจุ และทำ Cycle เดิมซ้ำทำให้ได้รูปคลื่นฟันเลื่อยที่เอาท์พุท แรงดัน V_{ref} และ V_p บางส่วนเป็นตัวกำหนดความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยมีตัวต้านทาน R_1 กับ R_2 ทำให้เกิดแรงดัน V_{ref} ไดโอด D_1 กับ D_2 ช่วยในการสเตบิไลซ์แรงดันคร่อม R_2 เมื่อปรับมันให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า V_{ref} ทั้งนี้จุด fire (V_p) ที่เกทของ PUT ปรับได้ด้วย R_4 เมื่อแรงดันคร่อม PUT (V_{AK}) สูงกว่า V_p แล้ว PUT จะ fire (หรือจำนวน) และเริ่ม Cycle ใหม่

ความถี่เอาท์พุทสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$f_{out} = \{ V_{out}/R_2 C_f \}(1/V_p - 0.5V)$$

จากการที่แรงดันอินพุทที่ส่วนเกี่ยวข้องกับ f_{out} ด้วยวงจรดังกล่าวนี้บางครั้งอาจเรียกว่าวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่ (Voltage to frequency converter) หรือวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage controlled oscillator) หรือ VCO

วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม

ตามปกติแล้ว "วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม" (Triangle wave generator) ต้องใช้ออพแอมป์ในการทำงานอย่างน้อยสองตัว

ลักษณะของวงจรพื้นฐานประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมต่อกับวงจรกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

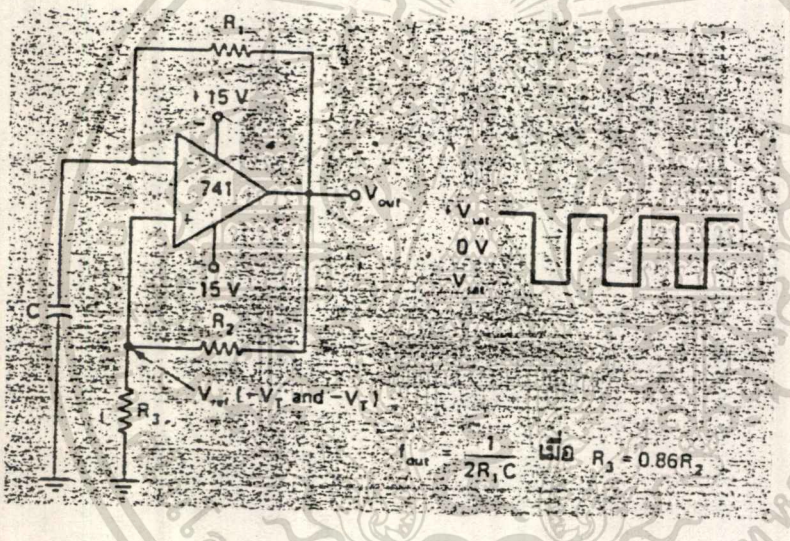
แรมพ์ที่เคยได้กล่าวมาแล้ว

เมื่อเอาท์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นบวก แล้วเอาท์พุทของวงจรกำเนิดแรมพ์เป็นลบ ในทำนองเดียวกันเมื่อเอาท์พุทของวงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นลบ แล้วเอาท์พุทของวงจรกำเนิดแรมพ์จะเป็นบวก

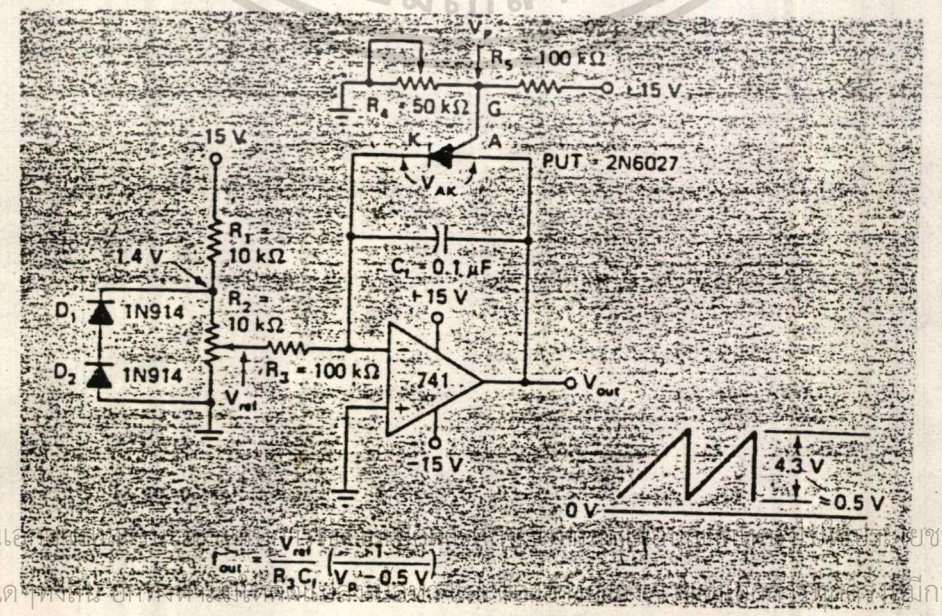
ความถี่ของเอาท์พุทวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมนี้เหมือนกับความถี่เอาท์พุทของวงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม อย่างไรก็ดีมันจำเป็นต้องมีค่าอาร์ซี-ไทม์ คอนสแตนท์ (R_4 กับ C_2) มากกว่าไทม์ คอนสแตนท์ ของ R_1 กับ C_1 ประมาณสองเท่าเพื่อป้องกันการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

สำหรับขนาดของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะใกล้เคียงกับ $^{+}V_{sat}$ ในขณะที่ขนาดของคลื่นสามเหลี่ยมหาได้จากวงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรกำเนิดสัญญาณ (ดังตัวอย่างนี้) ซึ่งกำเนิดรูปคลื่นเอาท์พุทแตกต่างกัน 2 ชุด หรือกว่านั้นในบางครั้งเรียกว่า "ฟังก์ชั่นเยนเนอเรเตอร์"(Function generator)

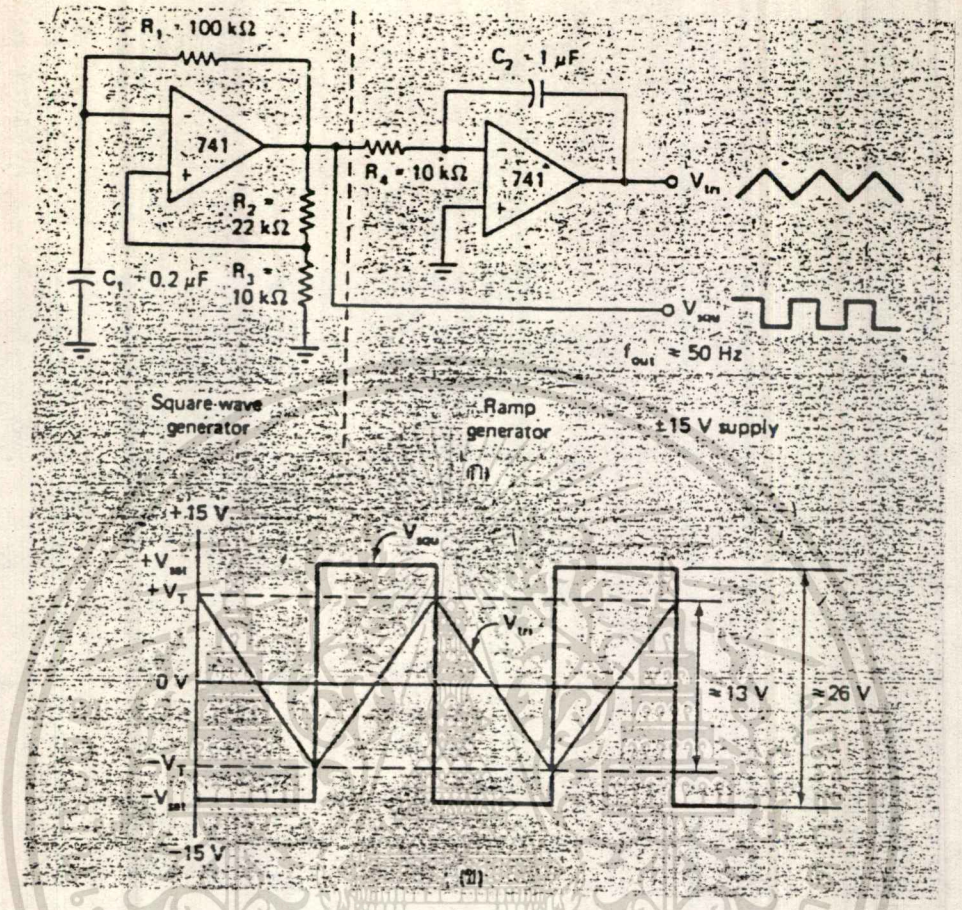


รูปที่ 9 วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยมพื้นฐาน



รูปที่ 10
วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม

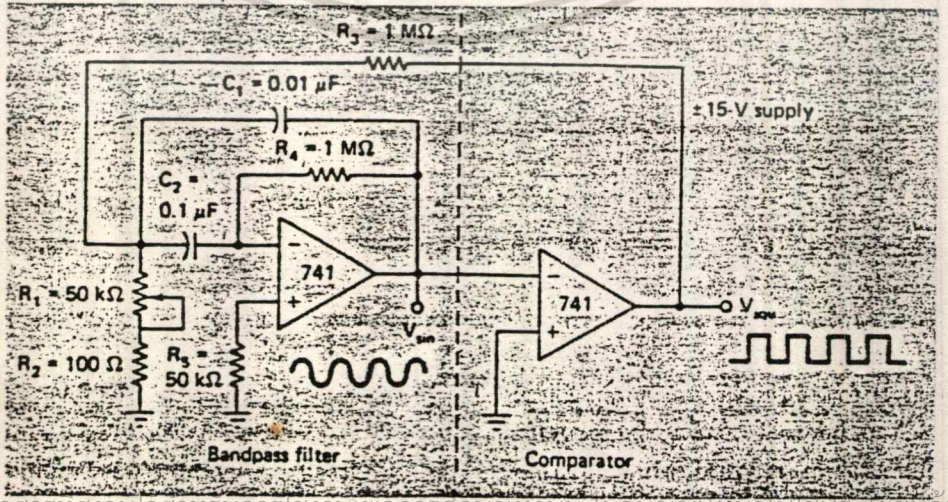
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้นำไฟล์ไปเผยแพร่ต่อ ไม่ว่าจะมีการนำไปใช้



รูปที่ 11 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมอย่างง่าย

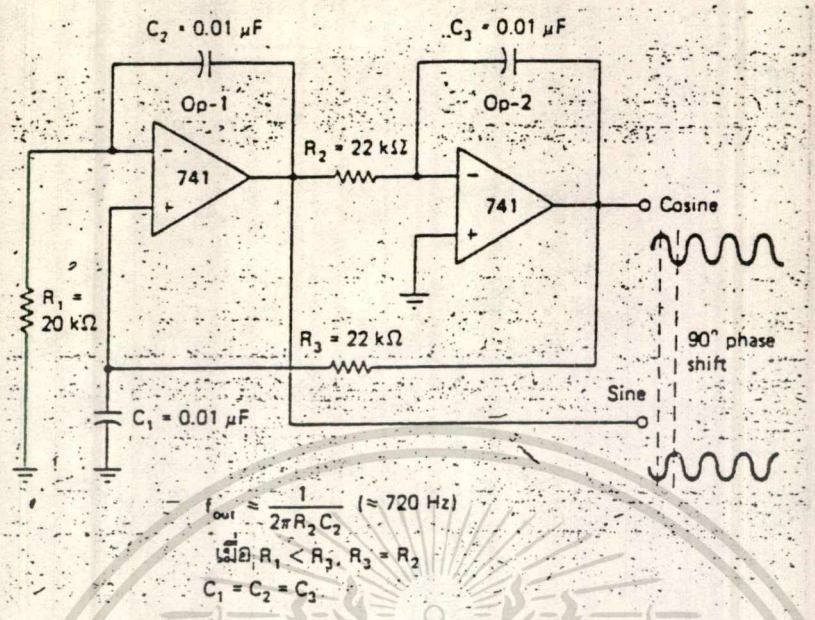
(ก) ลักษณะวงจรพื้นฐานประกอบด้วยสองวงจร

(ข) รูปคลื่นเอาท์พุท



รูปที่ 12 วงจรออสซิลเลเตอร์คลื่นชายน์ใช้ออพแอมป์ 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 วงจรควอดราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์พื้นฐาน

วงจรออสซิลเลเตอร์คลื่นซายน์

"วงจรออสซิลเลเตอร์คลื่นซายน์" (Sine wave oscillator) สามารถทำได้โดยใช้ออพแอมป์ 2 ตัว ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่เฉพาะแถบ BPF และอีกตัวหนึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันและจากการที่คลื่นสี่เหลี่ยมประกอบด้วยคลื่นซายน์และฮาร์โมนิคคี่ (Add hemonic) ของมันจึงต้องทำการกรอง(filter) คลื่นสี่เหลี่ยมจะเป็นคลื่นซายน์ แล้วจึงนำคลื่นซายน์ที่ได้จากวงจร BPF ป้อนเข้ายังวงจรเปรียบเทียบได้เอาท์พุทออกมาเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมก่อนป้อนกลับไปที่อินพุทของวงจร BPF เพื่อทำให้เกิดการออสซิลเลทและกำเนิดเป็นคลื่นซายน์มูลฐาน (Fundamental sine wave) ต่อไป

ความถี่เอาท์พุทสามารถหาได้จากสูตร

$$f_{out} = 1/2\pi\sqrt{R_p R_4 C_1 C_2}$$

เมื่อ $R_p = R_1+R_2/R_1+R_2$

ย่านความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์นั้นหากใช้อุปกรณ์ตามตัวอย่างในกราฟแล้วจะมีค่าประมาณ 7 ถึง 1.6 กิโลเฮิร์ท และสามารถปรับได้ด้วย R_1

วงจรนี้สามารถให้เอาท์พุท 2 ชุด โดยคลื่นซายน์ (V_{sin}) จากวงจร BPF และคลื่นสี่เหลี่ยม (V_{sqr}) จากวงจรเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอดราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์

"ควอดราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์" (Quadrature oscillater) เป็นวงจรกำเนิดเอาพุทคลื่นซายน์ 2 ชุด ที่ต่างเฟสกัน 90° โดยเอาท์พุทซายน์จากออพแอมป์ตัวที่ 1 และเอาท์พุทโคซายน์จากออพแอมป์ตัวที่ 2

โดยพื้นฐานแล้ว วงจรประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ชุดที่การป้อนกลับทางบวกทาง R และจากการที่วงจรอินทิเกรเตอร์มีการเลื่อนเฟส (Phase shift) 90° เอาท์พุทโคซายน์ที่ได้จึงมีเฟสต่างกับเอาท์พุทซายน์ 90°

ตัวต้านทาน R_1 นั้น ปกติมีค่าน้อยกว่า R_3 เล็กน้อยเพื่อให้แน่ใจว่าวงจรเกิดการออสซิลเลทได้ ถ้าหาก R_1 มีค่าน้อยเกินไปแล้วเอาท์พุทจะถูกขลิบยอดและมีลักษณะคล้ายกับคลื่นสี่เหลี่ยม ในที่นี้อาจใช้โพเท็นทิโอมิเตอร์ในการปรับแต่งในการผิดเพี้ยนของแรงดันเอาท์พุทให้ต่ำสุดได้ โดยแรงดันเอาท์พุทอาจถึงค่าการอิ่มตัว (saturate) ของออพแอมป์ด้วย และหากสภาวะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นมากแล้วอาจใช้ซีเนอร์ไดโอดสองตัวหันหน้าชนกันต่อคร่อม C_3 เพื่อกำจัดเอาท์พุท

เมื่อ $R_2 = R_3$ โดย $R_1 < R_3$ และ $C_1 = C_2 = C_3$ แล้วสามารถคำนวณหาความถี่เอ้าท์พุทได้ง่าย ๆ จากสมการ

$$f_{out} = 1/2\pi R_2 R_3$$

ฟังก์ชั่น เย็นเนอเรเตอร์

"ฟังก์ชั่นเย็นเนอเรเตอร์" (Function generator) ที่มี 3 เอาท์พุท (คลื่นซายน์ , คลื่นสี่เหลี่ยม และคลื่นสามเหลี่ยม) สามารถสร้างได้จากวงจรออพแอมป์พื้นฐาน

โดยการใช้วงจรกำเนิดคลื่นซายน์และสี่เหลี่ยมที่ได้อธิบายมาแล้วสำหรับ f_{out} เอาท์พุทคลื่นซายน์ได้จากเอาท์พุทของออพแอมป์ 1 และป้อนวงจรเปรียบเทียบเข้ากับวงจรโวลเตจ ฟอลโลเวอร์แบบไม่กลับเพื่อป้องกันการโหลดวงจรออสซิลเลเตอร์ และกระทบกระเทือนความถี่ของมัน สำหรับเอาท์พุทคลื่นสี่เหลี่ยมนั้นได้จากเอาท์พุทของออพแอมป์ 3 และจิงต่อเข้ากับวงจรอินทิเกรเตอร์ เพื่อกำเนิดเป็นเอาท์พุทคลื่นสามเหลี่ยมเอาท์พุทของออพแอมป์ 4

วงจรกำเนิดแบบนี้สามารถสร้างได้จากไอซีออพแอมป์เบอร์ 324 (14 ขาตีนตะขาบ) โดยมีขาต่าง ๆ ตามกำหนดไว้ในวงจรใช้แหล่งจ่ายกำลัง ±15 โวลท์ชุดเดียวซึ่งให้ขนาดแรงดันเอ้าท์พุทดังนี้

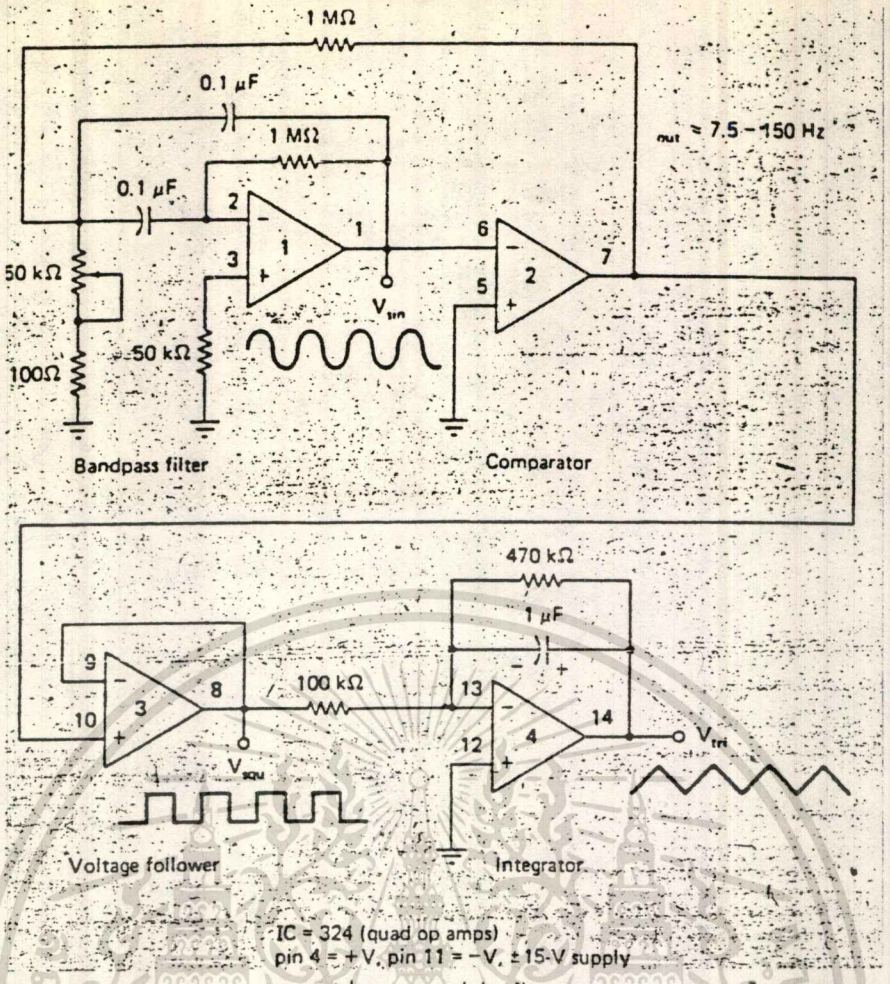
คลื่นสี่เหลี่ยม = 26 V_{p-p}

คลื่นซายน์ = 16 V_{p-p}

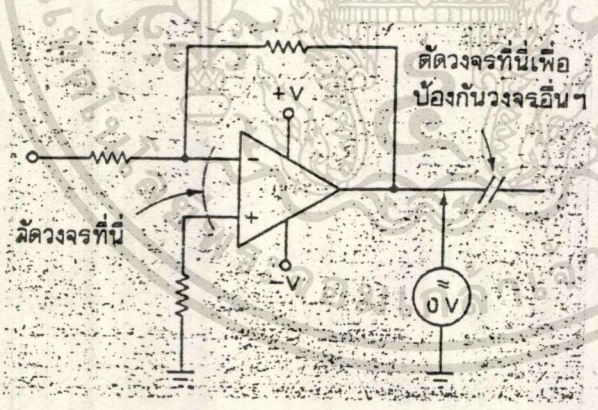
คลื่นสามเหลี่ยม = 0.3 - 6 V_{p-p} (ขึ้นอยู่กับ f_{out})

การปรับโพเท็นทิโอมิเตอร์ 50 กิโลโอมห์จะเปลี่ยนแปลงค่า f_{out} ได้ตั้งแต่ประมาณ 7.5 ถึง 150 เฮิร์ท ถ้าหากสุดค่าของตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัวลงจะทำให้ f_{out} เพิ่มขึ้นและหากมันมีค่าเท่ากันแล้วสามารถหาค่า f_{out} ได้ไม่ยาก

