รายงานวิจัย

วงจรกรองหยุดแถบขนาดเล็กสำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สาย

Small Bandstop Filter for Wireless Communication Networks

ว่าที่ร้อยตรีวรชัย ศรีสมุดคำ

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประจำปีงบประมาณ 2557

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรกรองหยุดแถบขนาดเล็กสำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สาย

Small Bandstop Filter for Wireless Communication Networks

ว่าที่ร้อยตรีวรชัย ศรีสมุดคำ
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ทุนอุดหนุนโดย มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ประจำปีงบประมาณ 2557

ชื่องานวิจัย วงจรกรองหยุดแถบขนาดเล็กสำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สาย
Small Bandstop Filter for Wireless Communication Networks
ผู้วิจัย วรชัย ศรีสมุดคำ
สาขาวิชา สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอหลักการในการออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบสำหรับใช้งานในโครงข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย โดยวงจรกรองหยุดแถบทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรกรองผ่านแถบ 2 ย่านความถี่ ซึ่งจะแยกย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ต้องการใช้งานออกจากกัน

โดยจะแบ่งย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Dtac, TrueMove และ AIS) และย่านความถี่สูง 2.3 - 2.7 GHz เป็นย่านความถี่ของโครงข่ายไร้สาย WiFi และ WiMax

คำสำคัญ : วงจรกรองผ่านแถบ, วงจรกรองหยุดแถบ, โครงข่ายไร้สาย

Title Small Bandstop Filter for Wireless Communication Networks

Researcher Worachai Srisamoodkham

Major Computer Engineering

Phetchabun Rajabhat University 2015

ABSTRACT

This research presents a concept for designing and fabrication about a Band Stop Filter for existing dual-band wireless communication networks. This research Band Stop Filter acts as a dual-band Band Pass Filter to separate widely the low and high frequency bands.

The low frequency band, 800 – 900 MHz, can be served the mobile networks (Dtac, TrueMove and AIS), and the high frequency band, 2.3 – 2.7 GHz, can be served the wireless networks both WiFi and WiMAX.

Keywords : Bandpass Filter, Bandstop Filter, Wireless Communication Network

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยเรื่องวงจรกรองหยุดแถบขนาดเล็กสำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สาย สำเร็จได้เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้ข้อมูลข้อเสนอแนะ คำปรึกษาแนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้เขียน

ผู้วิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านของคณะเทคโนโลยีการเกษตร ที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจในการทำงาน และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ได้สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ช่วยส่งเสริมสนับสนุนกระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมาให้ผู้เขียนจัดทำรายงานการวิจัย

วรชัย ศรีสมุดคำ

12 มีนาคม 2558

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ตัวต้านทาน	3
2.2 ตัวเก็บประจุ	15
2.3 ตัวเหนี่ยวนำ	31
2.4 วงจรกรองความถี่	45
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	57
3.1 วงจรกรองความถี่	57
3.2 วงจรกรองหยุดแถบ	57
3.3 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์	58
บทที่ 4 ผลการวิจัย	61
4.1 ผลการทดสอบวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64
5.2 อภิปรายผล	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	64

สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม 66
ประวัติผู้วิจัย 67

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตรอน	23
2.2	แสดงอักษรที่บอกค่าผิดพลาดและอัตราทนแรงดันบนตัวเก็บประจุ	30

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงสัญลักษณ์ของตัวต้านทาน	3
2.2	ชนิดของตัวต้านทานแบบคงที่	3
2.3	ชนิดของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้	4
2.4	แสดงตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม	4
2.5	ขนาดของความต้านทาน	5
2.6	ขนาดและความคลาดเคลื่อนของความต้านทาน	6
2.7	ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน	7
2.8	ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ	7
2.9	ตัวต้านทานชนิดไวร์วาว์ด	8
2.10	ตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ	8
2.11	ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา	9
2.12	ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้แบบรีโอสตัส	10
2.13	ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้แบบเทนชิโอมิเตอร์	11
2.14	สัญญลักษณ์ของเทอมิตเตอร์	12
2.15	ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้โดยใช้แสง	13
2.16	การอ่านค่าความต้านทาน	13
2.17	การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม	14
2.18	ตัวอย่างการต่อตัวต้านทาน	14
2.19	การต่อตัวต้านทานแบบขนาน	15
2.20	ตัวเก็บประจุ	15
2.21	โครงสร้างของตัวเก็บประจุ	16
2.22	สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ	16
2.23	ตัวเก็บประจุไมก้าที่ห่อหุ้มด้วยฉนวนเมกาไลท์	16
2.24	ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก	17
2.25	ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติก	17
2.26	ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก	18

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.27	ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้	18
2.28	ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	19
2.29	สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	19
2.30	การเก็บประจุไฟฟ้า	20
2.31	ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต	22
2.32	แสดงการต่อตัวเก็บประจุ	24
2.33	ขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	27
2.34	ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	28
2.35	คาปาซิเตอร์ 3	28
2.36	คาปาซิเตอร์	28
2.37	การอ่านค่าคาปาซิเตอร์	29
2.38	คาปาซิเตอร์ 101	29
2.39	คาปาซิเตอร์ 154	30
2.40	การต่อตัวเหนี่ยวนำคร่อมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	31
2.41	ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	33
2.42	ตัวเหนี่ยวนำ	34
2.43	ตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้	34
2.44	ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ	35
2.45	ค่าความเหนี่ยวนำ	36
2.46	ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ	36
2.47	ความซาบซึมของวัสดุชนิดต่างๆ	37
2.48	รีเลย์	40
2.49	โครงสร้างภาพในรีเลย์	41
2.50	การเหนี่ยวนำของไมโครโฟน	42
2.51	ไมโครโฟนชนิดขดลวนเคลื่อนที่	43
2.52	โครงสร้างของลำโพง	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.53	สัญญาณและทิศทองของลำโพง	45
2.54	(inductors) หรือว่า ขดลวด	46
2.55	(capacitors) หรือว่า ตัวเก็บประจุ	46
2.56	ตัวต้านทาน	46
2.57	Low pass filter	46
2.58	Type low pass filter	47
2.59	Pi Type low pass filter	47
2.60	วงจร Low pass filter	48
2.61	High pass filter	48
2.62	วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบที่	49
2.63	วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาย	49
2.64	วงจร High pass filter	49
2.65	band pass filter วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม	50
2.66	band pass filter วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน	50
2.67	ตัวอย่าง band pass filter ย่านความถี่ 144 MHz +/- 7 MHz ทนกำลังส่งได้ 100 วัตต์	51
2.68	band stop filter วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม	51
2.69	band stop filter วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน	52
2.70	ตัวอย่าง band stop filter ใช้กับ ระบบทีวีรวม	52
2.71	Low Pass Filter	53
2.72	High Pass Filter	53
2.73	Band Pass Filter	53
2.74	Notch Filter	53
2.75	ตัวอย่างวงจร Crystal Filter แบบ Half-lattice Crystal Filter นิยมใช้ในเครื่องรับ SSB	54
2.76	ตัวอย่างวงจร Crystal Filter แบบ Ladder filter นิยมใช้ในวงจรเครื่องรับ CW	54
2.77	ACTIVE FILTER	55
3.1	band stop filter แบบอนุกรม	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.2	band stop filter แบบขนาน	58
3.3	วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์	59
3.4	ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองวงจรหยุดแถบ	59
4.1	ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการทดสอบวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ	62
4.2	ค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการทดสอบวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีด้านการสื่อสารได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารไร้สาย ไม่ว่าจะเป็น WLAN, WiMAX หรือ โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ดังนั้น ในการผลิตอุปกรณ์ด้านการสื่อสารนั้นจะต้องสามารถที่จะรองรับการใช้งานหลายประเภทของผู้ใช้ได้ ซึ่งการออกแบบวงจรเพียงวงจรเดียวแต่ใช้งานได้หลายย่านความถี่เท่านั้นที่ จะตอบสนองความต้องการและเป็นที่นิยมของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี วงจรหนึ่งที่สำคัญในอุปกรณ์ใช้งานทางด้านคลื่นวิทยุและย่านความถี่ไมโครเวฟ คือ วงจรกรองผ่านแถบ (Band-pass Filter)

อีกทั้ง ในปัจจุบันนี้ มีเครือข่ายสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าหลายย่านความถี่และระบบ เช่น ระบบโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (Universal Mobile Telecommunications System : UMTS) ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Dtac, TrueMove และ AIS), WLAN (WiFi), และ WMAN (WiMAX) ฯลฯ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่วงจรกรองผ่านแถบที่ถูกสร้างขึ้นมาใช้งาน ณ ขณะนี้ควรจะรองรับ การใช้งานได้หลายย่านความถี่

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านแถบออกมาอย่างมากมาย ยกตัวอย่าง เช่น C.-Y. Hsu *et al.* ได้นำเสนอวิธีหนึ่งที่นำสตับเปิดมาใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรกรองหยุดแถบ (Bandstop Filter) เพื่อสร้างวงจรกรองผ่านแถบ 2 ย่านความถี่ โดยกำหนดแถบหยุดเท่ากับ 5 – 6 GHz (แบนด์วิดธ์ -3 dB ที่ออกแบบได้มีความกว้างเท่ากับ 1 GHz) และ H.-Y. Anita Yim ได้นำเสนอหลักการในการสร้างวงจรกรองที่ยอมให้ย่านความถี่ 900 MHz และ 2 GHz ผ่านไปได้โดยใช้วงจรเรโซเนเตอร์ (Resonator) และวงจรแปลงแอตมิตแตนซ์ (Admittance Inverter) แต่มีขนาดที่ใหญ่

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่มีขนาดเล็ก เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านแถบสำหรับการใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย คือ ย่านความถี่ต่ำมีค่าเท่ากับ 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 2.3 – 2.7 GHz

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างวงจรกรองหยุดแถบขนาดเล็กบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับการใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย

1.2.2 เพื่อสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่ใช้งานได้ดีในย่านความถี่ที่ต้องการและมีขนาดที่เล็ก

1.2.3 เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างวงจรกรองหยุดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่รองรับการใช้งานย่านความถี่อื่นๆ ที่มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่มีขนาดเล็กที่รองรับการใช้งานย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อรองรับการใช้งานกับ UMTS ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Dtac, TrueMove และ AIS) และ ย่านความถี่สูงในช่วง 2.3 – 2.7 GHz เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz

1.3.2 สร้างวงจรกรองหยุดแถบที่ใช้งานได้ดีในย่านความถี่ที่ต้องการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปใช้งานได้จริงกับโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาที่มีย่านความถี่ใช้งานตรงกับที่นำเสนอ เช่น ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Dtac, TrueMove และ AIS), WiFi - 2.45 GHz และ WiMAX - 2.5 GHz

1.4.2 เป็นพื้นฐานในการออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่รองรับการใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย UMTS ที่ย่านความถี่ 2.1 GHz และ WiMAX ที่ย่านความถี่ 3.3 - 3.7 GHz และ 5.25 – 5.85 GHz นอกเหนือจากย่านความถี่ที่นำเสนอ

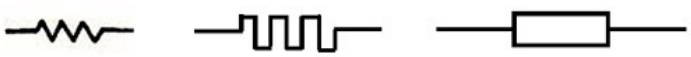
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่อง วงจรกรองหยุดแถบขนาดเล็กสำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้า เอกสาร ตำราและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งหัวข้อได้ดังนี้

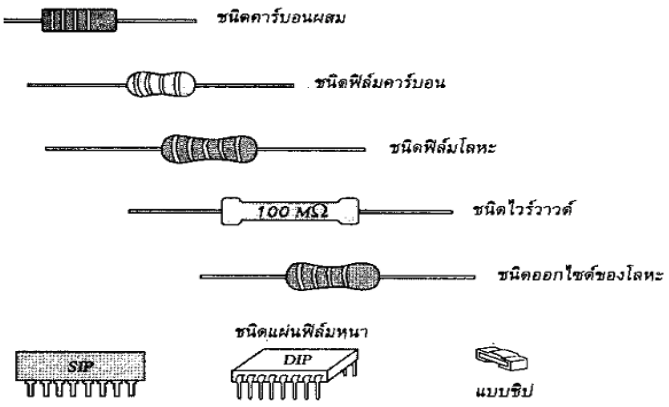
2.1 ตัวต้านทาน (Resistor)

ตัวต้านทานเป็นตัวที่ทำหน้าที่จำกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรตามที่ได้กำหนดเอาไว้ซึ่งจะมีสัญลักษณ์ที่ใช้เป็น (R) และค่าความต้านทานมีหน่วยวัดทางไฟฟ้าเป็น (Ω)