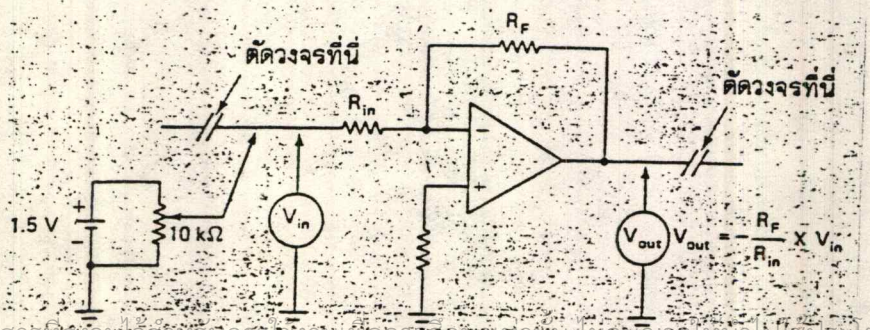
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14 วงจรกำเนิด 8 ฟังก์ชั่นความถี่ต่ำพื้นฐาน

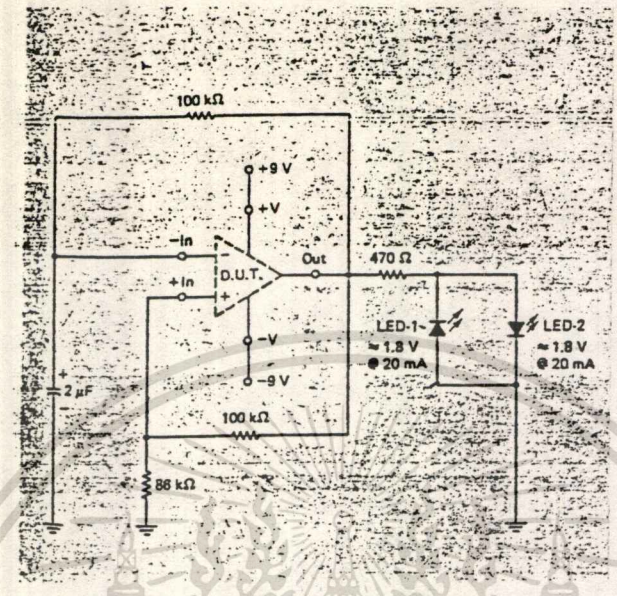


รูปที่ 15 การทดสอบแรงดันเอาท์พุทเป็นศูนย์เมื่อลัดวงจรอินพุท



รูปที่ 16 การทดสอบการขยายไฟตรงของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17

การทดสอบออพ-แอมป์

โดยทั่ว ๆ ไปมักใช้โวลท์มิเตอร์ในการทดสอบแรงดันไฟตรงของวงจรออพ-แอมป์ โดยควรตรวจสอบความถูกต้องของแรงดันแหล่งจ่ายที่ขา +V และ -V ของไอซี ถ้าหากค่าที่อ่านได้ไม่ถูกต้อง แสดงว่าไอซีอาจเสียแต่อย่างไรก็ดีแหล่งจ่ายกำลังอาจบกพร่องก็ได้ และวงจรอื่น ๆ อาจมีผลต่อกำลังของวงจรต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกัน

วิธีการอย่างหนึ่งในการทดสอบออพ-แอมป์ก็คือ การลัดวงจรอินพุทเข้าด้วยกัน ซึ่งมีผลทำให้แรงดันอินพุททั้งสองอินพุทเป็นศูนย์เพราะฉะนั้นแรงดันเอาท์พุทก็ตกลงเป็นศูนย์แต่ถ้าไม่เป็นไปตามนี้แสดงว่าออพ-แอมป์บกพร่อง อย่างไรก็ตามมีสิ่งที่ควรระวัง 2-3 ข้อหากตรวจสอบด้วยเทคนิคดังกล่าวนี้คือ

1. ต้องให้แน่ใจว่าขาอุปกรณ์ที่กำลังลัดวงจรนั้นเป็นขาอินพุท เพราะหากเป็นขาอื่น ๆ อาจทำให้ไอซีเสียหายได้

2. ถ้าออพ-แอมป์มีเอาท์พุทต่อคัฟเพิ้ลโดยตรงกับวงจรอื่น ๆ อยู่ให้ตัดออกก่อนเพื่อว่าวงจรที่ตามมาจะได้ไม่เสียหายจากการทดสอบที่อาจเกิดขึ้นได้

3. การทดสอบนี้ควรใช้เฉพาะวงจรที่ใช้แหล่งจ่ายกำลัง 2 ขั้ว

อัตราขยายไฟตรงของวงจรขยายใช้ออพ-แอมป์ สามารถทดสอบได้ด้วยการตัดวงจรอินพุทและเอาท์พุท แล้วใส่แรงดันไฟตรงเล็กน้อยจำนวนหนึ่งเข้าที่อินพุท (แรงดันอินพุทไฟตรงอาจเป็นจากแบตเตอรี่ 1.5 โวลท์ ที่มีโพเท็นทิโอมิเตอร์ 10 กิโลโอมห์คร่อมมัน) จากนั้นก็สามารถหาอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากสูตรเมื่อตรวจดูแรงดันเอาท์พุทด้วยโวลท์มิเตอร์

ในการรวจสอบสัญญาณที่ผ่านวงจรออพ-แอมป์นั้นหากมีออสซิลโลสโคปใช้แล้วจะเหมาะมาก โดยนำออสซิลโลสโคปไปจับสัญญาณจากอินพุทไปเอาท์พุทของออพ-แอมป์แต่ละตัวจนกระทั่งพบวงจรที่เสีย

ในรูปที่ 17 เป็นตัวอย่างวงจรตรวจสอบออพ-แอมป์แบบแสดงผลด้วย LED ว่าดีหรือไม่โดยอัตโนมัติ (LED GO/NO GO op-amp checker) ที่สร้างไว้ใช้ได้เองง่าย ๆ สามารถใช้ทดสอบไอซีใหม่ ๆ หรือที่ถอดออกจากวงจรแล้ว

วงจรประกอบด้วย ภาคกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ต่ำชุดหนึ่ง กับ ไดโอดเปล่งแสง (LED) สองตัวต่อกลับทางกันต่อเข้าที่เอาท์พุทของอุปกรณ์ที่จะทดสอบ (D.U.T.)

เมื่อใช้งานเอาท์พุทของออพ-แอมป์ควรจะแกว่งกลับไปกลับมาระหว่างบวกและลบซึ่งทำให้ LED_1 และ LED_2 ติดตามลำดับ

ถ้าหาก LED ตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งสองตัวไม่ติด ก็แสดงว่าออพ-แอมป์มีปัญหาภายในตัวมันซึ่งอาจขาดได้

การใช้งานไอซีโวลท์เตจคอมพาราเตอร์

การใช้งานของไอซีเปรียบเทียบแรงดันจะประกอบด้วย วงจรเปรียบเทียบที่มีฮีสเทอรีซีส (Hysteresis) ทั้งแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส และวงจรออสซิลเลเตอร์ รวมทั้งตัวอย่างวิธีการออกแบบวงจรดังกล่าว

ในรูปที่ 1ก. เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันอย่างง่าย และในรูปที่ 1ข. เป็นความสัมพันธ์ระหว่างศักดาที่เอาท์พุทกับอินพุทของวงจรเปรียบเทียบในรูปที่ 1ก. ในขณะที่อินพุทมีศักดาศูนย์โวลท์ ศักดาที่เอาท์พุทก็จะมีค่าเท่ากับแรงไฟที่เลี้ยงวงจร V_{cc} (จุด A ในรูปที่ 1ข.) ถ้าเพิ่มค่าของศักดาอินพุทไปเรื่อย ๆ (ตามเส้นทาง A-->B) เมื่อศักดาอินพุทมีค่าเพิ่มขึ้นจนมากกว่าศักดาอ้างอิง V_T ที่เอาท์พุทก็จะมีการเปลี่ยนสถานะ(จุด B) คือกลายเป็นมีศักดาเกือบเท่ากับกราวด์ตราบเท่าที่ศักดาอินพุทมีค่ามากกว่าศักดาอ้างอิง V_T (จากจุด B-->C)จุดที่วงจรเปรียบเทียบมีการเปลี่ยนสถานะนี้เรียกว่าเทรสโฮลด์ (THRESHOLD) เนื่องจากกระแสอินพุทไบอัสของไอซีเปรียบเทียบแรงดัน (I_{in}) มักจะมี

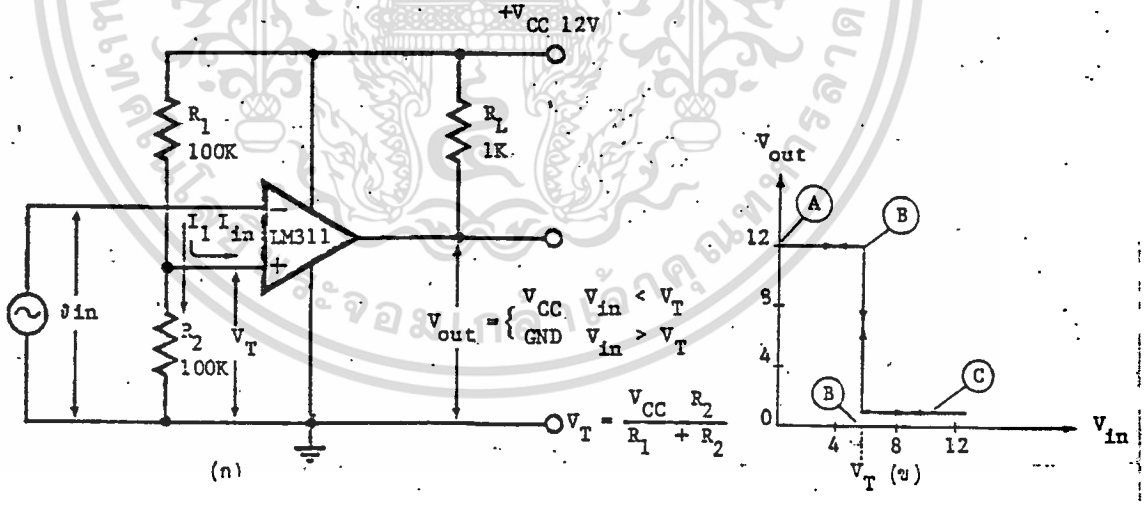
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำมากคือ ไม่เกิน 250 นาโนแอมป์ (250×10^{-9}A) ซึ่งจะต่ำกว่ากระแสที่ไหลผ่าน R_1 และ R_2 (i หลายเท่า ดังนั้นศักดาอ้างอิง V_r จะมีค่าเป็น

$$V_r = V_{cc} [R_2/R_1+R_2] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 1$$

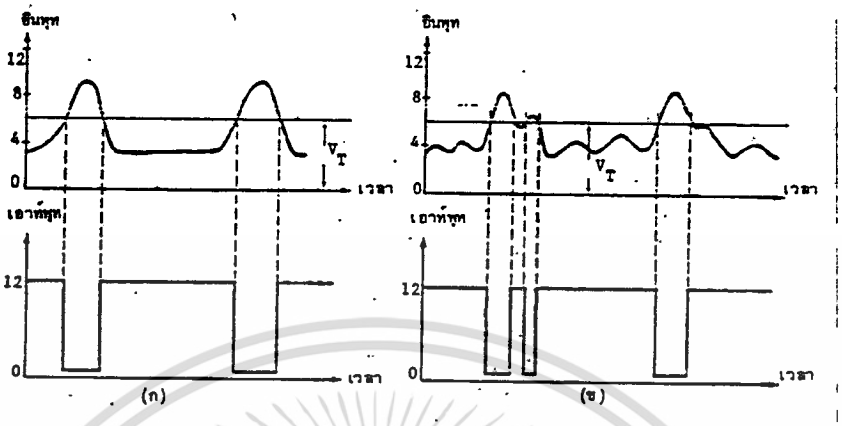
ในทางตรงข้ามถ้าเราป้อนอินพุทให้กับวงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็น 12 โวลท์เอ้าท์พุทก็จะมีศักดาเกือบเท่ากับกราวด์เมื่อค่อย ๆ ลดค่าศักดาอินพุท V_{in} ลงมาเรื่อย ๆ (เริ่มจากจุด C-->B) เมื่ออินพุทมีศักดาน้อยกว่าศักดาอ้างอิง V_r เอาท์พุทก็จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นมีศักดาเท่ากับไฟเลี้ยงวงจร (จุด B) ตราบเท่าที่ศักดาที่อินพุทน้อยกว่าศักดาอ้างอิง V_r นั่นคือไม่ว่าอินพุทจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะใด กล่าวคือไม่ว่าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นหรือค่อย ๆ ลดลง จุดที่เอาท์พุทมีการเปลี่ยนสถานะ (V_r) จะมีค่าเท่าเดิมเสมอ

ประโยชน์อย่างหนึ่งของวงจรเปรียบเทียบแรงดันคือใช้เปลี่ยนสัญญาณอนาลอกที่มีขนาดต่ำ ๆ ให้เป็นพัลส์เพื่อให้สามารถป้อนเข้าสู่วงจรดิจิตอลได้ โดยทั่วไปสัญญาณอนาลอกที่ได้จากทรานซ์ดิวเซอร์ชนิดต่าง ๆ เช่นจากโฟโตไดโอดมักจะมีสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามาเสมอ ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ 2 รูปเป็นลักษณะของสัญญาณที่ถูกต้อง ส่วนในรูป(ข) แสดงให้เป็นรูปร่างสัญญาณที่ปรากฏจริง ซึ่งมีสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามา จะเห็นว่ามีพัลส์เกินมา 1 ลูก การแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว อาจจะกระทำได้โดยการออกแบบให้วงจรเปรียบเทียบแรงดันมีฮิสเทอรีซีส(HYSTERESIS) ซึ่งจะได้นำมาอธิบายดังต่อไปนี้

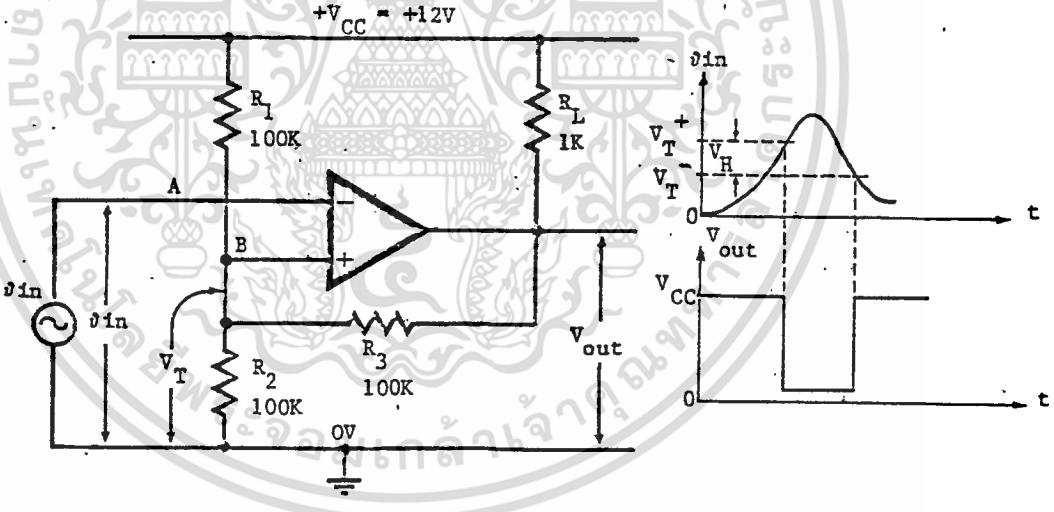


รูปที่ 1 วงจรเปรียบเทียบแรงดันกลับเฟสอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 (ก) สัญญาณที่ถูกต้อง (ข) มีสัญญาณรบกวนเข้ามาปะปนทำให้เกิดการผิดพลาด



รูปที่ 3 วงจรเปรียบเทียบแรงดันกลับเฟสแบบมีฮีสเทอรีซิส

ในรูปที่ 3 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบมีฮีสเทอรีซิสซึ่งมีลักษณะวงจรคล้ายกับวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบพื้นฐานมาก โดยการเพิ่มความต้านทาน R_3 เข้าอีก 1 ตัวซึ่งจะทำให้เกิดการป้อนกลับแบบบวกขึ้น ค่าของความต้านทาน R_3 นี้จะต้องอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า จะต้องมีค่าสูงกว่า R_L มาก (อย่างน้อย 10 เท่า)

$$R_3 > R_L \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2$$

สมมติว่าค่าของความต้านทานต่างๆเป็นดังในรูปที่ 3 เราจะทำการเริ่มต้นวิเคราะห์ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของวงจร โดยในครั้งแรกจะให้ศักดาอินพุท v_{in} มีค่าเป็น 0 โวลท์ก่อนในขณะนี้ศักดาที่ขาอินเวิร์ทติ้งอินพุท(จุดA) จะต้องมีค่าน้อยกว่าศักดาที่ขานอนอินเวิร์ทติ้งอินพุท(จุดB) ดังนั้นศักดาที่เอ้าท์พุทจะต้องมีสถานะเป็นมีศักดาเท่ากับแรงไฟที่เลี้ยงวงจร ทำให้เป็นเสมือนหนึ่งว่า R_3 ต่อขนานอยู่กับ R ดังในรูปที่ 4 และทำให้เราได้ว่า

$$V_{r+} \cong V_{cc}[R_3 / R_1//R_3+R_2]$$

$$= V_{cc}[R_1R_3 + R_2R_3 / R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3].....3$$

นั่นคือในขณะนี้ศักดาอ้างอิง V_{r+} หรือจุดเทรสโฮลด์ของวงจรเปรียบเทียบจะมีค่าเป็นดังสมการที่ 3 จากค่าของความต้านทานในรูปที่ 3 ($R_1=R_2=R_3=$ 100K) จะได้ค่าของศักดาอ้างอิง V_{r+} ในขณะนี้เป็น 8 โวลท์ เมื่อศักดาอินพุท v_{in} ค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆจนมีค่ามากกว่า 8 โวลท์ ที่เอ้าท์พุทจะเปลี่ยนสถานะศักดาที่เอ้าท์พุทจะมีค่าใกล้เคียงกับกราวน์ การที่เอ้าท์พุทมีการเปลี่ยนสถานะทำให้ศักดาอ้างอิง V_{r+} มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเนื่องจากในตอนแรกในขณะที่ศักดาอินพุทน้อยกว่า 8 V ศักดาที่เอ้าท์พุทมีค่าเท่ากับแรงไฟที่เลี้ยงวงจร V_{cc} (12 โวลท์) R_3 เสมือนต่อขนานอยู่กับ R_1 เมื่อศักดาที่เอ้าท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงเป็นกราวน์ด์ R_3 ก็จะเสมือนต่อขนานอยู่กับ R_1 ดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า

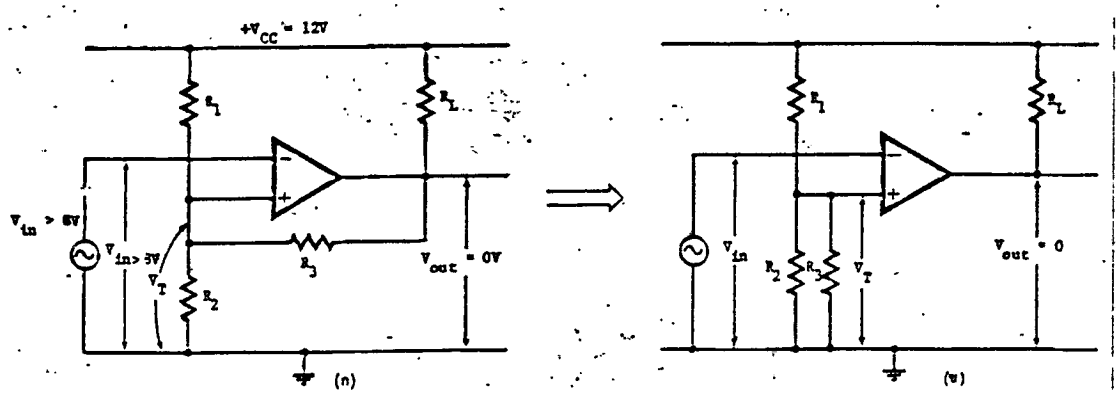
$$Vr+ = V_{cc}[R_2//R_3 / R_1+(R_2//R_3)]$$

$$= V_{cc}[R_2R_3 / R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3].....4$$

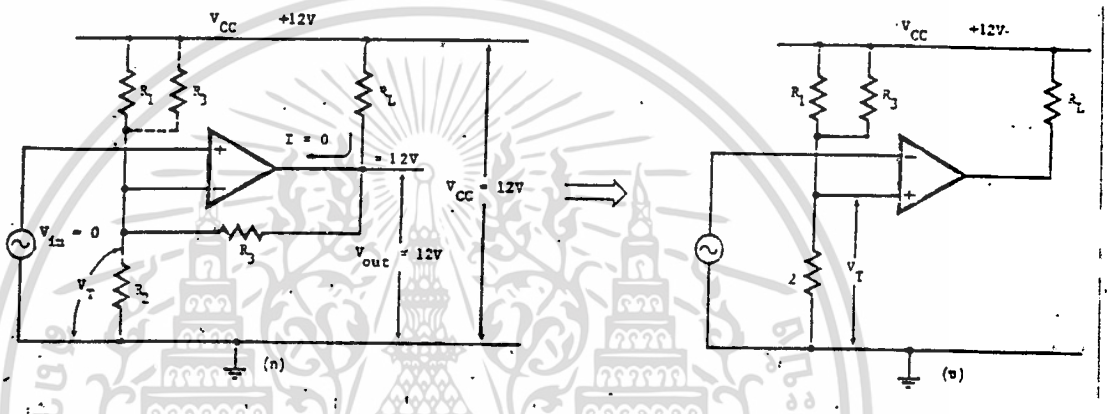
จะเห็นได้ในขณะนี้ศักดาอ้างอิง V_{r-}ของวงจรเปรียบเทียบจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมถ้า $R_1=R_2=$ 100K จะได้ V_{r-}ค่าเป็น 4 โวลท์ ในตอนแรกเมื่ออินพุทมีศักดาเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าศักดาอ้างอิง V_{r+}(8 โวลท์) เอ้าท์พุทจะเปลี่ยนสถานะเมื่อเอ้าท์พุทมีการเปลี่ยนสถานะศักดาอ้างอิง V_{r+}ของวงจรเปรียบเทียบจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น V_{r-} เมื่อศักดาอินพุทมีค่าต่ำลงมาเรื่อยจนมีค่าต่ำกว่า V_{r-} (4 โวลท์) ที่เอ้าท์พุทจึงจะเปลี่ยนสถานะอีกครั้งหนึ่ง ศักดาอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบก็จะเปลี่ยนแปลงจาก V_{r-} มาเป็น V_{r+} อีกครั้งหนึ่งนั่นคือ ศักดาอ้างอิง V_r ของวงจรเปรียบเทียบจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับสภาวะของอินพุทว่าในขณะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะใด ซึ่งจะเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอ้าท์พุทได้ดังในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นการสรุปคุณสมบัติในการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่มีฮีสเทอรีซีสได้ดังนี้