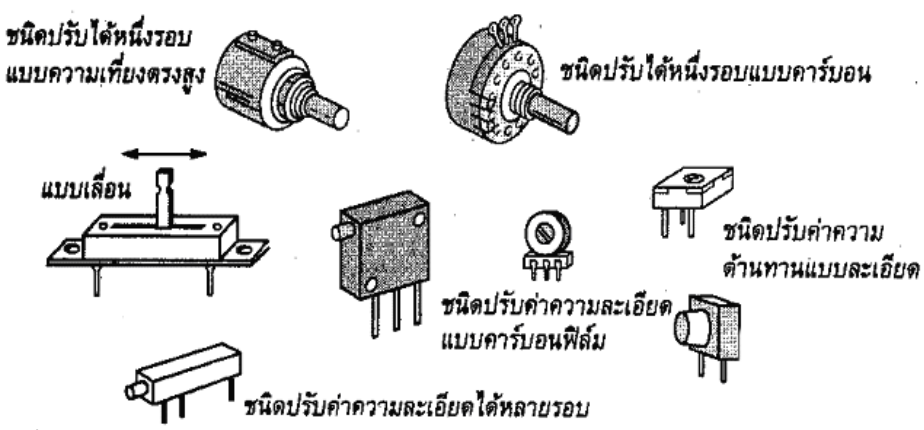
ภาพที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ของตัวต้านทาน

2.1.1 ชนิดของตัวต้านทาน ตัวต้านทานที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ (Fixed Value Resistor) และตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (Variable Value Resistor) ซึ่งตัวต้านทานค่าคงที่นี้จะมีค่าความต้านทานที่แน่นอน และเป็นค่าที่นิยมมากในงานด้านอิเล็กทรอ นิกส์



ภาพที่ 2.2 ชนิดของตัวต้านทานแบบคงที่

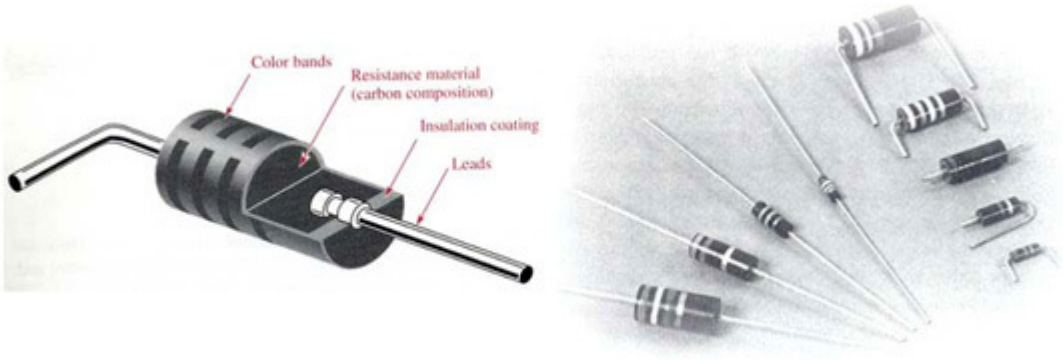
สำหรับตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้นั้น จะสามารถเลือกค่าความต้านทานที่ต้องการได้โดยการหมุนที่ปุ่มปรับค่าความต้านทาน



ภาพที่ 2.3 ชนิดของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

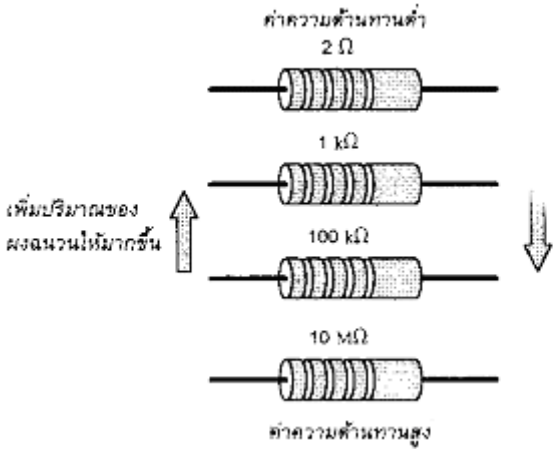
ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่แบ่งได้ดังนี้

1. ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition Resistor) ตัวต้านทานชนิดนี้จะนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งจะมีราคาถูก โครงสร้างภายในทำจากวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทาน โดยที่ปลายทั้งสองข้างจะต่อลวดตัวนำออกมาและบริเวณผิวด้านนอกจะฉาบด้วยฉนวน มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก



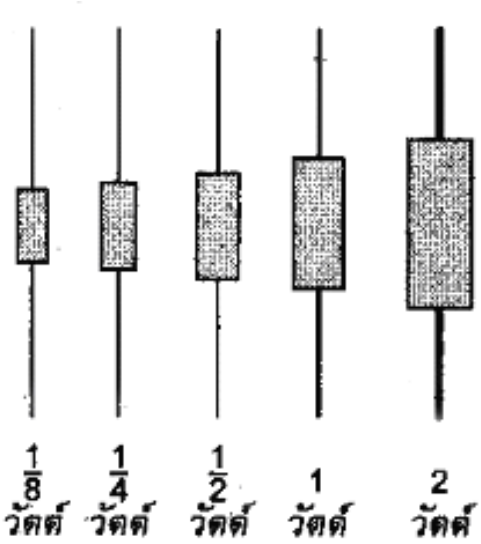
ภาพที่ 2.4 แสดงตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม

การที่เรียกตัวต้านทานชนิดนี้ว่าตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ทำตัวต้านทานนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างผงคาร์บอนและผงของฉนวน ซึ่งการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้จะให้ค่าความต้านทานที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่จำนวน 4 ตัว ซึ่งมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 2 โอห์ม จนถึง 10 เมกกะโอห์ม