จากรูปที่ 6 ก. ในขณะที่อินพุทมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีศักดาเพิ่มขึ้นศักดาอ้างอิงที่ทำให้วงจรเปลี่ยนสถานะจะมีค่าเป็น V_{r+} ซึ่งเราเรียกว่า Positive going Threshold (ABC) และเมื่ออินพุทมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีศักดาลดลง ศักดาอ้างอิงที่ทำให้วงจรเปลี่ยนสถานะจะมีค่าเป็น V_{r-} ซึ่งเรียกว่า Negative going Threshold (CDA) ผลต่างของ V_{r+} กับ V_{r-} เรียกว่าฮีสเทอรีซีสโวลท์เตจ V_H (Hysteresis Voltage) ซึ่งเป็นช่วงที่วงจรเปรียบเทียบจะไม่ยอมรับการเปลี่ยนแปลงของอินพุทหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าวงจรจะไม่มีการเปลี่ยนสถานะถ้าอินพุทมีศักดาอยู่ในช่วง V_{r+} ถึง V_{r-} ซึ่งเราเรียกช่วงนี้ได้อีกอย่างหนึ่งว่า Dead Zone ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดี

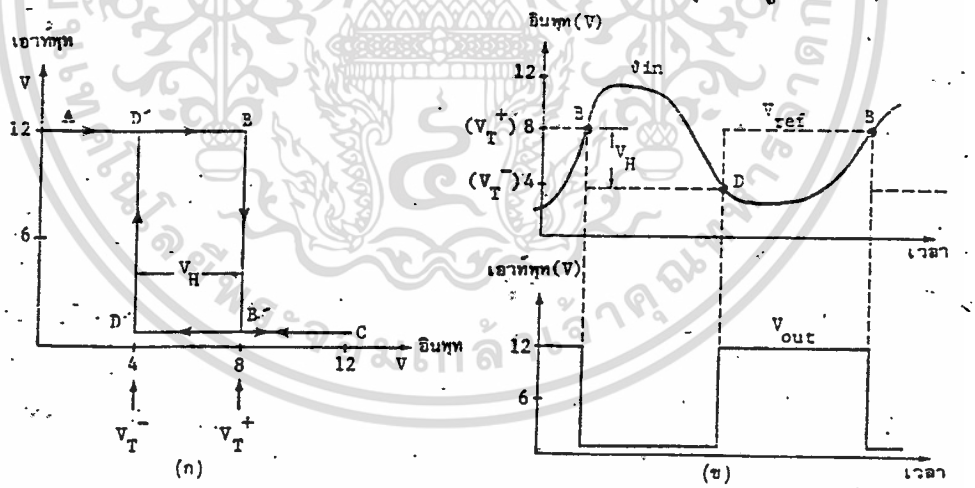
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

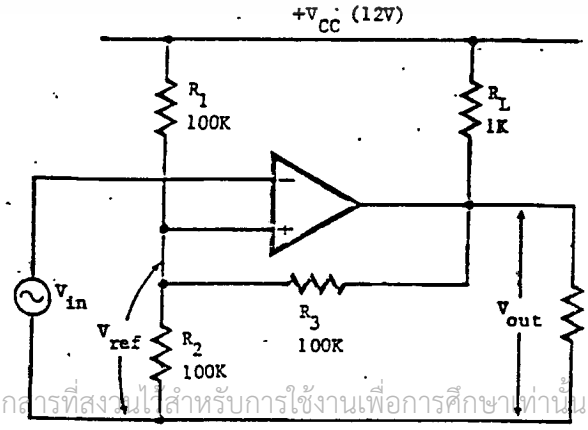


รูปที่ 4 แสดงวงจรเปรียบเทียบที่มีฮีสเทอรีซีสในขณะที่ศักดาอินพุทมีค่าต่ำกว่า V_T



รูปที่ 5 แสดงวงจรเปรียบเทียบที่มีฮีสเทอรีซีสในขณะที่ศักดาอินพุทมีค่าสูงกว่า V_T





เงื่อนไข $R_3 \geq 10\ R_L$ และ $R_{LOAD} >> R_L$

จะได้

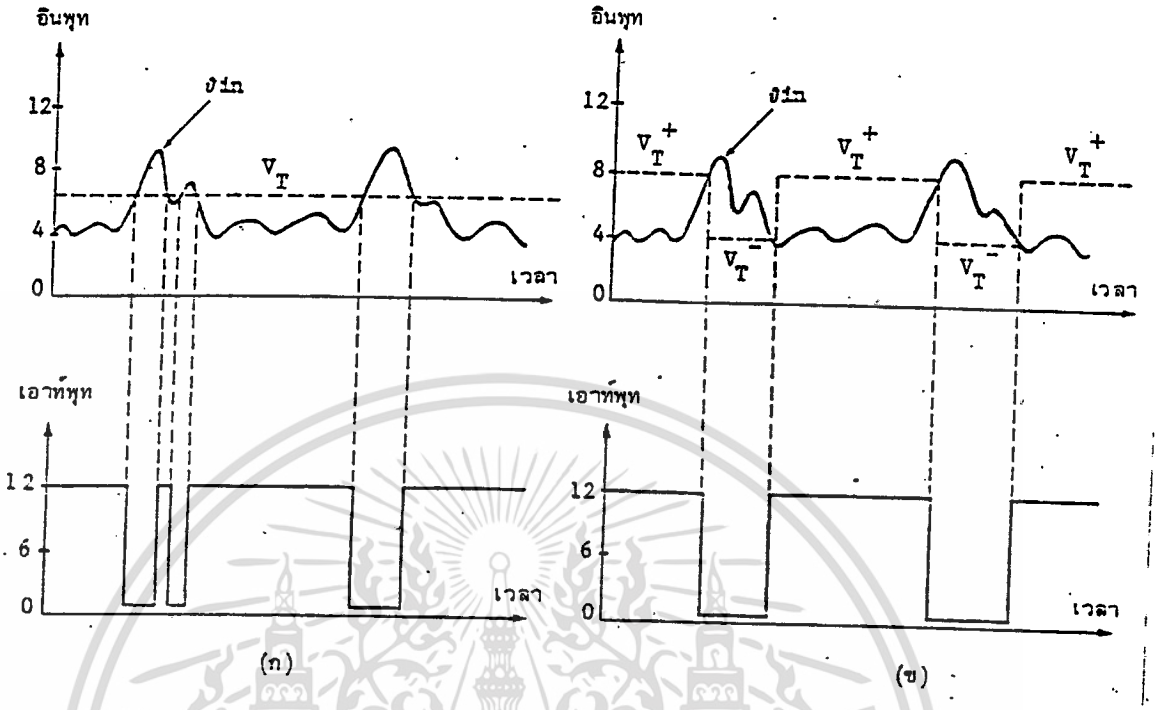
$$V_T^+ = V_{CC}\left[\frac{R_1R_2 + R_2R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}\right]$$

$$V_T^- = V_{CC}\left[\frac{R_2R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}\right]$$

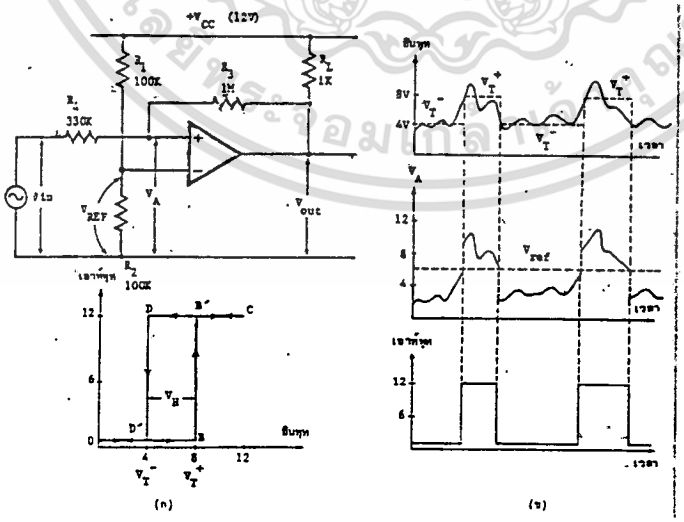
$$V_H = V_T^+ - V_T^- = V_{CC}\left[\frac{R_1R_2}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6 แสดงการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบมีฮีสเทอรีซีส

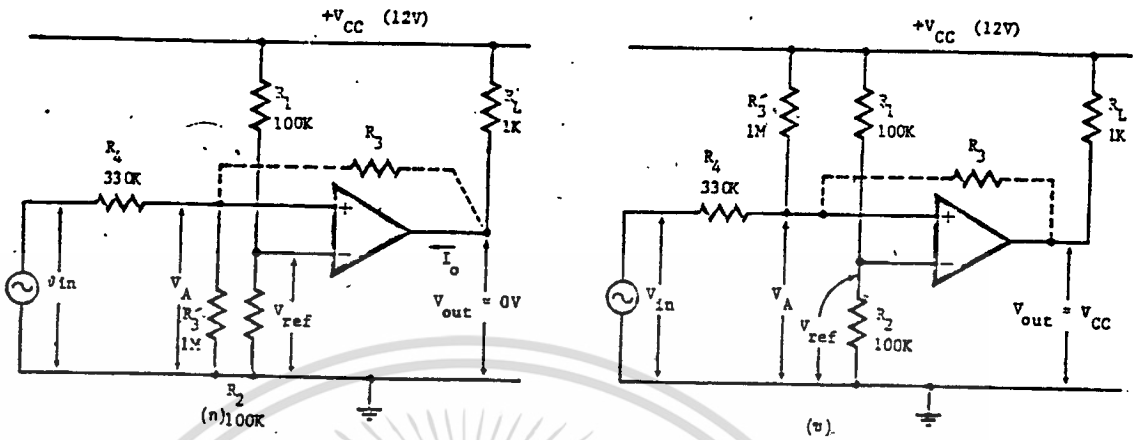


รูปที่ 7 เปรียบเทียบการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแบบไม่มีฮีสเทอรีซีสกับแบบที่มีฮีสเทอ
ก) การทำงานของวงจรเปรียบเทียบธรรมดา (จากวงจรในรูปที่ 1)
ข) การทำงานของวงจรเปรียบเทียบแบบมีฮีสเทอรีซีส (จากวงจรในรูปที่ 6)



รูปที่ 8 วงจรเปรียบเทียบไม่กลับเฟสแบบมีฮีสเทอรีซีส
ก) วงจรและความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุท
ข) การทำงานของวงจร

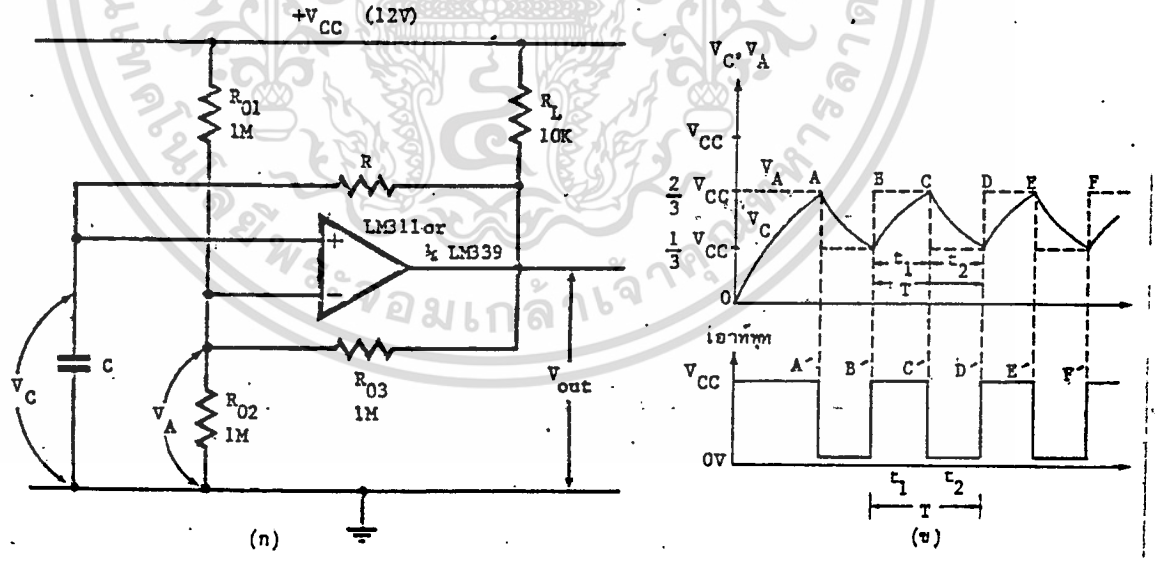
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบไม่กลับเฟสแบบมีฮีสเทอรีซีส

ก) วงจรทัดเทียมในขณะที่อินพุทมีศักดาต่ำกว่า V_{T+}

ข) วงจรทัดเทียมในขณะที่อินพุทมีศักดามากกว่า V_{T-}



รูปที่ 10 การนำไอซีโวลท์เตจคอมพาราเตอร์ไปใช้งานเป็น R-C ออสซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 7 ก. แสดงการทำงานของวงจรเปรียบเทียบธรรมดาซึ่งมีโอกาสที่จะให้เอ้าท์พุทที่ผิดพลาดได้เมื่อมีสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามา (ดูรูปที่ 2) แต่เราสามารถที่จะแก้ปัญหาอันเกิดจากสัญญาณรบกวนได้โดยการใช้วงจรเปรียบเทียบที่มีฮีสเทอรีซีส ดังในรูปที่ 7 ข. ซึ่งแสดงให้เห็นการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแบบมีฮีสเทอรีซีสสามารถป้องกันวงจรทำงานผิดพลาดอันเนื่องจากสัญญาณรบกวนได้ วงจรเปรียบเทียบแบบมีฮีสเทอรีซีสนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรชมิทท์ทริกเกอร์ (Schmitt Trigg

ในรูปที่ 8 เป็นวงจรเปรียบเทียบไม่กลับเฟสแบบมีฮีสเทอรีซีส ซึ่งทำงานโดยอาศัยการป้อนกลับแบบบวกเหมือนกับวงจรเปรียบเทียบกลับเฟส แบบมีฮีสเทอรีซีส ส่วนที่แตกต่างกันระหว่างวงจรเปรียบเทียบเฟสแบบมีฮีสเทอรีซีสกับแบบไม่กลับเฟส คือในวงจรเปรียบเทียบกลับเฟส ผลการป้อนกลับแบบบวกจะทำให้ศักดาอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบเปลี่ยนแปลงไปตามภาวะของอินพุทเป็น V_{r+} และ V_{r-} ซึ่งทำให้เกิดฮีสเทอรีซีสลูปขึ้น (Hysteresis Loop) คือ D' B B' D ในรูปที่ 6 ก. ส่วนวงจรเปรียบเทียบไม่กลับเฟสแบบมีฮีสเทอรีซีสนั้น ผลของการป้อนกลับแบบบวกจะไปเสริมกับศักดาอินพุททำให้เกิดฮีสเทอรีซีสลูป (D' B B' D ในรูปที่ 8 ก.) แต่ศักดาอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบจะมีค่าคงที่

ภายใต้เงื่อนไขเดิมคือค่าของ R_1 จะต้องมีค่ามากกว่า R_L มาก ๆ จากรูปที่ 8 ก. ศักดาอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบ V_{ref} มีค่าเป็น

$$V_{ref} = V_{cc}[R_1/R_1+R_2] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 5$$

สมมุติว่าศักดาอินพุทมีค่าเป็นศูนย์เอ้าท์พุทก็จะมีศักดาเกือบเท่ากับกราวด์ (จุด A ในรูปที่ 8 ก.) จะได้ว่า R_3 จะเสมือนต่ออยู่ระหว่างขานอนอินเวิร์ทติ้งอินพุทกับกราวด์ดังในรูปที่ 9 ก. ซึ่งจะเกิดเป็นวงจรโวลท์เดจดีไวเดอร์ของ R_4 กับ R_3 ขึ้น ถ้าอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรเปรียบเทียบมีค่าสูงมาก จะได้ว่าในขณะนี้ศักดาที่ขานอนอินเวิร์ทติ้งอินพุทของวงจรเปรียบเทียบ V_A จะมีค่าเป็น

$$V_A = v_{in}[R_1/R_4+R_3] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 6$$

จะเห็นว่าศักดา V_A มีค่าน้อยกว่าศักดาอินพุท v_{in} เสมอ เมื่อศักดาอินพุทมีค่าค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นจนทำให้ศักดา V_A มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าศักดาอ้างอิง V_{ref} วงจรก็จะเปลี่ยนสถานะ (จุด B ในรูปที่ 8 ก.) ค่าของศักดาอินพุท v_{in} ที่ทำให้วงจรเปลี่ยนสถานะในขณะนี้ก็คือ V_{r+} ของวงจรนั่นเอง ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังนี้ ณ จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงได้

$$V_A > V_{ref} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 7$$

แทนค่า V_A จากสมการ (6) และ V_{ref} จากสมการ (5) จะได้

$$v_{in}[R_1/R_4+R_3] = V_{cc}[R_2/R_1+R_2] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 8$$

ซึ่ง v_{in} ในขณะนี้ก็คือค่าของ V_{r+} นั่นเอง จากสมการ (8) หาค่า V_{in} จะได้

$$V_{r+} = v_{in} = V_{cc}[R_2/R_1+R_2][R_4+R_3/R_3] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 9$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวงจรมีการเปลี่ยนสถานะไปแล้ว (เมื่ออินพุท v_{in} มีค่ามากกว่า V_{r+}) ในขณะนี้ศักดาที่เอาท์พุทมีค่าเท่ากับแรงไฟที่เลี้ยงวงจร (จุด B-C ในรูปที่ 8 ก.) ดังนั้น R_3 จึงเสมือนต่ออยู่ระหว่างขานอนอินเวิร์ทติ้งอินพุทกับแหล่งจ่ายไฟ V_{cc} ดังรูปที่ 9 ข. ซึ่งจะได้ศักดา V_A ที่ขานอนอินเวิร์ทติ้งอินพุทเป็นผลบวกของโวลท์เตจดีไวเดอร์ของ v_{in} กับ V_{cc}

$$V_A = v_{in}[R_3/R_3+R_4] + V_{cc}[R_4/R_3+R_4] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 10$$

และการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$V_A < V_{ref} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 11$$

$$v_{in}[R_3/R_3+R_4] + V_{cc}[R_4/R_3+R_4] = V_{ref} \quad \ldots\ldots\ldots 12$$

ในทำนองเดียวกันกับการคำนวณหา V_{r+} v_{in} ในขณะนี้ก็คือ V_{r-} จะได้ $V_{r-}=v_{in}=V_{ref}$

$$V_{r-} = V_{ref}[R_3+R_4/R_3] - V_{cc}\ R_4/R_3 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 13$$

ซึ่งในตอนหลังนี้ศักดา V_A จะถูกเสริมด้วยศักดาจากเอาท์พุทโดยมี R_3 เป็นตัวทำให้เกิดการป้อนกลับแบบบวกขึ้น (เทอมหลังของด้านขวามือในสมการ 10) แทนค่า V_{ref} จากสมการ (5)

ลงในสมการ (13) จะได้

$$V_{r-} = V_{cc}[R_3/R_1+R_3][R_3+R_4/R_3] - V_{cc}\ R_4/R_3 \quad \ldots\ldots\ldots 14$$

ในรูปที่ 8 ข. แสดงให้เห็นศักดาที่จุดต่าง ๆ ในวงจร จะเห็นได้ว่าศักดา V_A ที่ขานอนอินเวร์ทติ้งอินพุทของวงจรเปรียบเทียบ (รูปกลาง) จะมีการกระโดดตามจังหวะที่วงจรมีการเปลี่ยนสถานะในขณะที่เอาท์พุทมีศักดาเป็นกราวด์ ศักดา V_A จะเป็นโวลท์เตจดีไวเดอร์ของ v_{in} ดังสมการที่(6) และเมื่อเอาท์พุทเปลี่ยนสถานะไปเป็นมีศักดาเท่ากับแรงไฟที่เลี้ยงวงจร V_{cc} ศักดา V_A ก็จะมีค่าเป็นผลบวกของโวลท์เตจดีไวเดอร์ของ v_{in} กับโวลท์เตจดีไวเดอร์ของศักดาที่เอาท์พุท ดังในสมการที่ 10

การใช้ไอซีโวลท์เตจคอมพาราเตอร์เป็นออสซิลเลเตอร์

การนำไอซีโวลท์เตจคอมพาราเตอร์มาใช้งานเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ ทำได้โดยการต่อวงจรดังในรูปที่ 10 โดยทางด้านขานอนอินเวิร์ทติ้งอินพุทได้รับการป้อนกลับแบบบวกโดยผ่านทาง R_3 และยังเป็นตัวทำให้เกิดมีฮีสเทอรีซีสดังได้กล่าวมาแล้วด้วย เมื่อเริ่มปล่อยไฟเลี้ยงวงจรครั้งแรก ศักดาที่คร่อมคาพาซิเตอร์ C V_c จะมีค่าเป็นศูนย์โวลท์ ในขณะนี้ที่เอาท์พุทก็จะมีศักดาสูงเท่ากับ V_{cc} ทำนองเดียวกับวงจรเปรียบเทียบกลับเฟสที่มีฮีสเทอรีซีสที่อธิบายไปแล้วโดยเงื่อนไขเดิมคือ ค่าของ R_3 และ R จะต้องมีค่ามากกว่า R_1 มาก ๆ จะได้ศักดา V_A ในขณะนี้ค่าเป็นดังสมการที่(8) คือ 8 โวลท์คาพาซิเตอร์ C จะเริ่มประจุโดยผ่านทาง R_1 และ R ศักดา V_c ก็จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับ 8 โวลท์ (V_A) เอาท์พุทของวงจรก็จะเปลี่ยนสถานะมีศักดาต่ำใกล้เคียงกับกราวด์(จุด A) เมื่อเอาท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พุทเปลี่ยนสถานะไปแล้ว ในขณะนี้ศักดา V_c จะมีค่าสูงกว่าศักดาที่เอ้าท์พุท คาพาซิเตอร์ก็จะคายประจุผ่าน R ลงกราวด์โดยผ่านทางเอาท์พุททรานซิสเตอร์ ภายในไอซีคอมพาราเตอร์ ในขณะเดียวกันศักดา V_A ก็จะมีค่าลดลงเป็น 4 โวลท์ ทำนองเดียวกับวงจรเปรียบเทียบ(สมการที่ 4) ศักดาคร่อม C จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จน V_c มีค่าเท่ากับ 4 โวลท์(V_A) เอาท์พุทก็จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นมีศักดาสูงเท่า V_{cc} ใหม่(จุด B) C ก็จะเริ่มมีประจุใหม่จนมีศักดา V_c เป็น 8 โวลท์หรือ2/3 ของ V_{cc} เอาท์พุทก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นศักดาต่ำใกล้เคียงกับกราวด์อีก(จุด C) คาพาซิเตอร์ C จะประจุและคายประจุทำให้ศักดา V_c เปลี่ยนแปลงระหว่าง2/3V_{cc}กับ1/2V_{cc}สลับกันไปมาจะทำให้ได้เอ้าท์พุทออกไปดังในรูปที่ 10 ข.

เวลาที่ใช้ในการประจุคาพาซิเตอร์ C จาก 1/3V_{cc}เป็น 2/3V_{cc}คือ t_1และเวลาที่ใช้ในการคายประจุจาก 2/3V_{cc}เหลือ 1/3V_{cc}คือ t_2 จะมีค่าเท่ากัน สามารถคำนวณได้จาก

$$t_1 = t_2 = 0.693\ RC \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 15$$

จะได้คาบเวลาและความถี่ของการออสซิลเลทเป็น

$$T = t_1+t_2 = 2x0.693\ RC = 1.4RC$$

$$F = 1/T = 1/1.4RC \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 16$$

ตัวอย่างการออกแบบวงจรเปรียบเทียบที่มีฮีสเทอรีซีส

1. แบบกลับเฟส ถ้าเรานำสมาการที่ 3 ตั้งและลบออกด้วยสมการที่ 4 จะได้ผลลัพธ์เป็นแรงดันฮีสเทอรีซีส V_H หรือ

$$V_H = V_{r+} - V_{r-} = V_{cc}x[R_1R_2/R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3] \quad \ldots\ldots 17$$

และถ้านำสมการ 4 ไปหารสมการ 17 จะได้

$$V_H/V_{r-} = R_1/R_3 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 18$$

ให้ $R_1 = nR_3$ จะได้

$$V_H/V_{r-} = n = R_1/R_3 \quad \ldots\ldots\ldots 19$$

ในการออกแบบเราต้องกำหนดจุดที่วงจรเปลี่ยนสถานะ V_{r-} และ V_{r-} ทำให้เราทราบค่า V_H และ n ได้ ก็จะได้อัตราส่วนของ R_1 และ R_3 จากสมการ 19 จากเงื่อนไขของสมการที่ 2 จะสามารถหาค่า R_3 ได้โดยกำหนดค่า R_L ขึ้นมาก่อนหลังจากนั้นก็จะสามารถหาค่า R_2 ได้จากสมการ 3 โดย

$$R_2 = R_1//R_3 \ / \ V_{cc}-1/V_{r+} \quad \ldots\ldots\ldots 20$$

ตัวอย่างที่ 1 ออกแบบวงจรเปรียบเทียบกลับเฟสแบบมีฮีสเทอรีซีส โดยให้มี V_{r+} = 150mV และ V_{r-} = 100mV กำหนดให้ใช้ไฟเลี้ยงวงจร 5 V

ให้ R_L = 1K จากเงื่อนไขของสมการ 2

ให้ R_3 = 100K

$n = V_H/V_{r-} = V_{r+} - V_{r-}/V_{r-} = 150-100/100 = 0.5$

จากสมการ 19 ได้ $R_1 = nR_1 = 0.5x100K = 50K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า $R_1//R_3$ ได้

50K x 100K / 50K + 100K = 33.33 K

หาค่า R_2 ได้จากสมการ 20

R_2 = 33.33 K / $5/0.15^{-1}$ =1 K

จะได้วงจรที่ต้องการดังในรูปที่ 11

2. แบบไม่กลับเฟส ในทำนองเดียวกันเราต้องกำหนดค่า V_{r+}, V_{r-} และแรงไฟที่เลี้ยงวงจร V_{cc} สิ่งที่ต้องคำนวณหาคือ R_1, R_2, R_3, R_4, R_L สามารถหาได้ดังต่อไปนี้คือ

$V_H = V_{r+} - V_{r-}$ หาได้จากการนำสมการ 14 ไปลบออกจากสมการ 13 ได้

$V_H = V_{r+} - V_{r-} = V_{cc} R_4/R_3$

หรือ $V_H/V_{cc} = V_{r+} - V_{r-} /V_{cc} = R_4/R_3$ 21

เมื่อได้อัตราส่วนของ R_4/R_3 สามารถหาค่าของ V_{ref} ได้จากสมการ 9 โดย

$V_{ref} = V_{r+}[R_3/R_3+R_4]$ 22

ซึ่ง V_{ref} เป็นโวลท์เตจดีไวเดอร์ของ R_1 กับ R_2 ดังสมการ 5 โดยการกำหนดค่าของ R_1 หรือ R_2 ขึ้นมาก่อน ก็จะสามารถคำนวณหาค่าของอีกตัวหนึ่งได้จากสมการ 5 ได้

$R_1 = R_2[V_{cc}/V_{ref} - 1]$ 23

ตัวอย่างที่ 2 ออกแบบวงจรเปรียบเทียบแรงดันไม่กลับเฟส แบบมีฮีสเทอรีซีสโดยให้ V_{r+} = 200 mV และ V_{r-} = 120 mV ใช้ไฟเลี้ยงวงจร 5 โวลท์ ให้ R_L = 1K

จากสมการ 21 หาอัตราส่วนของ R_4/R_3 ได้ 0.2-0.12/5 = R_4/R_3 = 0.016

หรือ R_3 = 62.5 R_4

จากเงื่อนไข R_3 ต้องมีค่ามากกว่า R_L มาก ๆ เพราะฉะนั้นให้ R_3 = 510K

ได้ R_4 = 510K x 0.016 = 8.2K

หาค่า V_{ref} จากสมการ 22 V_{ref} = 0.2 [510/510-8.2] = 0.197 V

ให้ R_2 = 1K หาค่า R_1 ได้จากสมการ 23 R_1 = 1K [$5/0.197^{-1}$] = 24K จะได้วงจรดังรูป12

ตัวอย่างการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์

ความถี่ที่ออสซิเลทควรจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 100KHz จากสมการที่ 16 โดยการกำหนดค่า R ขึ้นมาก่อน แล้วสามารถคำนวณหาค่า C ได้ การกำหนดค่า R เป็นไปตามเงื่อนไขว่า ค่าของ R จะต้องมีค่ามากกว่า R_L มาก ๆ

ตัวอย่างที่ 3 ออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ความถี่ 40KHz โดยใช้ไอซี LM 311 กำหนดให้ใช้ไฟเลี้ยงวงจร 5 โวลท์ ให้ R_L = 2.2K

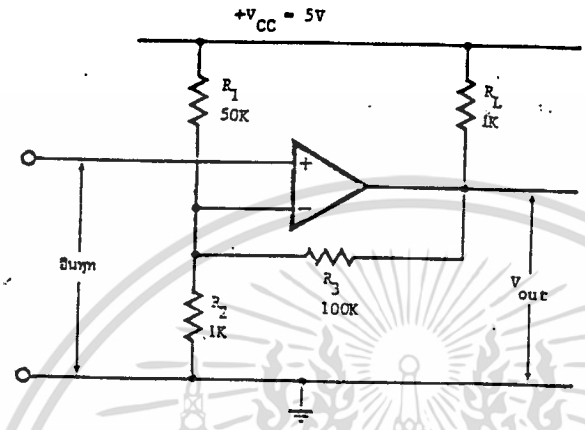
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_{o3} ต้องมีค่ามากกว่า R_L ให้ R_{o3} = 1m

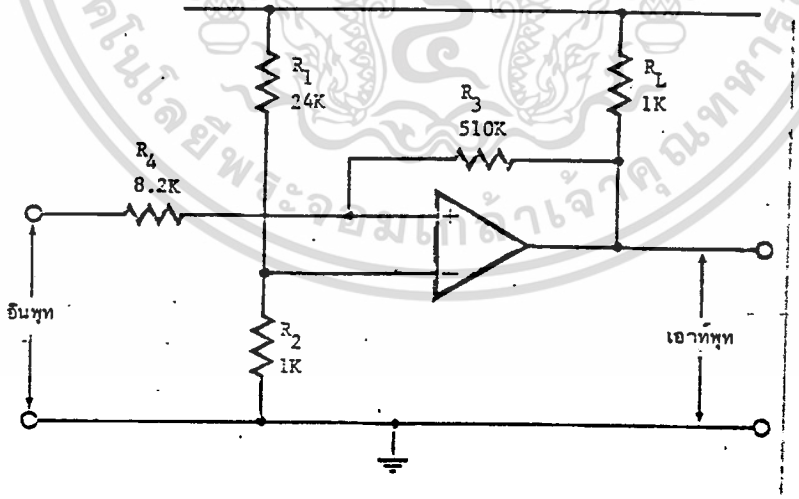
$$R_{o1} = R_{o2} = R_{o3} = 1m$$

ให้ R = 47K จากสมการ 16 C = 1/1.4FR = $1/1.4x40x10^3x47x10^3$ = 380PF

เนื่องจากค่า C 380PF มิได้เป็นค่ามาตรฐาน ในทางปฏิบัติอาจใช้ R เป็น VR เพื่อให้สามารถปรับความถี่ได้ตามต้องการดังในรูปที่ 13

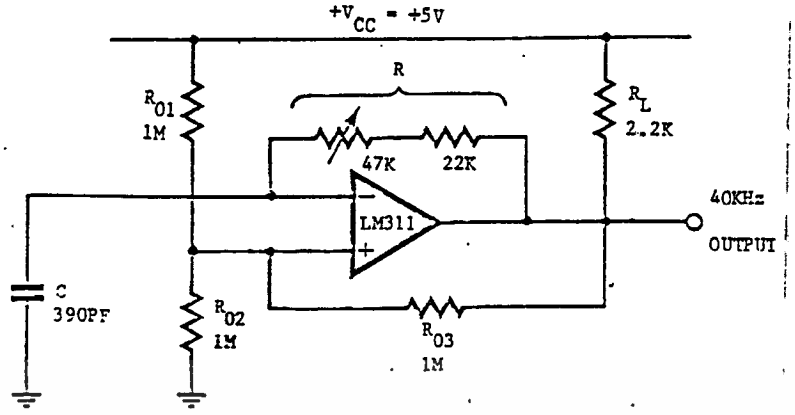


รูปที่ 11 วงจรที่ออกแบบจากตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 12 วงจรที่ออกแบบจากตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่คำนวณได้จากตัวอย่างที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. DIGITAL L-C METER

Digital L-C Meter เป็นวงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าประจุไฟฟ้า (Capacitance) หรือค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Inductance) ซึ่งจะใช้วิธีเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นสัดส่วนกันกับค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้าแล้วนำค่าที่ได้มาแสดงผลด้วย โวลท์มิเตอร์ (Voltmeter) ซึ่งสามารถอ่านออกมาเป็นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าหรือค่าความจุไฟฟ้าได้เลย

จากรูป (A) จะเป็นรูปวงจร Digital L-C Meter ซึ่งสามารถแยกออกเป็นวงจรที่สำคัญได้ 3 วงจร คือ วงจรเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าไปเป็นแรงดันไฟฟ้า (Inductance to Voltage) วงจรเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า (Capacitor to Voltage) และวงจรโวลท์มิเตอร์ (Volt meter)

จากวงจร SW_3 จะเป็นตัวเลือกการวัดว่าจะวัดค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งจะมี LED แสดงภาวะว่ากำลังวัดค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอยู่ ส่วน SW_1 จะเป็น switch สำหรับเลือกย่านการวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1PF-20 mF ส่วน SW_2 จะเป็น switch สำหรับเลือกย่านการวัดของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดได้ตั้งแต่ 1μH-2H

DIGITAL VOLTMETER

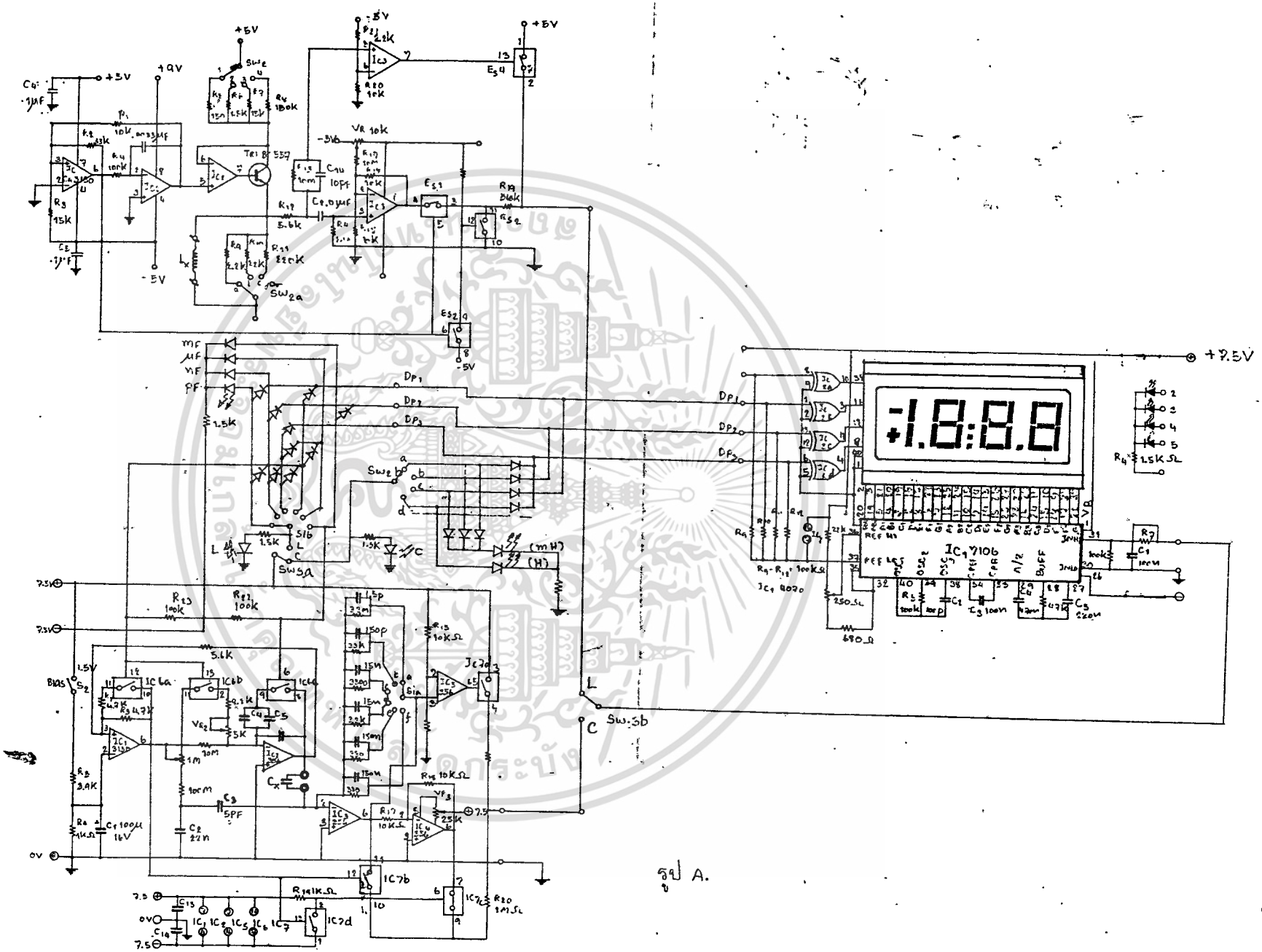
วงจรรูป (B) เป็นวงจรดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ที่ใช้เป็นภาคแสดงผล สามารถแสดงค่าได้ตั้งแต่ 0-1999 โดยใช้ IC LSI #7106 ซึ่งเป็นไอซีแบบเปลี่ยนสัญญาณ ANALOG เป็น DIGITAL สามารถขับตัวเลขแสดงผลแบบ LCD ขนาด 3 1/2 หลักได้โดยตรง

เนื่องจากไอซี #7106 เป็นไอซีสำเร็จรูปดังนั้น จึงใช้อุปกรณ์ต่อภายนอกเพิ่มก็สามารถทำงานได้

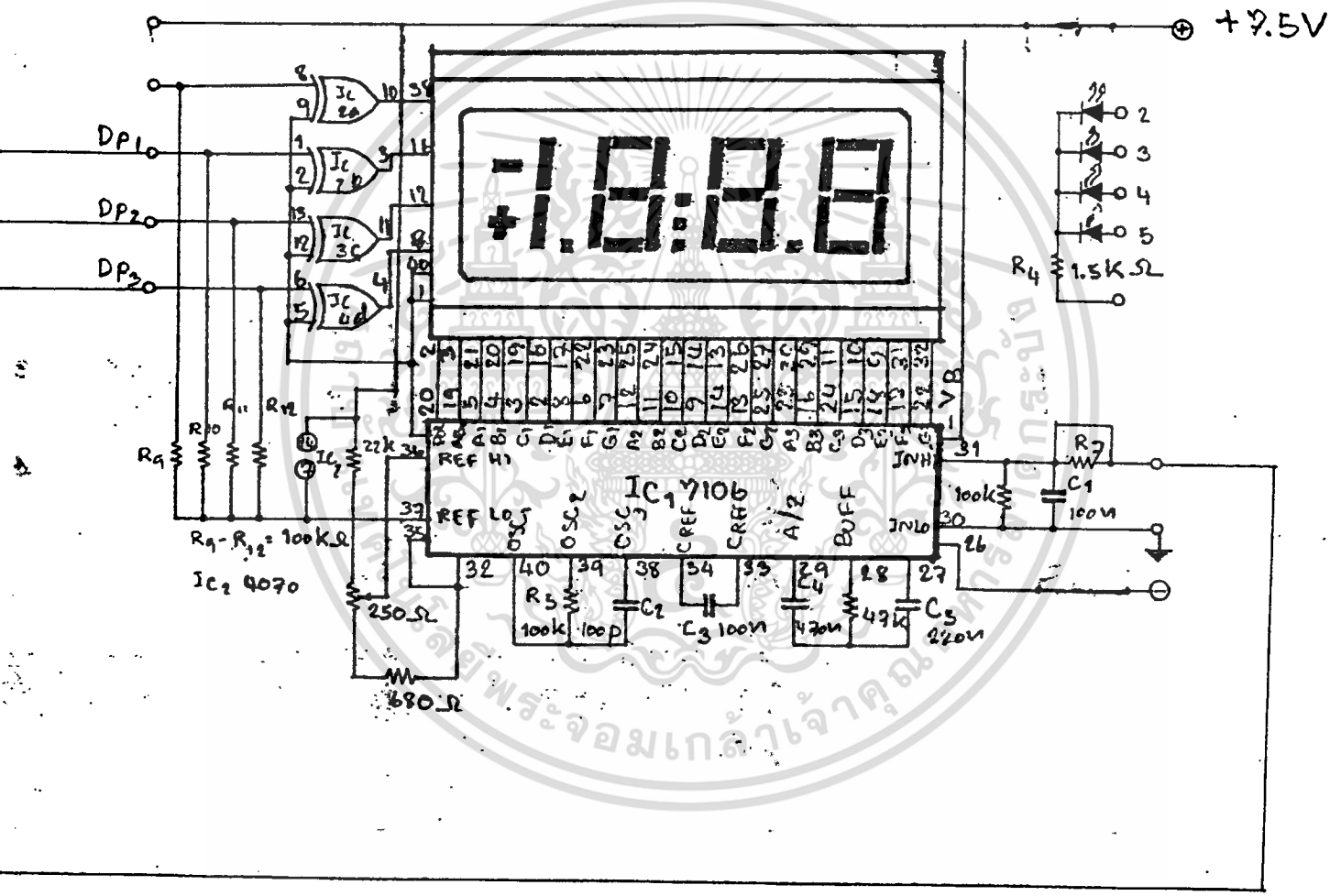
หลักการทำงาน

จากวงจร R_3 และ VR_1 จะต่อในลักษณะแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะต่อเข้าไปยังขา REF. Hi กับขา REF. Lo เพื่อใช้อ้างอิง ที่ใช้แสดงผลที่จอ LCD ส่วนขา IN.Hi กับขา IN.Lo จะเป็นขาสำหรับต่อแรงดันที่จะวัดเข้าไป ดังนั้น ถ้าเราตั้งแรงดันที่ขา REF.Hi กับขา REF.Lo เท่ากับ 200 mV. ถ้าแรงดันที่ขา IN.Hi กับขา IN.Lo มีค่าเท่ากับ 200 mV. ถ้าแรงดันที่ขา IN.Hi กับขา IN.Lo มีค่าเท่ากับ 200 mV.หรือมากกว่าที่ Display จะแสดงเครื่องหมายว่าเต็มหลัก แต่ถ้า แรงดันที่ขา IN.Hi กับขา IN.Lo มีค่าเท่ากับ 199 mV.ที่ Display จะแสดงค่า 1990 R_8 และ C_2 จะประกอบกันเป็นวงจร Oscillate ซึ่งใช้สำหรับ Scan Display ของ LCD IC_2 ใช้สำหรับเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