ภาพที่ 2.5 ขนาดของความต้านทาน

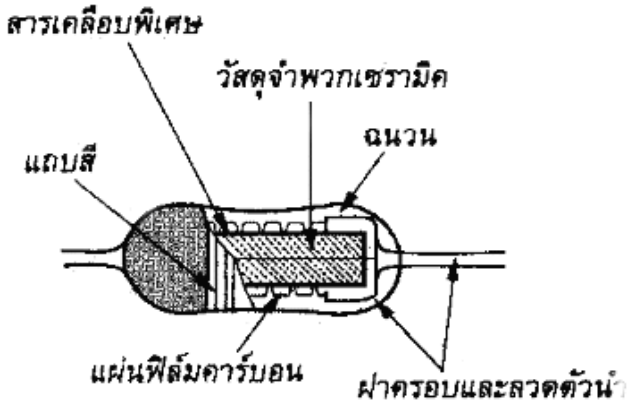
ขนาดของตัวต้านทานจะแสดงถึงกำลังงาน ซึ่งอยู่ในรูปของความร้อนที่สามารถแพร่กระจายออกมาได้ ความต้านทานทำหน้าที่จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอน ดังนั้นสภาวะของการต้านทานหรือขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยปริมาณความร้อนที่แพร่กระจายออกมาเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยเวลาจะมีหน่วยเป็น วัตต์ (Watts) และตัวต้านทานแต่ละตัวจะมีค่า อัตราทนกำลัง (Wattage Rating) เฉพาะที่แตกต่างกันออกไป โดยตัวต้านทานขนาดใหญ่จะสามารถที่จะแพร่กระจายความร้อนได้ดีกว่า เช่น ตัวต้านทานขนาดใหญ่มีอัตราการแพร่กระจายความร้อน 2 วัตต์ ในขณะที่ความต้านทานตัวเล็กสามารถกระจายความร้อนในอัตราแค่ 1/8 วัตต์



ภาพที่ 2.6 ขนาดและความคลาดเคลื่อนของความต้านทาน

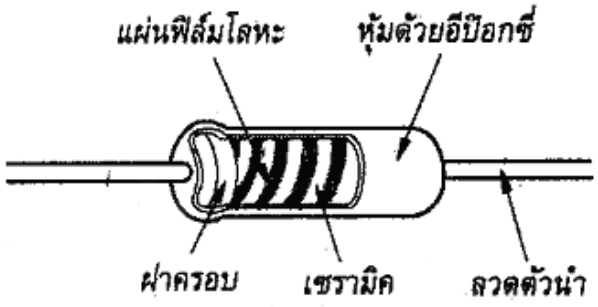
ค่าความเคลื่อน เป็นปัจจัยที่จะต้องพิจารณาอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณา ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นปริมาณความผิดพลาดของค่าความต้านทานที่แตกต่างกันออกไปจากค่าที่กำหนดไว้ เช่น ค่าความต้านทาน 1000 โอห์ม มีค่าความคลาดเคลื่อน 10 % ดังนั้นค่าความต้านทานที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 900 โอห์ม และ 1100 โอห์ม

2. ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน (Carbon Film Resistor) ตัวต้านทานชนิดนี้ถูกสร้างโดยการเคลือบแผ่นฟิล์มคาร์บอนที่มีคุณสมบัติของค่าความต้านทานลงบนแกนเซรามิค ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน หลังจากนั้นให้ทำการตัดแต่งฟิล์มคาร์บอนที่ได้ให้เป็นรูปวงแหวนรอบแกนเซรามิค โดยถ้ามีอัตราส่วนของเนื้อคาร์บอนมีปริมาณมากกว่าฉนวนจะทำให้ค่าความต้านทานที่ได้มีค่าต่ำ แต่ถ้าฉนวนมีอัตราส่วนมากกว่าเนื้อของคาร์บอน ความต้านทานที่ได้ก็จะมีค่าสูง ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนจะมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงได้ โดยไม่ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนั้นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้ตัวต้านทานชนิดนี้ก็มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม



ภาพที่ 2.7 ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน

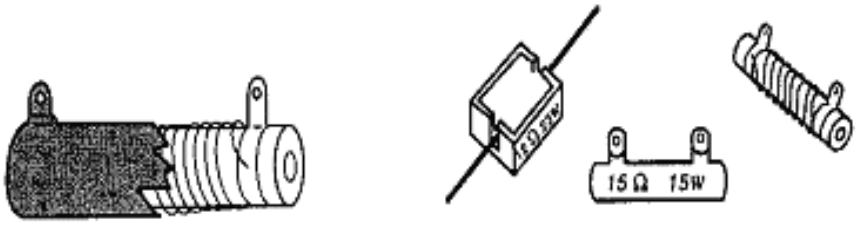
3. ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor) ต้านทานชนิดฟิล์มโลหะมีรูปร่างลักษณะการสร้างทำได้โดยการพ่นฟิล์มโลหะให้เป็นแผ่นบางๆลงบนเซรามิครูปทรงกระบอก จากนั้นจึงตัดแผ่นฟิล์มนี้โดยให้มีส่วนที่เป็นแผ่นฟิล์มคั่นอยู่กับฉนวนซึ่งเป็นเซรามิคตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกได้ดี นอกจากนี้ยังเกิดสัญญาณรบกวนได้น้อยเมื่อเทียบกับตัวต้านทานคาร์บอนชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 2.8 ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ

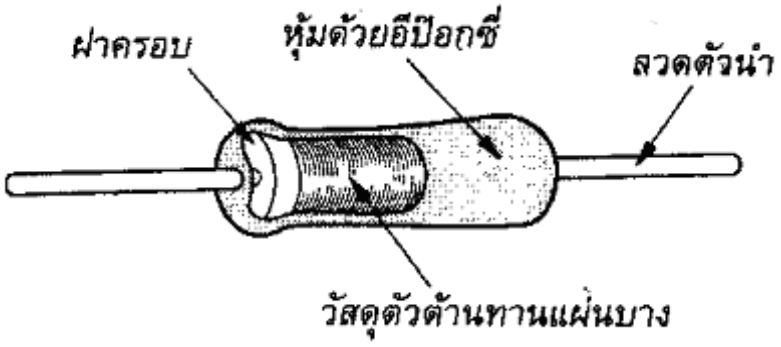
4. ตัวต้านทานชนิดไวร์วาว์ด (Wire wound Resistor) โครงสร้างภายในของตัวต้านทานชนิดนี้เกิดจากพันขดลวดรอบๆ แกนเซรามิค ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนจากนั้นจึงต่อเข้าด้วยลวดตัวนำจากส่วนหัวและท้านออกมาสำหรับค่าความต้าน ทานสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับความยาวและขนาดของขดลวดที่ใช้พัน

ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ ส่วนมากนิยมใช้ในงานที่ต้องการค่าความต้านทานต่ำๆ ทั้งนี้เพื่อให้กระแสไหลผ่านได้ดี ดังนั้นการออกแบบจึงควรให้มีขนาดใหญ่เพื่อช่วยให้สามารถกระจายความร้อนได้มากกว่า ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์นี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 % แต่ด้วยโครงสร้างที่ใหญ่และขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยากจึงทำให้ตัวต้านทานชนิดนี้มีราคาแพง



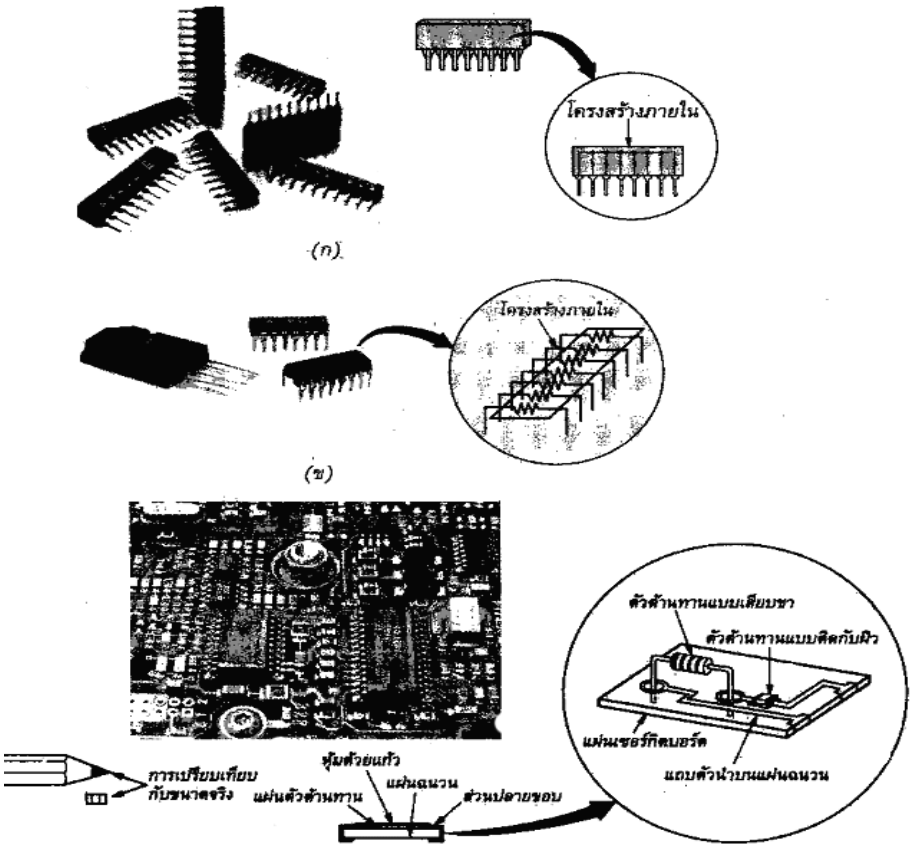
ภาพที่ 2.9 ตัวต้านทานชนิดไวร์วาวด์

5. ตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide Resistor) ตัวต้านทานชนิดนี้มีโครงสร้างตัวต้านทานที่เคลือบด้วยออกไซด์โลหะ ประเภทดีบุกลงบนวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน โดยอัตราส่วนของออกไซด์โลหะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำต่อฉนวน จะเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานให้กับตัวต้านทานชนิดนี้ คุณสมบัติพิเศษสำหรับตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ คือ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้



ภาพที่ 2.10 ตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ

6. ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา (Thick - Film Resistor) ตัวต้านทานแบบฟิล์มหนามีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ SIP (Single in - line Package) และ DIP (Dual in - Line Package) ตัวต้านทานแบบ SIP จะต่อลวดตัวนำออกจากความต้านทานภายในเพียงแถวเดียว ส่วนตัวต้านทานแบบ DIP จะมีลวดตัวนำ 2 แถว ต่อออกมาภายนอกซึ่งตัวต้านทานแบบฟิล์มหนาทั้งสองแบบจะได้รับการปรับแต่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2% โดยค่าความต้านทานที่ใช้ในงานทั่วไปของตัวต้านทานชนิดนี้อยู่ระหว่าง 22 โอห์ม ถึง 2.2 เมกะโอห์ม และมีอัตราทนกำลัง ประมาณ ½ วัตต์

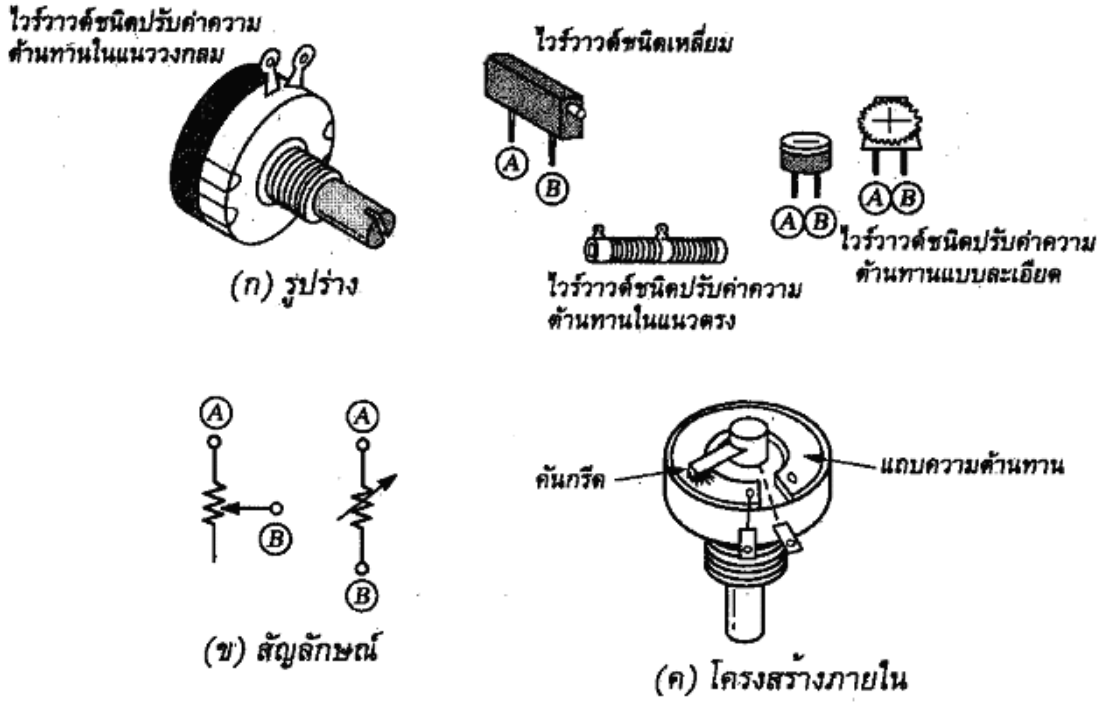


ภาพที่ 2.11 ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา

7. ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (Variable Value Resistor) การปรับปุ่มควบคุมระดับความดัง หรือ วอลลุม (Volume) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เป็นตัวอย่างของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ประเภทหนึ่ง ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้โดยอาศัยกลไก ตัวต้านทานชนิดนี้เปลี่ยนค่าได้โดยอาศัยกลไกมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่