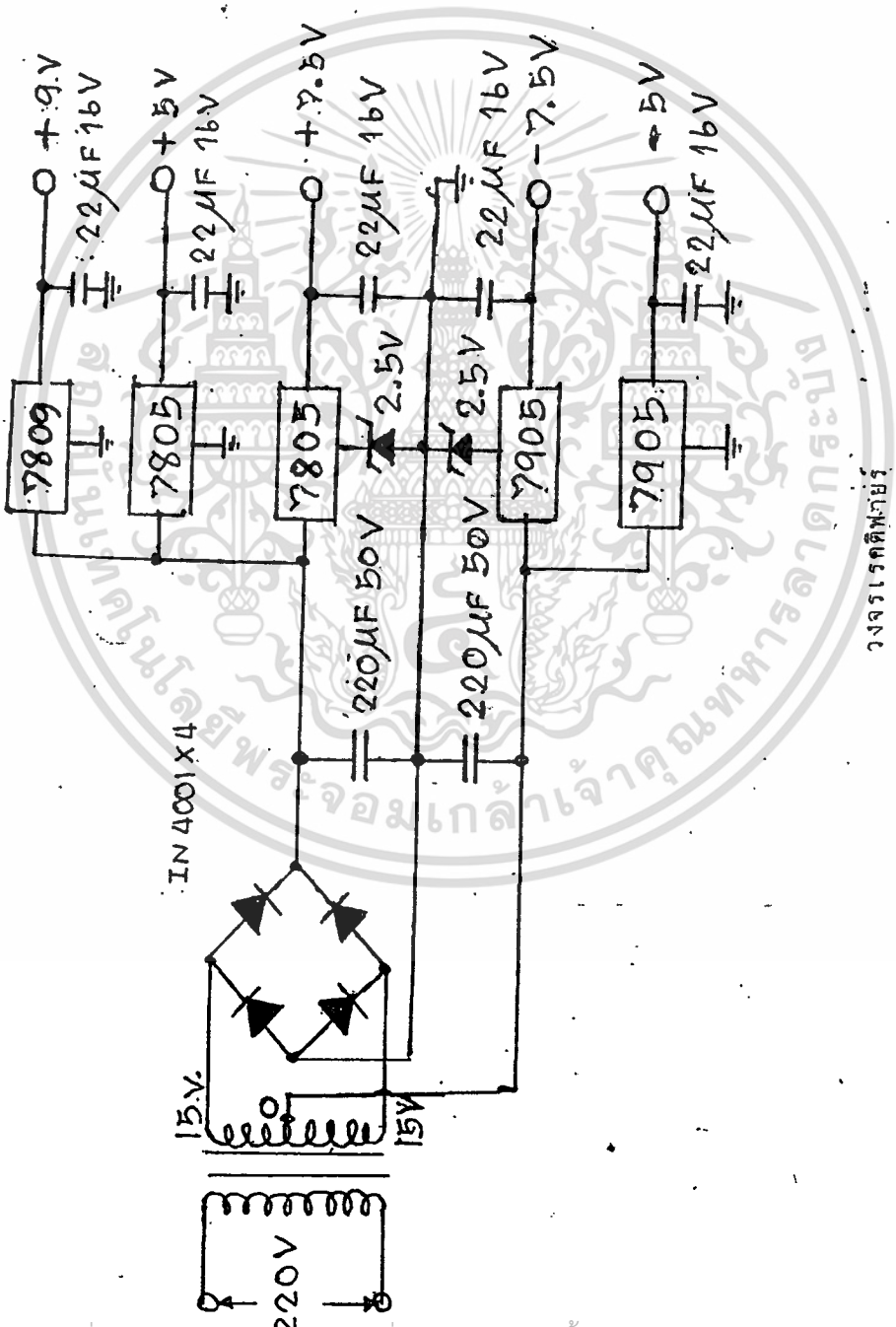

+5V
+9V
-5V
+7.5V
-1.8:8.8
IC7106
Sw2a
Sw2b
Sw3a
Sw3b
Sw1
DP1
DP2
DP3
mF
µF
nF
pF
(mH)
(H)
BIAS
1.5V
0V
7.5V

รูป A.



รูป B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

function แสดงจุดที่หน้าจอ LCD C_1 จะทำหน้าที่ filter สัญญาณให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าตรงและตัดสัญญาณรบกวนทิ้ง ส่วน D_4-D_7 ใช้เป็นตัวแสดงสภาวะว่าเลือกการวัดอยู่ที่ย่านใด

5.1 การทำงานของเครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

หลักการเบื้องต้น

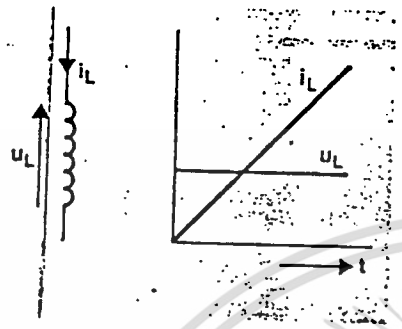
โดยปกติถ้าเราป้อนกระแสไฟฟ้าสลับผ่านขดลวดจะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำหรือเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้า u คือ ความเหนี่ยวนำซึ่งขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า (di) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา (dt) เราจะได้ $u = L\ (di/dt)$ ซึ่งจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ ที่เป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 1

ในทางปฏิบัติกระแสสลับมันจะมีการเพิ่มหรือลดไม่เท่ากันตลอดทำให้มีปัญหาเกิดขึ้น ดังนั้นเราจึงมีทางแก้ไขโดยสร้างกระแสไฟฟ้าที่มีรูปสามเหลี่ยม (triangular) เข้าไปในขดลวด จากนั้นขดลวดจะเกิดการเหนี่ยวนำในตัวเอง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นมาใหม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม (rectanangular) ดังรูปที่ 2 และเมื่อนำเอากระแสนี้มา Rectifier ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าตรงแล้วทำการวัดค่าแรงดันนี้ ค่าที่เราวัดแรงดันก็คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนั้น นี่เป็นหลักการง่าย ๆ ต่อไปเราจะมาดู Block Diagram ของวงจรที่เราจะสร้างกันต่อไป

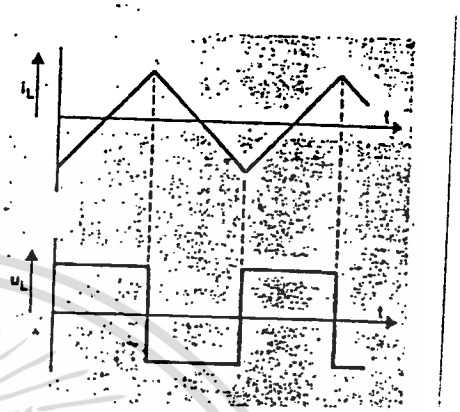
BLOCK DIAGRAM

Block Diagram ของ Digital Inductance Meter แสดงไว้ในรูปที่ 3 เริ่มจาก block แรกเป็น function generator จะประกอบด้วยวงจรสมิชทริกเกอร์และวงจรอินทิเกรเตอร์ ฟังก์ชั่นเจนเนอ-เรเตอร์ จะผลิตแรงดันรูปสี่เหลี่ยมหรือสแควร์เวฟและแรงดันรูปสามเหลี่ยม จากนั้นแรงดันรูปสามเหลี่ยมนี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นกระแสรูปสามเหลี่ยมโดยวงจรเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแส กระแสรูปสามเหลี่ยมนี้จะเป็นกระแสใช้ผ่านขดลวด L_x หรือขดลวดที่จะนำมาวัดกระแสนี้จะผ่านสวิทช์ลดระดับกระแส (Rang SW) เพื่อให้เหมาะสมกับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่นำมาที่นำมาวัด เมื่อเราป้อนกระแสรูปสามเหลี่ยมเข้าไปในขดลวด จะเกิดแรงดันย้อนกลับที่มีรูปลักษณะเป็นสแควร์เวฟดังที่กล่าวมาข้างต้น และแรงดันนี้จะมาเข้าวงจรขยายให้เป็นสองเท่า จากแรงดันที่ขยายแล้วจะมาเข้าสวิทช์อิเลคทรอนิคส์ ES_1 ซึ่งสวิทช์ ES_1 - ES_3 นี้จะถูกควบคุมโดยแรงดันรูปสี่เหลี่ยมจากฟังก์ชั่นเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งสวิทช์ทั้ง 3 กับการควบคุมของแรงดันรูปสี่เหลี่ยมนี้ จะเป็นวงจรแบบชิงโครไนซ์ฮาร์ฟเวฟเร็คติไฟร์ แรงดันไฟตรงนี้จะมีค่าลดลงไปครึ่งหนึ่ง ด้วยเหตุนี้เอง จึงต้องมีการขยายเป็น 2 เท่าก่อน เพื่อให้แรงดันที่เร็คติไฟร์ ออกมามีค่าเท่ากับแรงดันจริง จากแรงดันนี้ก็จะมาเข้าวงจรดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ ค่าที่ดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ แสดงผลออกมาก็คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (LX) ที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ทิศทางของกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กหรือความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2 แสดงรูปสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้จากขดลวดเมื่อป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเข้าไป

กระแสสามเหลี่ยม

ตอนนี้เรามาดูกระแสที่มีรูปสามเหลี่ยมกับความสัมพันธ์ของดิจิตอลโวลท์มิเตอร์และเร้นท์สวิทช์ชิ่งเลคเตอร์ แรงดันฟูลสเกลของดิจิตอลโวลท์มิเตอร์เท่ากับ 200 mV. เมื่อนำค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเท่ากับ 2 mH. ซึ่งเป็นย่านต่ำกว่ามาวัด ดังนั้นแรงดันที่เข้าทางอินพุทของดิจิตอลโวลท์มิเตอร์จะต้องเท่ากับ 200 mV.(UL) และตอนนี้เราสมมติให้กระแสสูงสุด (Im) ที่ไหลผ่านขดลวด(ขดลวดมีค่าเท่ากับ 2 mH.) เท่ากับ 20 mA. เริ่มแรกนี้จะคิดที่พัลซ์แรกของกระแสรูปสามเหลี่ยม (ครึ่งไซเคิล) จาก

$$UL = L\ (di/dt)$$

$$di/dt = UL/L$$

$$= 200 \times 10^{-3} / 2 \times 10^{-3}$$

$$= 100$$

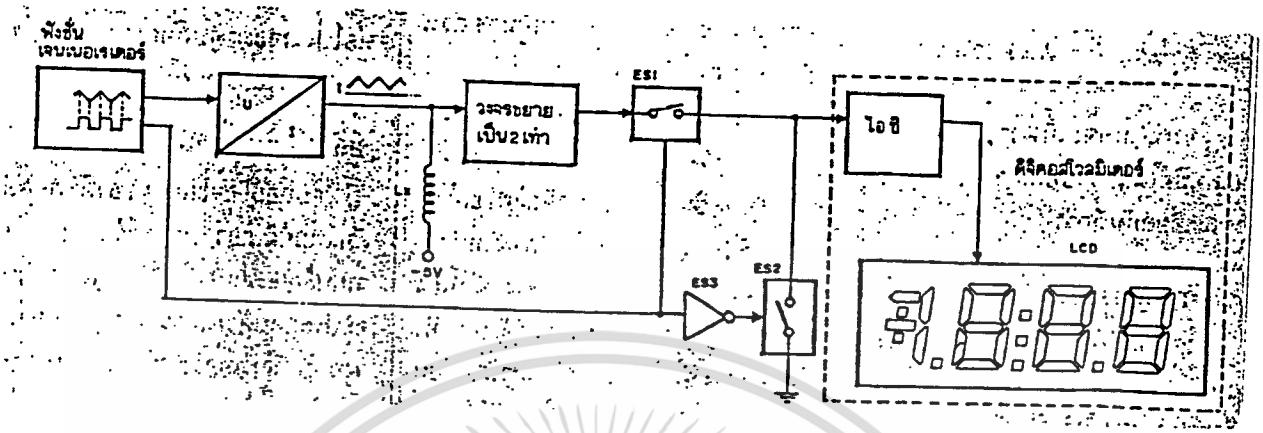
จาก di/dt ก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสในหนึ่งหน่วยเวลา (วินาที) ดังนั้น

$$di/dt = Im/te$$

$$= 100$$

$$te = Im/100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของดิจิตอลอินดิคแคนซ์มิเตอร์

$= 20 \times 10^{-3} / 100$

$= 2 \times 10^{-4}$

$= 200\ \mu S$

ถ้าคิดเป็น 1 ไซเคิล ความถี่ของกระแสรูปสามเหลี่ยมจะเท่ากับ

$f = 1 / 2te$

$= 1 / 2 \times 2 \times 10^{-4}$

$= 2500$ Hz.

วงจรและการทำงาน

วงจรของดิจิตอลอินดิคแคนซ์มิเตอร์จะแสดงไว้ในรูปที่ 4 การทำงานจะเริ่มจากฟังก์ชั่นเจนเนอเรเตอร์ จะผลิตสัญญาณหรือแรงดันรูปสามเหลี่ยม (triangular) และแรงดันรูปสี่เหลี่ยม (rectangular) ที่มีความถี่เท่ากับ 2500 Hz. (ตรงกับที่คำนวณไว้ในตอนแรก) IC_1 ประกอบกันเป็นสมิททริกเกอร์ผลิตสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมหรือสแควร์เวฟเพื่อใช้ควบคุมสวิทช์อีเลคทรอนิคส์ ES_1-ES_4 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจะผ่าน R_4 มาเข้าวงจรอินทีเกรเตอร์โดย IC_{2a} วงจรอินทีเกรเตอร์จะเปลี่ยนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเป็นรูปสามเหลี่ยม และมีแรงดันที่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 4.9 V.และ 2 V. สัญญาณรูปสามเหลี่ยมจากวงจรอินทีเกรเตอร์ (ขา 1 ของ IC_{2a}) จะมาเข้าวงจรเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแสโดย IC_{2b} และ TR_1 กระแสนี้จะเป็นกระแสที่ใช้สำหรับวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (LX) ที่เราจะนำมาทดสอบ กระนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 4 ระดับ โดยมี R_5-R_8 ซึ่งต่ออยู่กับสวิทช์เลือก SW_{2a} เป็นตัวกำหนดกระแส สำหรับตัวต้านทาน R_9-R_{11} ที่ต่ออยู่สวิทช์เลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SW_{2a} ซึ่งจะขนานกับขดลวดที่จะนำมาวัดนั้นเป็นตัวต้านทานแดมปิ้ง(damping resistor) มันมีความจำเป็นมากที่จะต้องใส่เพราะในขดลวดทั่ว ๆไปจะมีค่าความจุ (capacitance) ปะปนอยู่ (จากการต่อสายหรือค่า C ในขดลวด) ทำให้เกิดเป็นวงจร LC ซึ่งจะมีผลเวลาวัด

ค่าของ R_9-R_{11} นี้จะมีผลเล็กน้อยกับการวัดเท่านั้น สำหรับในตำแหน่งที่ 2H R_{14} จะเป็นตัวต้านทานแดมปิ้ง เมื่อมาถึงตอนนี้อยากจะแนะนำการวัดสักเล็กน้อยการวัดค่าเหนี่ยวนำต่ำ ๆ กับการตั้งย่านการวัดไว้สูง ๆ ตัวอย่างเช่น 1.5 mH. กับการตั้งย่านไว้ที่ 2 H. ค่าความต้านทานของตัวต้านทานแดมปิ้งสูงจะทำให้เกิดการออสซิเลทขึ้นได้ ดังนั้นการวัดค่าควรตั้งย่านการวัดต่ำ ๆ ไว้ก่อนถ้าวัดไม่ได้คือ ดิจิตอลแสดงโอเวอร์โฟล์ (over flow) จึงจะเปลี่ยนย่านการวัดให้สูงขึ้น

การแสดงโอเวอร์โฟล์ของดิจิตอลโวลท์มิเตอร์จะถูกกำหนดจาก IC_{3b} ซึ่งเป็นคอมพาราเตอร์ (comparator) หรือเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เมื่อแรงดันเหนี่ยวนำจาก LX มีค่าสูงเกินย่านที่ตั้งไว้จะทำให้ขา 7 ของ IC_{3b} เป็น Hi(ปกติจะเป็นLo) ทำให้ ES_4 ทำงาน ต่อไฟ +5V. เข้าที่อินพุทของดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ ดิจิตอลโวลท์มิเตอร์จึงแสดงค่าโอเวอร์โฟล์

IC_{3a} เป็นวงจรขยาย จะขยายแรงดันไฟสลับที่ได้จากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่ทดสอบ LX ซึ่งผ่านมาทาง R_{12} และ C_2 , C_2 จะเป็นตัวกั้นแรงดันไฟตรงไม่ให้เข้ามาที่อินพุทนอนอินเวอร์ติ้งของ IC_{3a} , IC_{3a} นี้จะขยายแรงดันนี้ให้เป็น 2 เท่า VR_1 จะเป็นตัวปรับออฟเซ็ทของ IC_{3a} แรงดันไฟสลับที่ถูกขยายจากขา 1 จะมาเข้าวงจรฮาร์ฟเวฟเร็คติไฟร์ โดยใช้อีเลคทรอนิคสวิทช์ ES_1 และ ES_2 ส่วน ES_3 เป็นอินเวอร์เตอร์ให้กับ ES_2 สวิทช์อีเลคทรอนิคส์จะถูกควบคุมโดยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากเอ้าท์พุทที่ขา 6 ของ IC_1 เมื่อแรงดันไฟสลับเป็นบวก สวิทช์ ES_1 จะปิด สวิทช์ ES_2 จะเปิด และเมื่อเป็นช่วงลงสวิทช์ ES_1 จะเปิด และ ES_1 จะปิดก็จะได้แรงดันไฟตรงผ่าน R_{10} มาเข้าวงจรดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ C_3 นอกจากจะช่วยฟิลเตอร์อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแล้วยังช่วยกรองสัญญาณรบกวนอีกด้วย

5.2 การทำงานของเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า

หลักการสร้างเครื่องมือวัดความจุไฟฟ้า มีหลายแบบซึ่งแบบที่ง่ายต่อการสร้างคือ การสร้างวงจรออสซิเลเตอร์ (Osillator) ที่ใช้ R และ C เป็นตัวกำหนดความถี่โดยตัวกำหนดความถี่ใช้ค่า C ที่ต้องการทราบค่ามาใช้เป็นตัวกำหนดความถี่เอ้าพุทนั้น และนำค่าความถี่ที่ได้ออกมาไปวัดโดยเครื่องวัดความถี่ (Frequency meter) หรือ โวลท์มิเตอร์ (Voltmeter) โดยเปลี่ยนค่าเป็นโวลท์เตจแล้วชึ่งสามารถปรับวงจรให้ได้ค่าความถี่ที่ได้ออกมามีค่าเท่ากับค่าของตัวเก็บประจุ ชึ่งวิธีนี้จะเห็นว่าแม้วงจรออสซิลเลเตอร์จะสร้างได้ไม่ยาก แต่เราก็ไม่สามารถอ่านค่าความจุโดยตรง และต้องใช้เครื่องวัดความถี่ด้วย ชึ่งเครื่องวัดความถี่จัดว่ามีราคาสูงมาก หลักการออกแบบของเครื่องวัดค่าตัวเก็บประจุง่าย ๆ ก็คือการใช้วงจร R-C เป็นโวลท์เตจดิไวร์เดอร์ สำหรับ AC Voltage ที่รู้ค่าความถี่ดังแสดงในรูปที่ 1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถหาค่า C ได้จากสูตร $C_x = V_1 / 2\pi F_o R_s V$ จะเห็นว่าค่า π, F_o, R_s,และ V เราทราบค่าของมันจึงเหลือแต่ V ซึ่งก็สามารถหาได้จากโวลท์มิเตอร์สิ่งที่คุณต้องการเพิ่มเติมคือ กระดาษปากกา และเครื่องคิดเลข เพื่อหาค่า C ดู ๆ ไปก็จะเห็นว่าง่าย แต่ถ้าเราสามารถที่จะอ่านค่าความจุได้โดยตรง จะเป็นการสะดวกและทุ่นเวลามากกว่า

เครื่องวัดค่าความจุของคอนเดนเซอร์แบบที่สามารถอ่านค่าเป็นตัวเลขได้โดยตรง มีหลักการทำงานโดยย่อตามแผนผังการทำงานในรูปที่ 2

ในรูปที่ 2 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมจากวงจรกำเนิดรูปคลื่น (ที่จุด A) เมื่อนำไปป้อนเป็นสัญญาณอินพุทให้กับวงจร Differentiator ที่ใช้วงจรออปแอมป์ จะให้เอ้าท์พุทออกมาเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (ที่จุด B) ซึ่งจะมีช่วงกว้างของคลื่น (Amplitude) หรือ V peak มีค่าขึ้นกับ C เนื่องจากอัตราการขยายของวงจรคือ CR (R คงที่) ดังนั้นเมื่อเราเอาสัญญาณเอ้าท์พุทของ Differentiator ไปทำการเร็คติไฟร์ซึ่งใช้อินเวอร์ติ้งแอมป์ร่วมกับ IC 7C และ IC 7B สัญญาณสี่เหลี่ยมนี้ก็จะกลายเป็น D.C. ขนาดเท่ากับ V peak แล้วเราก็สามารถนำโวลท์มิเตอร์มาวัดค่า V peak นี้ได้ ซึ่งเมื่อเราปรับแต่งวงจรให้ V peak มีค่าเท่ากับ C เราก็จะสามารถอ่านค่า C ได้โดยตรงจากโวลท์มิเตอร์