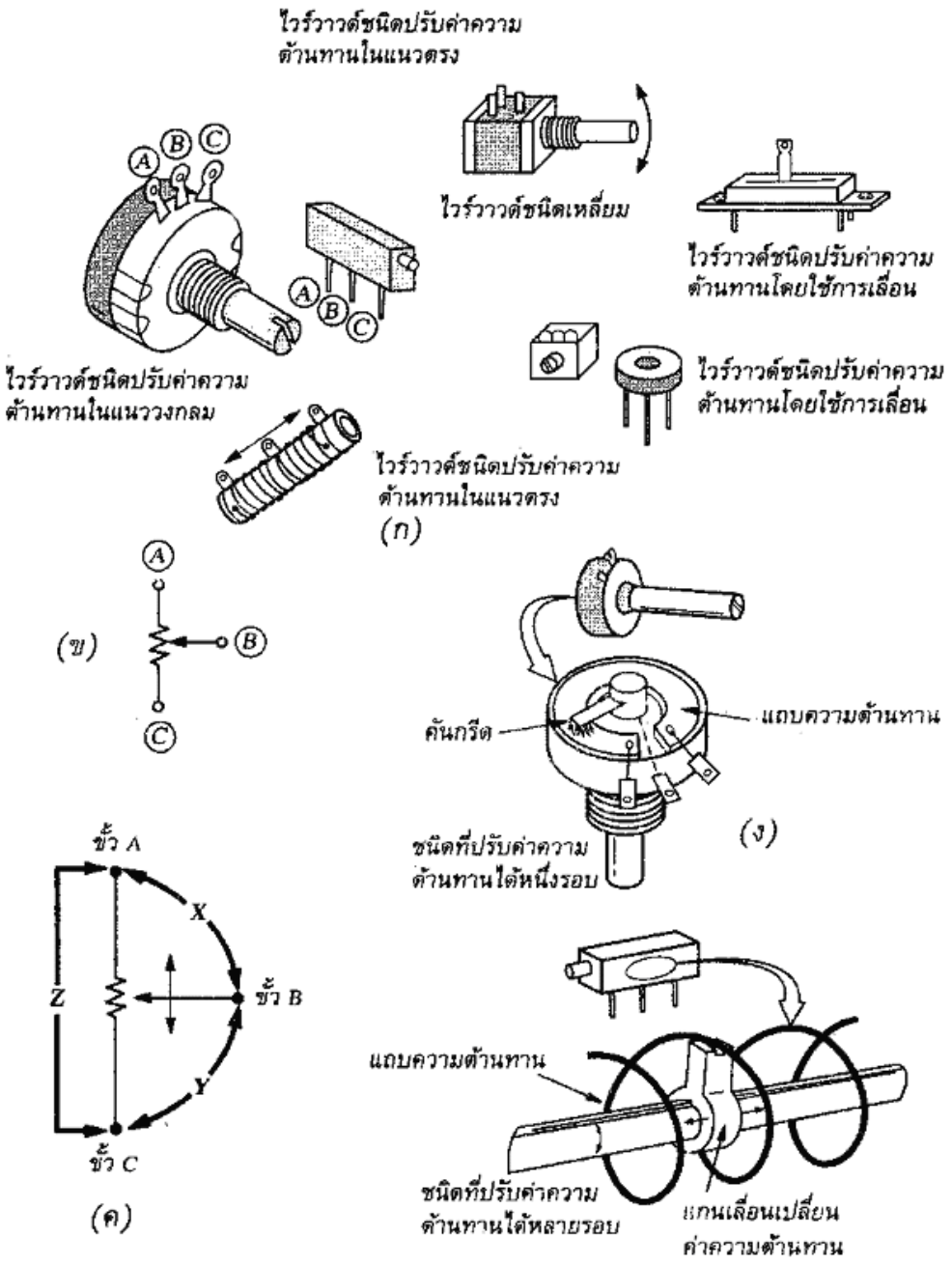
- รีโอสตัส (2 ขั้ว : A และ B) รูปลักษณะของรีโอสตัสแบบต่างๆ ดังรูป ก ส่วนสัญลักษณ์ของรีโอสตัส โครงสร้างภายในของรีโอสตัสแบบวงกลม ซึ่งจะเห็นว่าปลายอีกด้านหนึ่งของผิวสัมผัส เมื่อคันกรีดเคลื่อนที่ออกห่างไปจากบริเวณส่วนที่ขั้วต่ออยู่ จะทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแสดงตามรูป ง ซึ่งคันกรีดจะเคลื่อนที่ต่ำลงโดยการหมุนแกนตามเข็มนาฬิกา ด้วยเหตุนี้กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านได้น้อยเนื่องจากค่าความต้านทานที่มีค่ามาก ในทางกลับกันถ้าคันกรีดเคลื่อนที่เข้าใกล้ส่วนปลายที่มีขั้วต่ออยู่จะทำให้ค่าความต้านทานลดลง ซึ่งคันกรีดจะเคลื่อนที่ขึ้น

โดยการหมุนแกนทวนเข็มนาฬิกาและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีโอสตัสในกรณีนี้จะมีค่ามาก เนื่องจากค่าความต้านทานที่ลดลงนั่นเอง



ภาพที่ 2.12 ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้แบบรีโอสตัส

- เทนชิโอมิเตอร์ (3 ขั้ว : A,B และ C) รูปแสดงลักษณะภายนอกของโพเทนชิโอมิเตอร์แบบต่างๆ ซึ่งบางครั้งนิยมเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า พอต (Pot) ดังแสดง ความแตกต่างระหว่างโพเทนชิโอมิเตอร์และรีโอสตัส คือจำนวนขั้วต่อใช้งาน ซึ่งขั้วต่อของโพเทนชิโอมิเตอร์จะมี 3 ขั้ว โดยการนำไปใช้งานสามารถต่อค่าความต้านทานได้ 3 แบบ ได้แก่ ระหว่าง A และ B (X) ระหว่าง B และ C (Y) และระหว่าง C และ A (Z) ส่วนที่เพิ่มเข้ามาที่ทำให้โพเทนชิโอมิเตอร์แตกต่างไปจากรีโอสตัส คือ ขั้วที่ 3 ที่ต่อเข้ากับปลายอีกด้านหนึ่งของแถบค่าความต้านทาน