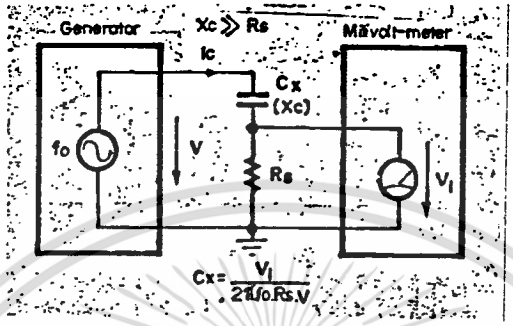
วงจรสมบูรณ์ของเครื่องวัดค่าความจุคอนเดนเซอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ซึ่งในรูปที่ 3 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณและเร็คติไฟร์ ซึ่งเรียกรวมกันเป็นวงจรอินพุทมิเตอร์ ส่วนในรูปที่ 4 เป็นวงจรดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ (Digital Voltmeter) ที่ใช้วัดเอ้าท์พุทจากวงจรรูปที่ 3 ซึ่งเท่ากับเป็นการแสดงค่าความจุของคอนเดนเซอร์

การทำงาน

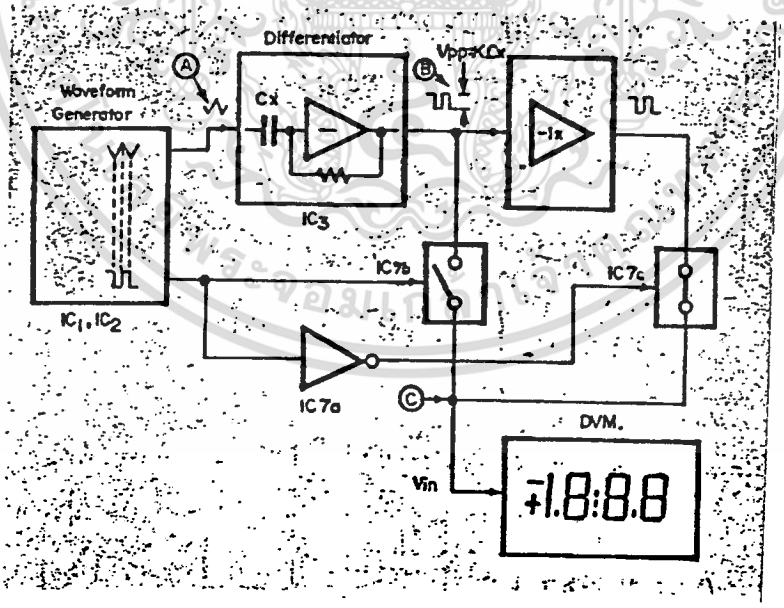
ในรูปที่ 3 IC_1 และ IC_2 ทำหน้าที่ร่วมกันเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ (Wave Form Generator)ซึ่ง IC_1 เป็นวงจรชมิทท์ทริกเกอร์ (Schmittrigger)สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมที่จะนำไปใช้เป็นตัวควบคุมวงจรเร็คติไฟร์และนำไปเป็นอินพุทของวงจร Intregrator (IC_2) โดยอินพุทของ IC_1 ก็ได้มาจากเอ้าท์พุทของ IC_2 เมื่อเอ้าท์พุทของ IC_2 เกินกว่าระดับ Upper Trigger Level ของ schmittrigger(IC_1) เอ้าท์พุทของ IC ก็จะต่ำลงทันที ซึ่งจะทำให้ค่าเอ้าท์พุทของ Integrator ค่อย ๆ ลาดลงจนต่ำกว่าระดับ Lower Trigger Level ของ Schmittrigger เอ้าท์พุทของ IC_1 ก็จะเปลี่ยนขึ้นไปทันที เอ้าท์พุทของ Integrator จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น IC_1 จึงเป็นตัวสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม และ IC_2 เป็นตัวสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

สัญญาณสามเหลี่ยมจาก IC_2 จะใช้เป็นสัญญาณที่ทดสอบค่า C โดยผ่าน C (ที่จะวัดค่า) ไปยังอินเวอร์ติ้งอินพุทของวงจร Differantiator (IC_3) เมื่อสัญญาณสามเหลี่ยมผ่านวงจร Differentiator (ที่มีอัตราขยายขึ้นเท่ากับค่า C ที่วัด) จะได้สัญญาณเอ้าท์พุทเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีระดับโวลท์เตจเป็นสัดส่วนกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 วิธีหาค่าประจุไฟฟ้าแบบง่าย



รูปที่ 2 Block Diagram ของเครื่องวัดประจุแบบดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ C_x (C ที่เรากำลังวัด) วงจรเร็คติไฟร์จะเปลี่ยนสัญญาณสี่เหลี่ยมจากเอ้าท์พุทของ Differentiator ให้เป็น D.C. เพื่อที่จะนำไปวัดโดยโวลท์มิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยอีเลคทรอนิคส์สวิทช์ IC_{7d} , IC_{7c} และ IC_4 เรียกว่าเป็น Phase Selective Rectifier โดยจะเลือกเอ้าท์พุทจากเอ้าท์พุทของ IC_3 หรือ IC_4 (ที่ต่อเป็นอินเวอร์ติ้งแอมป์ให้เอ้าท์พุทที่ออกมามีเฟสต่างจากเดิม 180 ° กับ IC_3) เพื่อให้สัญญาณที่ออกมาเป็นสัญญาณเฉพาะช่วงบวกที่ต่อเนื่องเป็น D.C. โวลท์เตจซึ่งจะอาศัยสัญญาณเลือกจาก IC_1 (ดูรูปที่ 5 ประกอบ) สัญญาณเอ้าท์พุทจะต่อผ่าน R เพื่อเข้าไปภาคแสดงผลในรูปที่ 4

ในกรณีที่วัดค่า C ที่เกินย่าน (Range) ของการวัด IC จะเป็นตัวควบคุมสวิทช์ IC เมื่อสัญญาณเอ้าท์พุทจาก IC สูงกว่าที่ควร IC จะทำการต่อสวิทช์ IC ซึ่งจะทำให้เอ้าท์พุทของวงจรมีโวลท์เตจสูงกว่า V สูงสุดของ DVM ซึ่ง DVM จะแสดงค่าโอเวอร์ออกมา สวิทช์ SW จะทำหน้าที่ปรับอัตราการขยายให้เหมาะสมกับการวัดและ SW จะเป็นตัวเลือกจุดทศนิยม และเลือก LED แสดงหน่วยของ C และเป็นตัวควบคุมการเลือกปรับความถี่ของวงจรกำเนิดรูปคลื่นให้เหมาะสมกับค่า C ในย่านการวัดต่าง ๆ ซึ่งทำให้การวัดค่า C แต่ละตัวมีความถี่แตกต่างกันออกไป ส่วน IC เป็นวงจรเร็คกูเรเตอร์เพื่อจ่ายไฟที่ตรงแก่วงจร IC เป็นตัวแบ่งแรงดันเพื่อสร้างระดับศูนย์โวลท์สำหรับจ่ายให้กับออปแอมป์ในวงจร

ย่านการวัด 0-2 F (Range a,b,c) ส่วนใหญ่จะใช้วัดค่า C ที่ไม่มีขั้ว (แบบที่ไม่ใช่อีเลคโตรไลติคส์) จะใช้ความถี่ 1 KHz. และสัญญาณสามเหลี่ยม 1.8 V_{p-p} เป็นการทดสอบ สำหรับ C แบบไม่มีขั้วนี้ ในย่านการวัด C แบบอีเลคโตรไลติคส์จะใช้ความถี่ต่ำ ๆ และโวลท์เตจต่ำด้วย คือ ความถี่ 100 Hz. สัญญาณสามเหลี่ยม 18 mV. ยกเว้นในย่าน F จะใช้ความถี่ 10 Hz. เนื่องจากที่ความถี่ 100 Hz. จะใช้กระแสมากเกินไปในย่านการวัดนี้จะมีค่าผิดพลาด 10-15 % แต่ C ที่ใช้ในย่าน F (20,000 F) นี้ส่วนใหญ่ไม่จำเป็นที่ต้องการค่าที่ละเอียดถูกต้องมากนัก

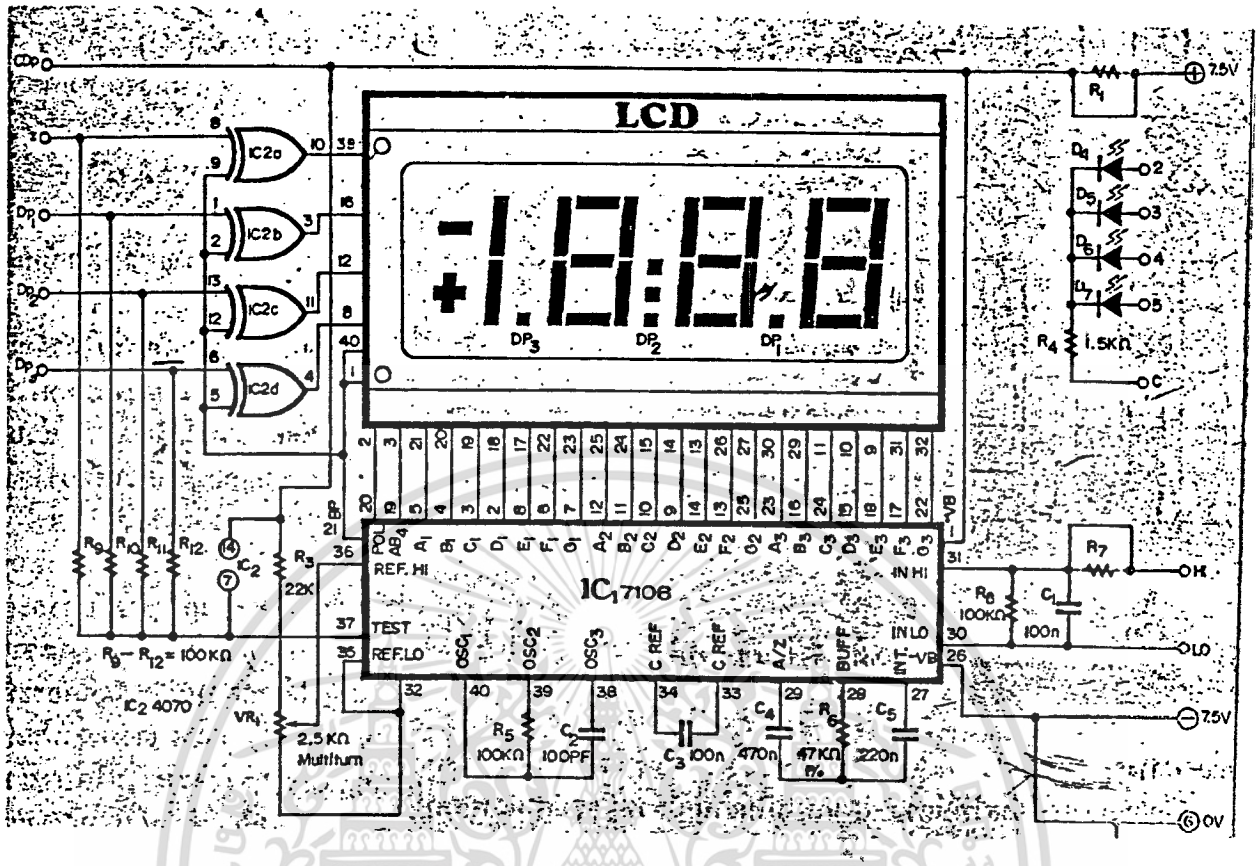
การใช้ย่านการวัด 2 F ไปวัดค่า C แบบอีเลคโตรไลติคส์จะต้องให้ Bias แก่ C โดยเปิดสวิทช์ S ไปที่ตำแหน่ง ON (Bias ON) เพื่อยกระดับสัญญาณสามเหลี่ยมให้แน่ใจได้ว่าโวลท์เตจในย่านนี้เป็นบวกเสมอ (เนื่องจาก C เป็นแบบอีเลคโตรไลติคส์มีขั้ว และสัญญาณทดสอบก็มีโวลท์เตจสูงพอที่จะทำลาย C บางตัวได้

การปรับแต่ง

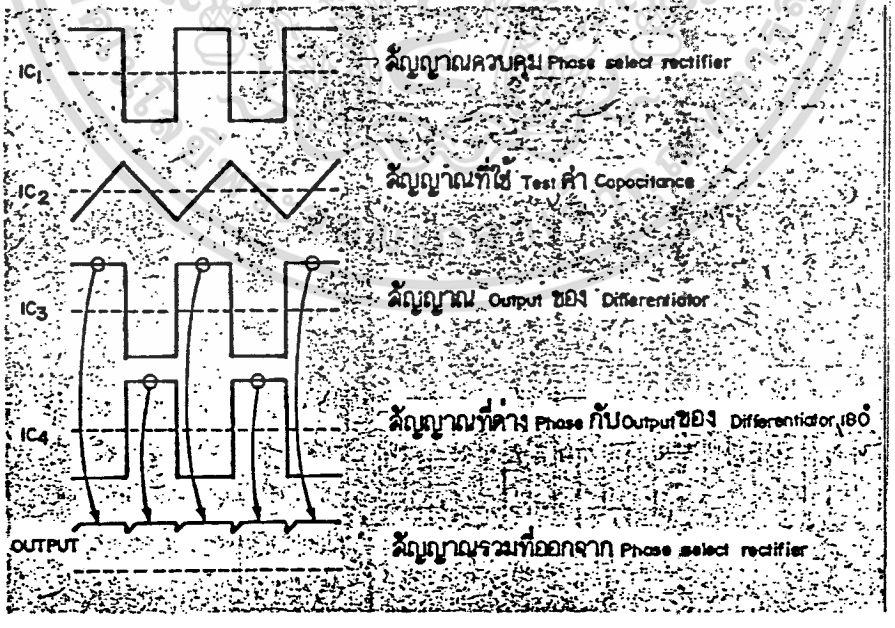
1. เลือกย่านการวัดไปที่ตำแหน่ง F (20 mF) ปรับ VR_3 บนมิเตอร์บอร์ดให้อ่านค่าที่ภาคแสดงผลเป็น 0 แล้วเปลี่ยนย่านไปที่ตำแหน่ง a ปรับ VR บนมิเตอร์บอร์ดให้อ่านค่าได้ 0 เช่นกัน

2. ปิดสวิทช์ supply แล้วบัดกรี R 330 K 1% ลงไปในตำแหน่ง C หา C ที่ไม่ใช่แบบอีเลคโตรไลติคส์ค่า 1.5 F ต่อเข้าที่ขั้ว C_x ตั้งย่านการวัดไปตำแหน่ง d เปิดสวิทช์ supply อ่านและบันทึกค่าที่วัดได้ไว้แล้วตั้งย่านการวัดไปที่ตำแหน่ง C ปรับ VR_2 ให้ค่าเท่ากับค่าในตำแหน่ง 2 ที่จดไว้โดยไม่จำเป็นต้องสนใจกับจุดทศนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 วงจรภาคแสดงผล (DVM)



รูปที่ 5 แสดงสัญญาณที่ใช้วัดค่าประจุที่จุดต่างๆ ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปลี่ยน R เป็น 3.3 K 1% และ C เป็น 15 F ซึ่งเป็นค่าที่ใช้จริงแล้วหาค่า C 10 F 1% มาต่อที่ขั้ววัดตั้งย่านการวัดไปต่ำแหน่ง b ปรับ VR บนภาคแสดงผล (DVM) จนอ่านค่าได้ 10.00 F ถ้าค่า C ที่ใช้ปรับเปรียบเทียบตัวสุดท้ายนี้ (10 F) เป็น C ที่มีค่าผิดพลาด 1% จะทำให้เครื่องวัดความจุคอนเดนเซอร์ของเรามีค่าผิดพลาด 1% ด้วย ในกรณีที่หาค่า C 1% ไม่ได้อาจหา C ค่าอื่น ๆ แล้ววัดเทียบกับ capacitance meter ตัวอื่น ๆ ที่ได้รับการปรับเทียบแล้วก็จะทำให้เครื่องวัดค่า C ที่ประกอบขึ้น มีค่าผิดพลาดเท่ากับตัวที่นำมาเทียบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาค DIGITAL VOLT - METER (DVM)

วงจรในรูปที่ 4 เป็นวงจรดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ ที่ใช้เป็นภาคแสดงผลสามารถแสดงค่าได้ตั้งแต่ 0-1999 โดยใช้ IC LSI # 7106 ซึ่งเป็นวงจรไอซีแบบเปลี่ยนสัญญาณ ANALOG TO DIGITAL สามารถขับตัวเลขแสดงผลแบบ LCD ขนาด 3 1/2 หลักได้โดยตรง เนื่องจากไอซี #7106 เป็นไอซีสำเร็จรูป ซึ่งออกแบบมาใช้งานโดยเฉพาะ ดังนั้นจึงมีอุปกรณ์ภายนอกต่ออีกเพียงไม่กี่ชิ้นก็ทำงานได้

หลักการทำงาน

R_3 และ VR_1 จะต่อลักษณะ VOLTAGE DIVIDER ซึ่งจะทำหน้าที่แบ่งแรงดันจาก SUPPLY จ่ายให้กับขา REF. Hi. และขา REF. Lo. ของไอซี # 7106 เพื่อที่จะกำหนดค่าสูงสุดในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. บทสรุปและวิจารณ์

จากการทดลองใช้งานวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าประจุไฟฟ้า ต่าง ๆ เราจะพบว่ายังมีจุดบกพร่องบางจุดที่จะต้องนำมาปรับปรุงแก้ไข ซึ่งข้อบกพร่องของเครื่องวัด Digital L-C Meter นี้ก็คือ ตัวเลขจะไม่ค่อยนิ่งเท่าที่ควร โดยหลักสุดท้ายจะเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมา ประมาณ ±1 แนวทางแก้ไข อาจจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่พันแยกขดเพื่อที่จะจ่ายแรงดันให้กับภาคแสดงผลโดยอิสระ จะทำให้แรงดันที่จ่ายให้กับภาคแสดงผลไม่เกิดการกระเพื่อม

เนื่องจากภาคแสดงผลของ Digital L-C Meter มีแรงดันอินพุทที่ต่ำมาก คือ 200 mV.(Full-Scale) ดังนั้นการเดินสายนำสัญญาณจึงควรจะสั้นที่สุดและหลีกเลี่ยงการเดินสายสัญญาณผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการวัดค่าที่ผิดพลาดได้

ในย่าน mF. จะใช้ความถี่ 10 Hz. เนื่องจากที่ความถี่ 100 Hz. จะใช้กระแสมากเกินไป ในย่านการวัดค่าจะมีค่าผิดพลาด 10-15 %

การนำ Analog SW. ไปใช้ตัดต่อวงจร เพื่อนำสัญญาณหรือต่อวงจรเพื่อที่จะลด Impedance ควรจะต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานภายในและค่าสูงสุดของสัญญาณ ที่จะใช้ส่งสัญญาณผ่าน Analog SW. เพราะอาจทำให้ค่าที่วัดได้เกิดการผิดพลาดได้ ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัด Digital L-C Meter ได้แสดงไว้ในคุณลักษณะของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของเครื่อง DIGITAL L- C METER

การวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (INDUCTANCE)

ย่านการวัด : 0.2 - 2 mH. (Resolution 1 μH.)

2 - 20 mH. (Resolution 10 μH.)

20 - 200 mH. (Resolution 0.1μH.)

0.2 - 2 H. (Resolution 1 mH.)

เปอร์เซนต์การผิดพลาด : $\pm$ 1%

ความถี่ที่ใช้ในการวัด : 2500 Hz.

การวัดค่าความจุไฟฟ้า (CAPACITANCE)

ย่านการวัด : 2 - 200 pF. (Resolution 0.1 pF.)

0.2 - 20 nF. (Resolution 10 pF.)

.02 - 2 μF. (Resolution 1 nF.)

เปอร์เซนต์ผิดพลาด : $\pm$ 1%

ความถี่ที่ใช้ในการวัด : 1 KHz.

ย่านการวัด : 2 - 200 μF. (Resolution 100 nF.)

20 - 2000μF. (Resolution 1 μF.)

เปอร์เซนต์ผิดพลาด : $\pm$ 3%

ความถี่ที่ใช้ในการวัด : 100 Hz.

ย่านการวัด : 0.2 - 20 mF. (Resolution 10 μF.)

เปอร์เซนต์ผิดพลาด : $\pm$ 10%

ความถี่ที่ใช้ในการวัด : 10 Hz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

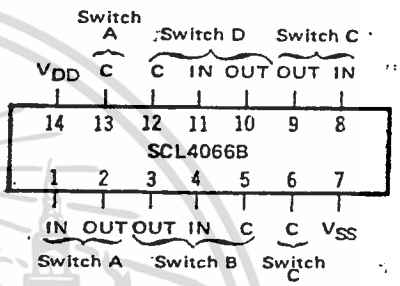
SCL4066B

CMOS QUAD ANALOG SWITCH

FEATURES

- Transmission or Multiplexing of Analog or Digital Signals
- 80Ω Typical ON-Resistance for 15-Volt operation
- Switch ON-Resistance Matched to within 5Ω over 15-Volt Signal-Input Range
- ON-Resistance Flat over Full Peak-to-Peak Signal Range
- High Degree of Linearity:
  ≤0.5% Distortion (typ) @ f_{is} = 1kHz,
  V_{is} = 5V_{p-p}, V_{DD}-V_{SS} ≥ 10V, R_L = 10kΩ
- Extremely Low OFF switch Leakage Resulting in very Low Offset Current and High Effective OFF Resistance:
  10pA (typ) @ V_{DD}-V_{SS} = 10V, T_A = 25°C
- Extremely High Control Input Impedance (Control Circuit Isolated from Signal Circuit):
  10^{12}Ω (typ)
- Low Crosstalk between Switches:
  -50dB (typ) @ f_{is} = 0.9MHz, R_L = 1kΩ
- Matched Control-Input to Signal-Output Capacitance Reduces Output Signal Transients
- Frequency Response, Switch ON = 40MHz (typ)

CONNECTION DIAGRAM
(all packages)



Add suffix for package:

C	14-pin Cerdip	F	14-pin Flat
D	14-pin Ceramic	H	Chip
E	14-pin Epoxy		

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

For maximum reliability:

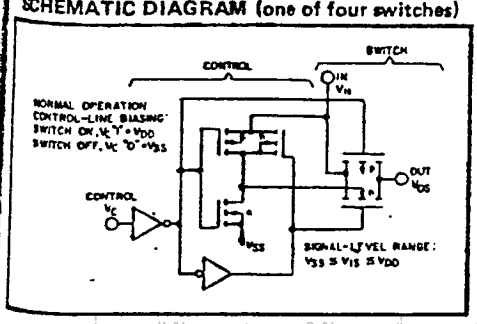
DC Supply Voltage	V_{DD} - V_{SS}	3 to 15	Vdc
Operating Temperature	T_A		
C, D, F, H Device		-55 to +125	°C
E Device		-40 to +85	°C

DESCRIPTION

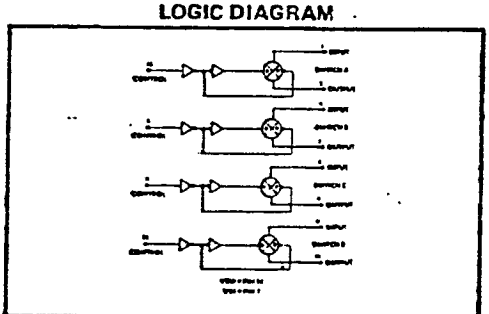
The SCL4066B is a Quad Bilateral Switch intended for the transmission or multiplexing of analog or digital signals. It is pin-for-pin compatible with the SCL4016B, but exhibits a much lower ON-resistance. In addition, the ON-resistance is relatively constant over the full input signal range. The SCL4066 consists of four independent bilateral switches. A single control signal is required per switch. Both the P and the N device in a given switch are biased ON or OFF simultaneously by the control signal. As shown below, the well of the N-channel device on each switch is either tied to the input when the switch is ON or to V_{SS} when the switch is OFF. This configuration minimizes the variation of the switch-transistor threshold voltage with input-signal, and thus keeps the ON-resistance low over the full operating range.

The advantages over single-channel switches include peak input-signal voltage swings equal to the full supply voltage, and more constant ON-impedance over the input-signal range. For sample-and-hold applications, however, the SCL4016 is recommended.

SCHEMATIC DIAGRAM (one of four switches)



LOGIC DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

STATIC CHARACTERISTICS [1, 3]

PARAMETER		CONDITIONS	V_{SS} (Vdc)	V_{DD} (Vdc)	T_{LOW} [2] Min.	T_{LOW} [2] Max.	25°C Min.	25°C Typ.	25°C Max.	T_{HIGH} [2] Min.	T_{HIGH} [2] Max.	Unit
QUIESCENT DEVICE CURRENT	I_{DD}	$V_{IN} = V_{SS}$ or V_{DD}	0	5	—	0.05	—	0.0005	0.05	—	1.5	μA
		All valid input	0	10	—	0.1	—	0.001	0.1	—	3.0	
		combinations	0	15	—	0.2	—	0.002	0.2	—	6.0	
MINIMUM INPUT HIGH VOLTAGE (Control Input)	V_{IH}	$V_{IS} = V_{SS}$	0	5	—	4.0	—	2.75	4.0	—	4.0	Vdc
		$V_{OS} = V_{DD}$	0	10	—	8.0	—	5.5	8.0	—	8.0	
		$I_{OS} = 10\mu A$	0	15	—	12.0	—	8.25	12.0	—	12.0	
MAXIMUM INPUT LOW VOLTAGE (Control Input)	V_{IL}	$V_{IS} = V_{SS}$	0	5	1.0	—	1.0	2.25	—	1.0	—	Vdc
		$V_{OS} = V_{DD}$	0	10	2.0	—	2.0	4.5	—	2.0	—	
		$I_{OS} = 10\mu A$	0	15	3.0	—	3.0	6.75	—	3.0	—	
SWITCH INPUT/OUTPUT LEAKAGE	I_{OFF}	$V_C = V_{SS}$	-7.5	+7.5	—	±100	—	±0.01	±100	—	±200	nA
		$V_{IS} = \pm 7.5$Vdc										
ON-RESISTANCE C,D,F,H device	R_{ON}	$V_C = V_{DD}$	-7.5	+7.5	—	220	—	80	280	—	320	Ω
		$V_{SS} \leq V_{IS} \leq V_{DD}$	0	+15								
		$R_L = 10k\Omega$	-5	+5	—	310	—	120	400	—	550	Ω
			0	+10								
			-2.5	+2.5	—	2000	—	270	2500	—	3500	Ω
			0	+5								
E device	R_{ON}	$V_C = V_{DD}$	-7.5	+7.5	—	250	—	80	280	—	300	Ω
		$V_{SS} \leq V_{IS} \leq V_{DD}$	0	+15								
		$R_L = 10k\Omega$	-5	+5	—	330	—	120	400	—	520	Ω
			0	+10								
			-2.5	+2.5	—	2100	—	270	2500	—	3200	Ω
			0	+5								
ON-RESISTANCE MATCH (Same package)	ΔR_{ON}	$V_C = V_{DD}$	-7.5	+7.5	—	—	—	5	—	—	—	Ω
		$V_{SS} \leq V_{IS} \leq V_{DD}$	0	+15								
		$R_L = 10k\Omega$	-5	+5	—	—	—	10	—	—	—	Ω
			0	+10								
			-2.5	+2.5	—	—	—	10	—	—	—	Ω
			0	+5								

NOTES: [1] Remaining Static Electrical Characteristics are listed under "SCL4000B Series Family Specifications"

[2] $T_{LOW} = -55°C$ for C, D, F, H device.
$= -40°C$ for E device.
$T_{HIGH} = +125°C$ for C, D, F, H device.
$= +85°C$ for E device.

[3] This device has been designed for balanced output drive current specifications. Consult Family Specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TICS

	25°C			T_{HIGH}[2]		
Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Max.	Units
0.05	—	0.0005	0.05	—	1.5	µA
0.1	—	0.001	0.1	—	3.0	
0.2	—	0.002	0.2	—	6.0	
4.0	—	2.75	4.0	—	4.0	V
8.0	—	5.5	8.0	—	8.0	
2.0	—	8.25	12.0	—	12.0	
—	1.0	2.25	—	1.0	—	V
—	2.0	4.5	—	2.0	—	
—	3.0	6.75	—	3.0	—	
00	—	±0.01	±100	—	±200	nA
20	—	80	280	—	320	Ω
10	—	120	400	—	550	Ω
00	—	270	2500	—	3500	Ω
60	—	80	280	—	300	Ω
80	—	120	400	—	520	Ω
0	—	270	2500	—	3200	Ω
	—	5	—	—	—	Ω
	—	10	—	—		Ω
	—	10	—	—		Ω

nily Specifications"

nsult Family Specifications.

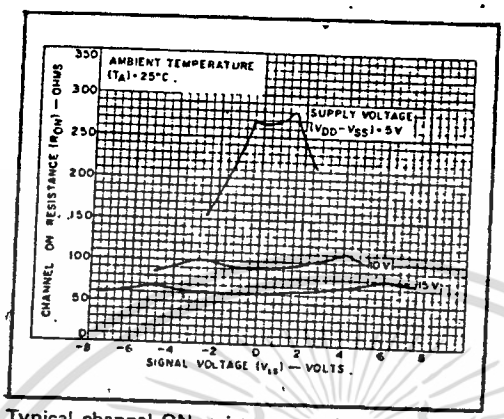
SCL4066B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Continued)

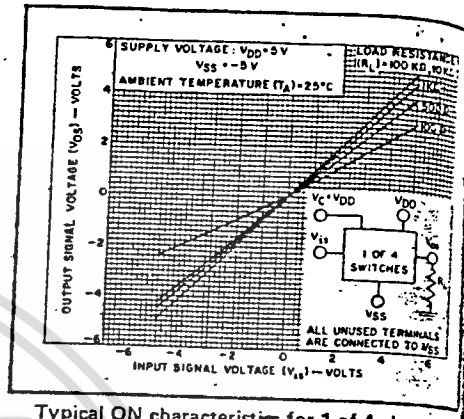
DYNAMIC CHARACTERISTICS (C_L = 50pF, T_A = 25°C)

PARAMETER		CONDITIONS	V_{SS} (Vdc)	V_{DD} (Vdc)	Min.	Typ.	Max.	Units
SIGNAL INPUTS (V_{is}) AND OUTPUTS (V_{os})								
PROPAGATION DELAY TIME Signal Input to Signal Output	t_{PLH}, t_{PHL}	V_c=V_{DD} V_{is}=Square Wave R_L = 10kΩ	0 0 0	5 10 15	— — —	20 10 7.5	40 20 15	ns
BANDWIDTH (-3dB) (Sine Wave)	BW	V_c=V_{DD} R_L V_{is}=5V_{p-p} 1kΩ centered 10kΩ @ 0.0Vdc 100kΩ 1MΩ	-5	+5	— — — —	54 40 38 37	— — — —	MHz
INSERTION LOSS $(=20\ \log_{10}\frac{V_{os}}{V_{is}})$		V_c=V_{DD} R_L V_{is}=5V_{p-p} 1kΩ centered 10kΩ @ 0.0Vdc 100kΩ 1MΩ	-5	+5	— — — —	2.3 0.2 0.1 0.05	— — — —	dB
SIGNAL DISTORTION (Sine Wave)		V_c=V_{DD} V_{is}=5V_{p-p} centered @ 0.0Vdc f_{is}=1.0kHz R_L = 10kΩ	-5	+5	—	0.16	—	%
FEEDTHROUGH (-50dB)		V_c=V_{SS} R_L V_{is}=5V_{p-p} 1kΩ centered 10kΩ @0.0Vdc 100kΩ 1MΩ	-5	+5	— — — —	1250 140 18 2	— — — —	kHz
CROSSTALK (-50dB) Between two switches		V_c(A)=V_{DD} V_c(B)=V_{SS} V_{is}(A)=5V_{p-p} centered @0.0Vdc R_L = 10kΩ	-5	+5	—	0.9	—	MHz
CAPACITANCE Input	C_{is}				—	8	—	pF
Output	C_{os}	V_C = V_{SS}	-5	+5	—	8	—	pF
Feedthrough	C_{ios}				—	0.5	—	pF
CONTROL INPUT (V_C)								
PROPAGATION DELAY TIME Turn on	t_{PC}	V_{SS}≤V_{is}≤V_{DD} R_L = 10kΩ	0 0 0	5 10 15	— — —	50 25 20	100 50 40	ns
MAXIMUM INPUT FREQUENCY	f_c	V_{SS}≤V_{is}≤V_{DD} R_L = 1.0kΩ	0 0 0	5 10 15	— — —	5 10 12	— — —	MHz
CROSSTALK (To signal port)		V_c=Square Wave R_L = 10kΩ R_{in} = 1.0kΩ	0 0 0	5 10 15	— — —	30 50 100	— — —	mV

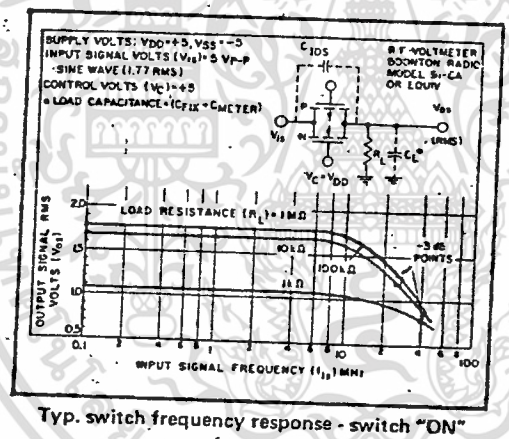
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



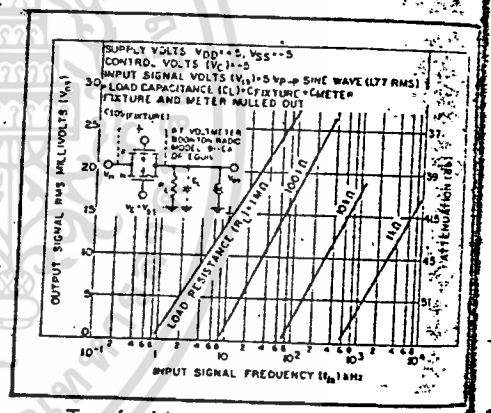
Typical channel ON resistance vs. signal voltage for three values of supply voltage (V_{DD}-V_{SS})



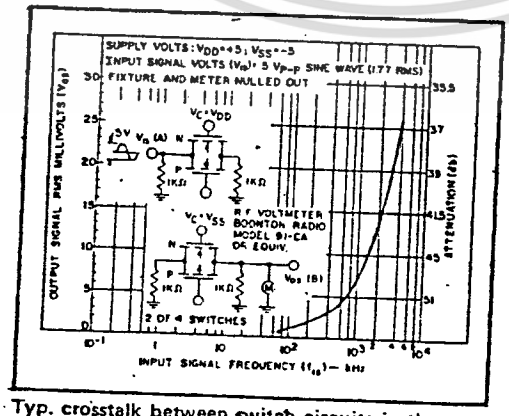
Typical ON characteristics for 1 of 4 channels.



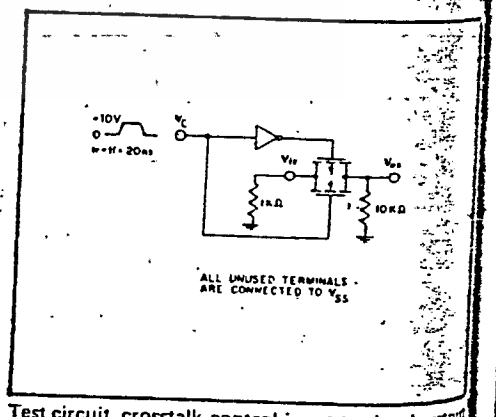
Typ. switch frequency response - switch "ON"



Typ. feedthru vs. freq. — switch "OFF"



Typ. crosstalk between switch circuits in the same package



Test circuit, crosstalk-control input to signal output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCL4070B

CMOS QUAD EXCLUSIVE-OR GATE

FEATURES

- Buffered Outputs
- Diode Protection on all Inputs
- Fully "B"-Series Compatible
- Balanced Output Drive Current Specifications
- Pin Compatible with 4030 types, MC14507, 74C86

DESCRIPTION

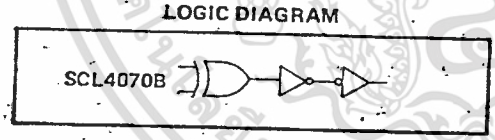
The SCL4070B contains four independent exclusive-OR gates integrated on a single monolithic silicon chip. Each exclusive-OR gate consists of five N-channel and five P-channel enhancement-mode transistors, plus output buffering devices.

TRUTH TABLE
(one of four gates)

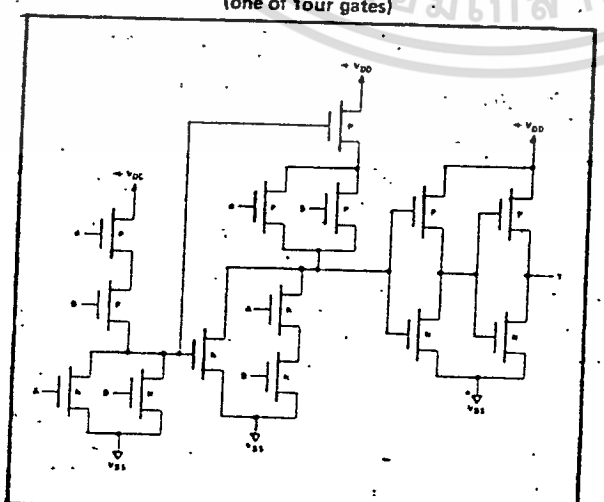
A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Where 1 = High Level
0 = Low Level

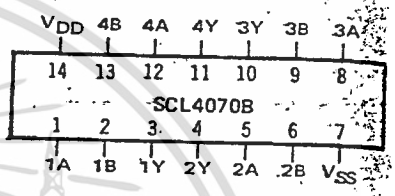
LOGIC DIAGRAM



SCHEMATIC DIAGRAM
(one of four gates)



CONNECTION DIAGRAM
(all packages)



Add suffix for package:

- C 14-pin Cerdip
- D 14-pin Ceramic
- E 14-pin Epoxy
- F 14-pin Flat
- H Chip

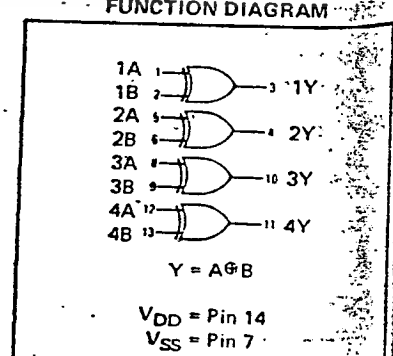
RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

For maximum reliability:

DC Supply Voltage	$V_{DD} - V_{SS}$	3 to 15 V
Operating Temperature	T_A	
C, D, F, H Device		-55 to +125 °C
E Device		-40 to +85 °C

Note: The SCL4070B is identical to the SCL4030; the devices are fully interchangeable in all applications.

FUNCTION DIAGRAM



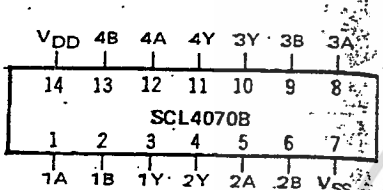
Y = A⊕B

V_{DD} = Pin 14
V_{SS} = Pin 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

...AD EXCLUSIVE-OR GA

CONNECTION DIAGRAM
(all packages)



Add suffix for package:

- C 14-pin Cerdip
- D 14-pin Ceramic
- E 14-pin Epoxy
- F 14-pin Flat
- H Chip

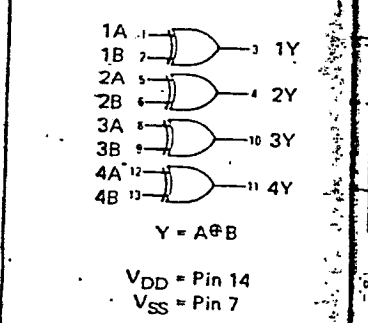
...MENDED OPERATING CONDITIONS

...aximum reliability:

...upply Voltage	$V_{DD} - V_{SS}$	3 to 15
...ating Temperature	T_A	
..., F, H Device		-55 to +125
...evice		-40 to +85

The SCL4070B is identical to the SCL403... the devices are fully interchangeable in... applications.

FUNCTION DIAGRAM



$Y = A \oplus B$

V_{DD} = Pin 14
V_{SS} = Pin 7

...4070B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

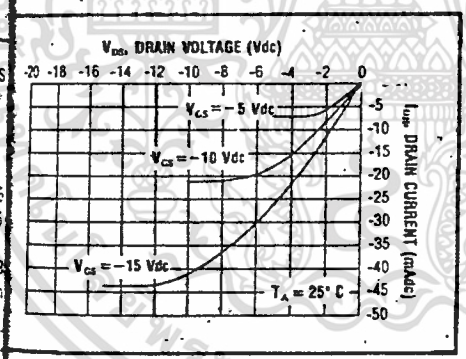
STATIC CHARACTERISTICS [1,3]

PARAMETER		V_{DD} (Vdc)	CONDITIONS	T_{LOW} [2] Min.	T_{LOW} [2] Max.	+25°C Min.	+25°C Typ.	+25°C Max.	T_{HIGH} [2] Min.	T_{HIGH} [2] Max.	Units
QUIESCENT DEVICE CURRENT	I_{DD}	5	$V_{IN} = V_{SS}$ or V_{DD}	–	0.05	–	0.0005	0.05	–	1.5	μAdc
		10	All valid input	–	0.10	–	0.001	0.10	–	3.0	
		15	combinations	–	0.20	–	0.002	0.20	–	6.0	

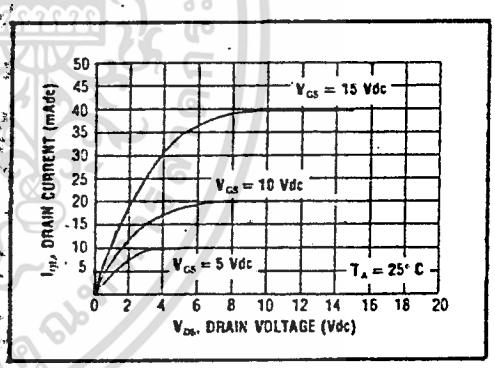
NOTES: [1] Remaining Static Electrical Characteristics are listed under "SCL4000B Series Family Specifications".
[2] T_{LOW} = −55°C for C, D, F, H device.
= −40°C for E device.
T_{HIGH} = +125°C for C, D, F, H device.
= + 85°C for E device.
[3] This device has been designed for balanced output drive current specifications. Consult Family Specifications.