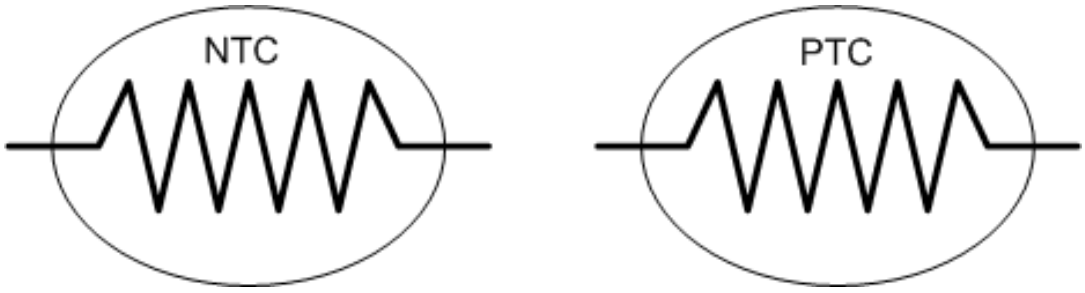
ภาพที่ 2.13 ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้แบบเทนชิโอมิเตอร์

8. ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าโดยใช้ความร้อน จากการที่ได้รู้จักกับตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้แบบรีโอสตัส และแบบโพเทนชิโอมิเตอร์ไปแล้ว ซึ่งทั้งสองแบบจะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโดยอาศัยกลไกเพื่อหมุนแกนที่เชื่อมกับคันกรีด เพื่อไปเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายใน แต่ยังมีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานได้โดยอาศัย

หลักการให้พลังงานความร้อนแทนซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้มีชื่อว่า เทอมิสเตอร์ (Thermister) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

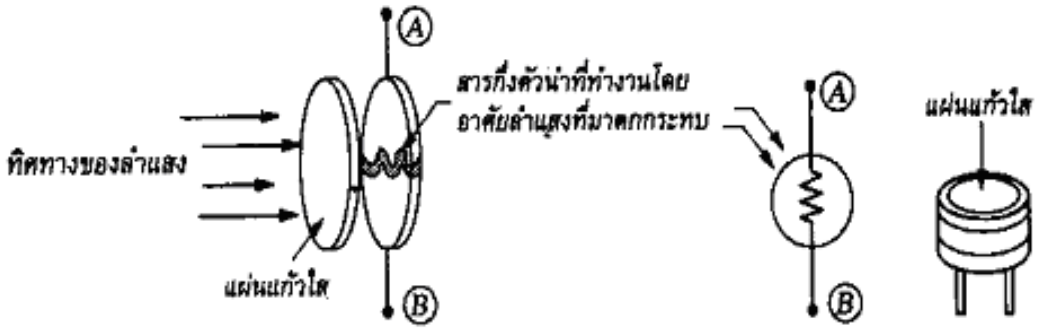
- Positive temperrature control thremister (PCT) ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานเทอมิสเตอร์ จะเพิ่มขึ้นตามด้วย ถ้าอุณหภูมิต่ำค่าความต้านทานเทอมิสเตอร์ จะลดตามด้วย

- Negative temperrature control thremister (PCT) ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานเทอมิสเตอร์ จะลดลง ถ้าอุณหภูมิต่ำค่าความต้านทานเทอมิสเตอร์จะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.14 สัญญลักษณ์ของเทอมิตเตอร์

9. ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้โดยใช้แสงอุปกรณ์โฟโตริซิสเตอร์ (Photoresistor) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Light - Dependent Resistor (LDR) ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่ทำงานโดยอาศัยแสงที่มาตกกระทบ นั่นคือ วัสดุที่ใช้ทำโฟโตริซิสเตอร์ เมื่อถูกแสงจะมีค่าความนำมากขึ้น หรือทำให้ค่าความต้านทานลดลงนั่นเอง โฟโตริซิสเตอร์สร้างจากวัสดุนำแสงที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซึ่งค่าความต้านทานของวัสดุนี้ลดลงเมื่อมีแสงมาตกกระทบ โดยพลังงานแสงจะถูกดูดซึมจากอะตอมที่มีอยู่มากมายในวัสดุนำแสงนี้และทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุด (Valence Electron) ออกมาด้วยเหตุผลของจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านโฟโตริซิสเตอร์ได้มาก ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานมีค่าลดลงด้วย การนำอุปกรณ์โฟโตริซิสเตอร์ไปใช้งาน เช่น การนำไปใช้ในอุปกรณ์ปิดเปิด ไฟส่องสว่างภายนอกอาคาร โดยใช้เวลาช่วงกลางวัน แสงสว่างจากดวงอาทิตย์จะทำให้ค่าความต้านทานของโฟโตริซิสเตอร์ไปลดลง และค่าความต้านทานที่ลดลงนี้จะถูกนำไปใช้ในการปิดไฟส่องสว่าง ส่วนในช่วงเวลากลางคืนค่าความต้านทานของโฟโตริซิสเตอร์จะเพิ่มขึ้น ไฟส่องสว่างจะเปิดอีกครั้ง



ภาพที่ 2.15 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้โดยใช้แสง

2.2.3 การอ่านค่าความต้านทาน ค่าความต้านทานโดยส่วนใหญ่จะใช้รหัสแถบสีหรืออาจจะพิมพ์ค่าติดไว้บนตัวต้านทาน ถ้าเป็นการพิมพ์ค่าติดไว้บนตัวต้านทานมักจะเป็นตัวต้านทานที่มีอัตราทนกำลังวัตต์สูง ส่วนตัวต้านทานที่มีอัตราทนกำลังวัตต์ต่ำมักจะใช้รหัสแถบสี ที่นิยมใช้มี 4 แถบสีและ 5 แถบสี