DYNAMIC CHARACTERISTICS (C_L = 50pF, T_A = 25°C)

PARAMETER		V_{DD} (Vdc)	Min.	Typ.	Max.	Units
PROPAGATION DELAY TIME	t_{PLH}, t_{PHL}	5	–	175	350	ns
		10	–	70	140	
		15	–	50	100	
OUTPUT TRANSITION TIME	t_{TLH}, t_{THL}	5	–	100	200	ns
		10	–	50	100	
		15	–	40	80	

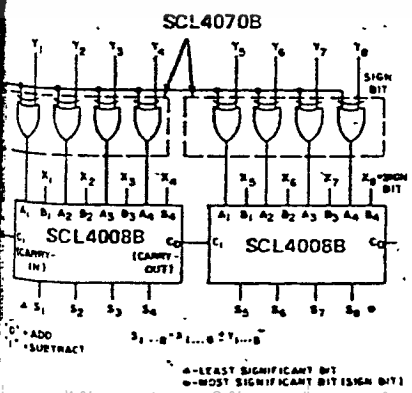


Typical P-Channel
Source Current Characteristics



Typical N-Channel
Sink Current Characteristics

APPLICATIONS INFORMATION
8-BIT TWO'S COMPLEMENT ADDER/SUBTRACTOR



X_8	X_7	X_6	X_5	X_4	X_3	X_2	X_1		X_8	X_7	X_6	X_5	X_4	X_3	X_2	X_1	
0	0	0	0	0	0	0	0	= 0	1	1	1	1	1	1	1	1	= −1
0	0	0	0	0	0	0	1	= 1	1	1	1	1	1	1	1	0	= −2
0	0	0	0	0	0	1	0	= 2	1	1	1	1	1	1	0	1	= −3
0	0	0	0	0	0	1	1	= 3	1	1	1	1	1	1	0	0	= −4
									1	1	1	1	1	0	1	1	= −5
0	1	1	1	1	1	1	0	= 126	1	0	0	0	0	0	0	1	= −127
0	1	1	1	1	1	1	1	= 127	1	0	0	0	0	0	0	0	= −128

Two's complement numbers and
their equivalent decimal values

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3½-Digit Single Ch
A/D Convert

4

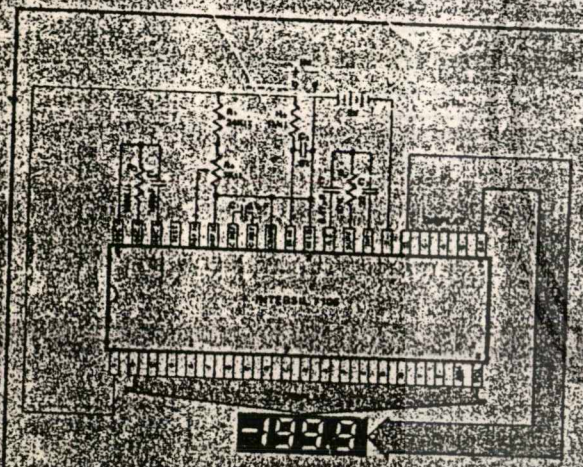
FEATURES

- Guaranteed zero reading for 0 volts input on all scales.
- True polarity at zero for precise null detection.
- 1 pA typical input current.
- True differential input and reference.
- Direct display drive - no external components required. — LCD ICL7106 — LED ICL7107
- Low noise - less than 15μV p-p.
- On-chip clock and reference.
- Low power dissipation - typically less than 10mW.
- No additional active circuits required.
- Evaluation Kit available.

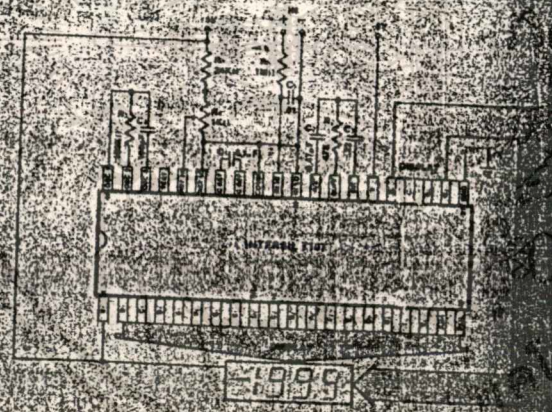
GENERAL DESCRIPTION

The Intersil ICL7106 and 7107 are high performance, low power 3½-digit A/D converters containing all the necessary active devices on a single CMOS LSI. Included are seven segment decoders, display drivers, reference, and a clock. The 7106 is designed to interface with a liquid crystal display (LCD) and includes a backplane driver. The 7107 will directly drive an instrument-size light emitting diode (LED) display.

The 7106 and 7107 bring together an unprecedented combination of high accuracy, versatility, and true economy. High accuracy like auto-zero to less than 10μV, zero drift of less than 1μV/°C, input bias current of 10 pA max., and a roll-over error of less than one count. The versatility of true differential input and reference is useful in all systems, but gives the designer an unlimited advantage when measuring bridge type transducers - load cells, strain gauges and other bridge-type transducers. And finally the true economy of single power supply operation (7106), enabling a high performance panel meter to be built with the addition of only 7 passive components and a display.



7106 with Liquid Crystal Display

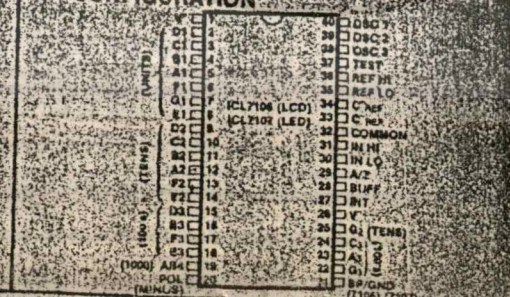


7107 with LED Display

ORDERING INFORMATION

Part	Package	Temp. Range	Order Part #
7106	40 pin ceramic DIP	0°C to +70°C	ICL7106CDL
7106	40 pin plastic DIP	0°C to +70°C	ICL7106CPL
7106	40 pin CERDIP	0°C to +70°C	ICL7106CJL
7107	40 pin CERDIP	0°C to +70°C	ICL7107CJL
7107	40 pin ceramic DIP	0°C to +70°C	ICL7107CDL
7107	40 pin plastic DIP	0°C to +70°C	ICL7107CPL
7106 Kit 7107 Kit	Evaluation kits contain IC, display, circuit board, passive components and hardware.		ICL7106EV/Kit ICL7107EV/Kit

PIN CONFIGURATION



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage
- ICL7106, V⁺ to V⁻ 15V
- ICL7107, V⁺ to GND ..... +6V
- ICL7107, V⁻ to GND ..... -9V

Analog Input Voltage (either input) (Note 1) ..... V⁻ to V⁺
Reference Input Voltage (either input) ..... V⁻ to V⁺
Clock Input
- ICL7106 ..... TEST to V⁺
- ICL7107 ..... GND to V⁺

Power Dissipation (Note 2)
- Ceramic Package 1000mW
- Plastic Package 800mW

Operating Temperature ..... 0°C to +70°C
Storage Temperature ..... -65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec) ..... 300°C

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Note 1: Input voltages may exceed the supply voltages provided the input current is limited to ±100μA.
Note 2: Dissipation rating assumes device is mounted with all leads soldered to printed circuit board.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Note 3)

CHARACTERISTICS	CONDITIONS	MIN	TYP
Zero Input Reading	V_{IN} = 0.0V Full Scale = 200.0mV	-000.0	±000.0
Ratiometric Reading	$V_{IN} = V_{REF}$ V_{REF} = 100mV	999	999/1000
Rollover Error (Difference in reading for equal positive and negative reading near Full Scale)	$-V_{IN} = +V_{IN} \simeq$ 200.0mV	-1	±2
Linearity (Max. deviation from best straight line fit)	Full scale = 200mV or full scale = 2.000V	-1	±1
Common Mode Rejection Ratio (Note 4)	V_{CM} = ±1V, V_{IN} = 0V Full Scale = 200.0mV		50
Noise (Pk-Pk value not exceeded 95% of time)	V_{IN} = 0V Full Scale = 200.0mV		15
Leakage Current at Input	V_{IN} = 0		1
Zero Reading Drift	V_{IN} = 0 0°C ≤ T_A ≤ 70°C		0.2
Scale Factor Temperature Coefficient	V_{IN} = 199.0mV 0°C ≤ T_A ≤ 70°C (Ext. Ref. 0ppm/°C)		1
V^+ Supply Current (Does not include LED current for 7107)	V_{IN} = 0		0.8
V^- Supply Current (7107 only)			0.6
Analog Common Voltage (With respect to Pos. Supply)	25kΩ between Common & Pos. Supply	2.4	2.8
Temp. Coeff. of Analog Common (With respect to Pos. Supply)	25kΩ between Common & Pos. Supply		80
7106 ONLY Pk-Pk Segment Drive Voltage Pk-Pk Backplane Drive Voltage (Note 5)	V^+ to V^- = 9V	4	5 5
7107 ONLY Segment Sinking Current (Except Pin 19) Pin 19 only)	V^+ = 5.0V Segment voltage = 3V	5 10	8.0 16

Note 3: Unless otherwise noted, specifications apply to both the 7106 and 7107 at T_A = 25°C, fclock = 48kHz. The 7107 is tested in the circuit of Figure 2.
Note 4: Refer to "Differential Inputs" discussion.
Note 5: Back plane drive is in phase with segment drive for 'off' segment, and out of phase for 'on' segment.

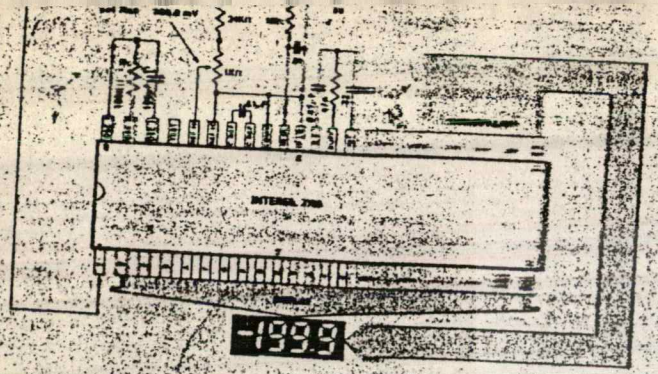


Figure 1: 7126

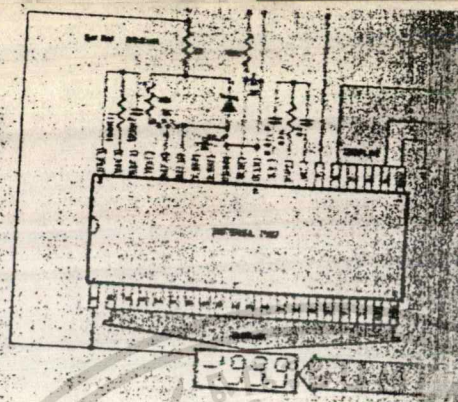


Figure 2: 7107

DETAILED DESCRIPTION

ANALOG SECTION

Figure 3 shows the Block Diagram of the Analog Section for the ICL7106 and 7107. Each measurement cycle is divided into three phases. They are (1) auto-zero (A-Z), (2) signal integrate (INT) and (3) de-integrate DE.

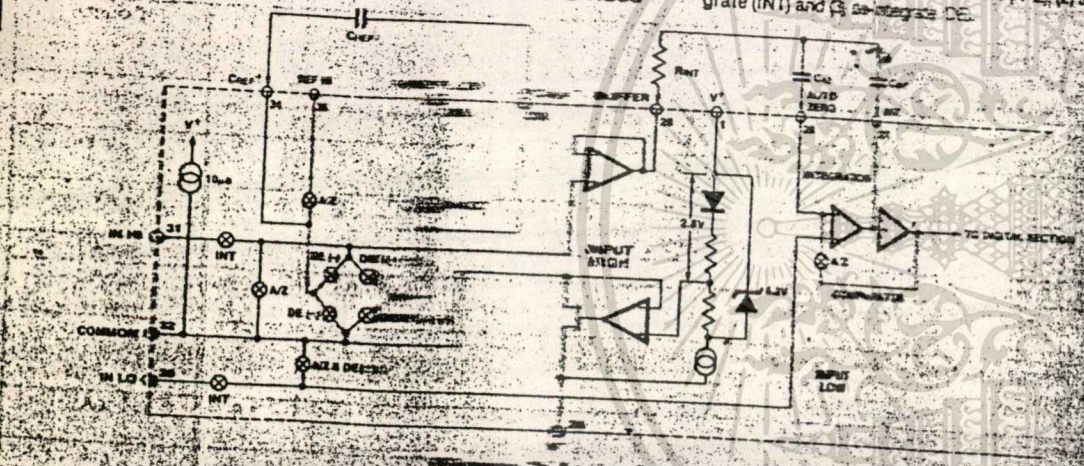


Figure 3: Analog Section of 7106/7107

1. Auto-zero phase

During auto-zero three things happen. The input high and low are disconnected from the pins internally and shorted to analog COMMON. Second, the reference capacitor is charged to the reference voltage. Third, a feedback loop is closed around the system to charge the auto-zero capacitor CAZ to compensate for offset voltages in the buffer amplifier, integrator and comparator. Since the comparator is included in the loop, the A-Z accuracy is limited only by the noise of the system. In any case, the offset referred to the input is less than 10μV.

2. Signal integrate phase

During signal integrate, the auto-zero loop is opened, the internal short is removed, and the internal input high and low are connected to the external pins. The integrator then integrates the differential voltage between IN HI and IN LO for a fixed time. This differential voltage can be within a wide common mode range; within one volt of either supply. If, on the other hand, the input signal has no return with respect to the converter power supply, IN LO can be tied to analog COMMON to establish the correct common-mode voltage. At the end of this phase the polarity of the integrated signal is determined.

3. De-integrate phase

The final phase is de-integrate, or reference integrate. Input low is internally connected to analog COMMON and input high is connected across the previously charged reference capacitor. Circuitry within the chip ensures that the capacitor will be connected with the polarity to cause the integrator output to return to zero. The time required for the output to return to zero is proportional to the input signal. Specifically the digital reading displayed is 1000 (...

...input can accept differential voltages anywhere within the common mode range of the input amplifier; or specifically from 0.5 volts below the positive supply to 1.0 volt above the negative supply. In this range the system has a CMRR of 86 dB typical. However, since the integrator also swings with the common mode voltage, care must be exercised to assure the integrator output does not saturate. A worst case condition would be a large positive common-mode voltage with a near full-scale negative differential input voltage. The negative input signal drives the integrator positive when most of its swing has been used up by the positive common mode voltage. For these critical applications the integrator swing can be reduced to less than the recommended 2V full scale swing with little loss of accuracy. The integrator output can swing within 0.3 volts of either supply without loss of linearity. See A032 for a discussion of the effects of stray capacitance.

Differential Reference

The reference voltage can be generated anywhere within the power supply voltage of the converter. The main source of common mode error is a roll-over voltage caused by the reference capacitor losing or gaining charge to stray capacity on its nodes. If there is a large common mode voltage, the reference capacitor can gain charge (increase voltage) when called up to de-integrate a positive signal but lose charge (decrease voltage) when called up to deintegrate a negative input signal. This difference in reference for (+) or (-) input voltage will give a roll-over error. However, by selecting the reference capacitor large enough in comparison to the stray capacitance, this error can be held to less than 0.5 count for the worst case condition. (See Component Value Selection.)

Analog COMMON

This pin is included primarily to set the common mode voltage for battery operation (7106) or for any system where the input signals are floating with respect to the power supply. The COMMON pin sets a voltage that is approximately 2.8 volts more negative than the positive supply. This is selected to give a minimum end-of-life battery voltage of about 6V. However, the analog COMMON has some of the attributes of a reference voltage. When the total supply voltage is large enough to cause the zener to regulate (>7V), the COMMON voltage will have a low voltage coefficient (.001%/%), low output impedance (≈15Ω), and a temperature coefficient typically less than 80ppm/°C.

The limitations of the on-chip reference should also be recognized, however. With the 7107, the internal heating which results from the LED drivers can cause some degradation in performance. Due to their higher thermal resistance, plastic parts are poorer in this respect than ceramic. The combination of reference Temperature Coefficient (TC), internal chip dissipation, and package thermal resistance can increase noise near full scale from 25 μV to 80μVp-p. Also the linearity in going from a high dissipation count such as 1000 (20 segments on) to a low dissipation count such as 1111 (8 segments on) can suffer by a count or more. Devices with a positive TC reference may require several counts to pull out of an overload condition. This is because overload is a low dissipation mode, with the three least significant digits blanked. Similarly, units with a negative TC may cycle between overload and a non-overload count as the die alternately heats and cools. All

reference is used.

The 7106, with its negligible dissipation, of these problems. In either case, an exter easily be added, as shown in Fig. 4.

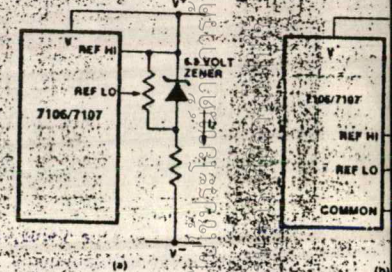


Figure 4: Using an External Refer

Analog COMMON is also used as the inpu ing auto-zero and de-integrate. If IN LO analog COMMON, a common mode volt system and is taken care of by the excell converter. However, in some applications at a fixed known voltage (power supply stance). In this application, analog COMM to the same point, thus removing the comm from the converter. The same holds true voltage. If reference can be conveniently analog COMMON, it should be since this re mon mode voltage from the reference syste

Within the IC, analog COMMON is tied to a that can sink 30mA or more of current to hol volts below the positive supply (when a load the common line positive). However, there source current, so COMMON may easily b negative voltage thus over-riding the intern

TEST

The TEST pin serves two functions. On the 7 to the internally generated digital supply resistor. Thus it can be used as the nega externally generated segment drivers such as or any other presentation the user may want t LCD display. Figures 5 and 8 show such an more than a 1mA load should be applied.

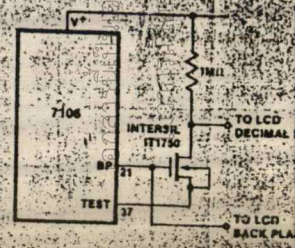


Figure 5: Simple Inverter for Fixed Decim

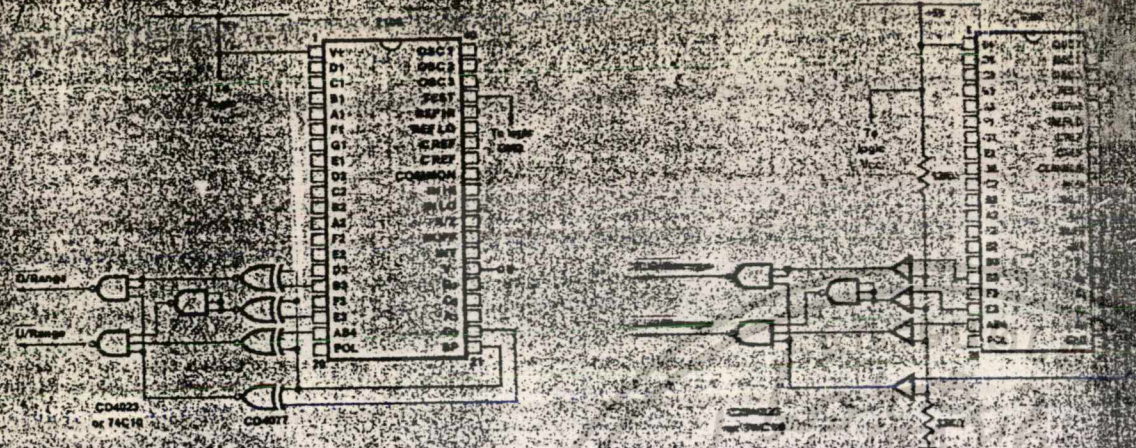


Figure 19: Circuit for developing Underrange and Overrange signals from 7106 outputs.

Figure 20: Circuit for developing Underrange and Overrange outputs. The LM339 is required to provide accuracy with heavy display loading.

Figure 21: A/D to DC Converter with ground reference is used as a common mode reference level to ensure compatibility with most op amps.

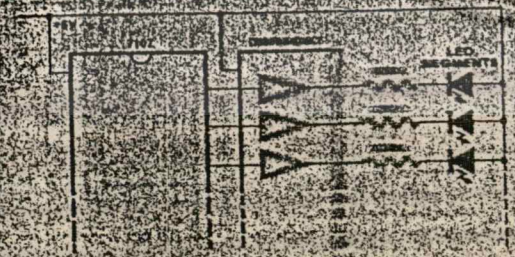
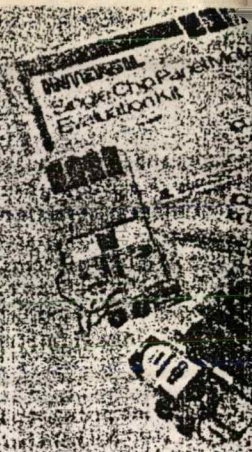


Figure 22: Display Buffering for increased drive current. Requires four DM7407 Hex Buffers. Each buffer has the capacity of sinking 40 mA.

7106/7107 EVALUATION KITS

Before purchasing a sample of the 7106 or the 7107, the majority of users will want to build a simple voltmeter. The parts can then be evaluated against the data sheet specifications, and tried out in the intended application. However, locating and purchasing even the small number of additional components required, then wiring a breadboard, can often cause delays of days or sometimes weeks. To avoid the problem and facilitate evaluation of these unique parts, Intersil is offering a kit which contains all the necessary components to build a 3½-digit panel meter. With the help of this kit, an engineer or technician can have the system "up and running" in about half an hour.

Two "kits" are offered, the "ICL7106EV/KIT" and "the ICL7107EV/KIT". Both contain the appropriate IC, a circuit board, a display (LCD - for 7106EV/KIT, LEDs - for 7107EV/KIT), passive components, and miscellaneous hardware.



APPLICATION NOTES

- "Selecting A/D Converters", by David Fullagar.
- "The Integrating A/D Converter", by Lee Evans.
- "Do's and Don'ts of Applying A/D Converters", by Peter Bradshaw and Skip Osgood.
- "4½-Digit Panel Meter Demonstrator/Instrumentation Boards", by Michael Dufort.
- "Low Cost Digital Panel Meter Designs", by David Fullagar and Michael Dufort.
- "Understanding the Auto-Zero and Common Mode Performance of the ICL7106/7/9 Family", by
- "Building a Battery-Operated Auto Ranging DVM with the ICL7106", by Larry Goff.
- "Tips for Using Single-Chip 3½-Digit A/D Converters", by Dan Watson.

เอกสารอ้างอิง

1. CURTIS D. JOHNSON "PROCESS CONTROL INSTRUMENTATION"
   JOHN WILEY & SONS , INC. NY. USA, THIRD EDITION
2. สมเกียรติ พึ่งอาตม์ "ไฟฟ้ากระแสตรง" และ "ไฟฟ้าอุตสาหกรรม"
   โรงพิมพ์ อักษรประเสริฐ , 2516.
3. บริษัท ดวงกมล " CEW " ฉบับที่ 112 และ ฉบับที่ 120 , 2530.
4. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น " SEMICONDUCTOR ELECTRONICS " ฉบับที่ 92 , 2532.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ ต้องขอขอบคุณ อาจารย์ ภากร หุตะสังกาศ ของโปรเจคนี้ที่ได้แนะนำแนวทาง ชี้จุดประสงค์ และให้คำปรึกษาตั้งแต่เริ่มต้นจนจบด้วยดีเสมอมา

และขอขอบคุณอาจารย์ ภาคเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ได้ช่วยเหลือการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้