รหัสสี (Color Code)	แถบสีที่ 1 ตำแหน่ง 1	แถบสีที่ 2 ตำแหน่ง 2	แถบสีที่ 3 ตัวคูณ	แถบสีที่ 4 เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด
ดำ	0	0	1	20%(M)
น้ำตาล	1	1	10	1%(F)
แดง	2	2	100	2%(G)
ส้ม	3	3	1,000	-
เหลือง	4	4	10,000	-
เขียว	5	5	100,000	0.5%(D)
น้ำเงิน	6	6	1,000,000	0.25%(C)
ม่วง	7	7	-	0.1%(B)
เทา	8	8	-	0.05%(A)
ขาว	9	9	-	-
ทอง	-	-	0.1	5%(J)
เงิน	-	-	0.01	10%(K)

ภาพที่ 2.16 การอ่านค่าความต้านทาน

2.2.4 การต่อตัวต้านทาน การต่อตัวต้านทานในวงจร สามารถทำได้ 2 แบบ ได้แก่ คือ การต่อแบบอันดับหรือ (แบบอนุกรม) และการต่อขนาน

1. การต่อตัวต้านทานแบบอันดับ (แบบอนุกรม) ค่าความต้านทานรวมที่เกิดจากนำตัวต้านทานมาต่อกันแบบอันดับจะมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าความต้านทานของตัวต้านทานทุกตัวรวมกัน

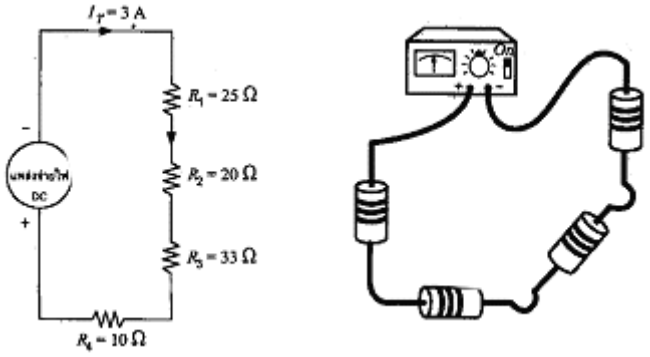
สูตรที่ใช้ในการคำนวนหาค่าความต้านทานที่ต่อกันแบบอันดับ

$$RT = R1 + R2 + R3 + \ldots\ldots\ldots\ldots$$

โดยที่ RT = ค่าความต้านทานรวม
R1 = ค่าความต้านทานตัวที่ 1
R2 = ค่าความต้านทานตัวที่ 2
R3 = ค่าความต้านทานตัวที่ 3

ภาพที่ 2.17 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

ตัวอย่าง
จากวงจรในรูป จงคำนวนหาค่าความต้านทานรวม



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างการต่อตัวต้านทาน

2. การต่อตัวต้านทานแบบขนาน ค่าความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นจากการนำตัวต้านทานมาต่อกันแบบขนานจะมีค่าเท่ากับ ผลรวมของส่วนกลับของค่าความต้านทานทุกตัวรวมกัน
สูตรที่ใช้ในการคำนวนหาค่าความต้านทานที่ต่อกันแบบขนาน

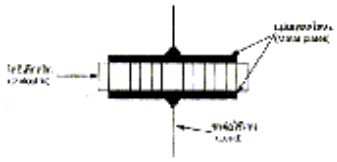
$$RT = \frac{1}{(1/R1)+(1/R2)+(1/R3)+.....}$$

โดยที่ RT = ค่าความต้านทานรวม
R1 = ค่าความต้านทานตัวที่ 1
R2 = ค่าความต้านทานตัวที่ 2
R3 = ค่าความต้านทานตัวที่ 3

ภาพที่ 2.19 การต่อตัวต้านทานแบบขนาน

2.2 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่รู้จักทั่วไปว่าสามารถเก็บประจุได้ บางทีเรียกว่า คาปาซิเตอร์ ใช้สัญลักษณ์ย่อว่า C มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)



ภาพที่ 2.20 ตัวเก็บประจุ

2.2.1 ชนิดของตัวเก็บประจุ

1. ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุได้ แบ่งได้ 5 ชนิดตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษชุบไข หรือน้ำมัน (Oil) เป็นฉนวนไดอิเล็กตริก โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นเพลต 2 แผ่น ที่เป็นแผ่นดีบุกรีดจนบางคั่นกลางด้วยกระดาษชุบไขแล้วนำมาม้วนเข้าเป็นท่อนกลม จากแผ่นเพลตทั้งสอง แต่ละข้างจะถูกต่อขาที่เป็นลวดตัวนำออกมาใช้งาน ตัวเก็บประจุจะถูกหุ้มห่อด้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดต่างๆ

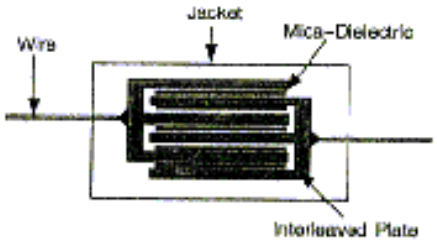
แล้วแต่บริษัทผู้ผลิต อย่างเช่น ปลอกกระดาษแข็ง กระเบื้องเคลือบ กระดาษอาบน้ำผึ้ง เป็นต้น เพื่อป้องกันความชื้นและฝุ่นละออง

ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ

ภาพที่ 2.22 สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษจะมีค่าความจะไม่สูงมากนัก ซึ่งจะเขียนบอกไว้ที่ข้างๆ ตัวเก็บประจุ คืออยู่ในพิสัยจาก 10 pF ถึง 10mF อัตราทนไฟสูงประมาณ 150 โวลต์ จนถึงหลายพันโวลต์ โดยมากนิยมใช้ในวงจรจ่ายกำลังไฟสูง

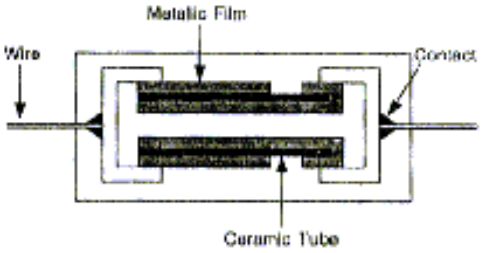
ตัวเก็บประจุชนิดไมก้า เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้แผ่นไมก้าเป็นฉนวนไดอิเล็กตริก ส่วนมากตัวเก็บประจุชนิดนี้จะถูกทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมเพราะแผ่นไมก้าจะมีคุณสมบัติที่แข็งกรอบ โครงสร้างของมันจะประกอบด้วยแผ่นเพลตโลหะบางๆ อาจใช้หลายๆ แผ่นวางสลับซ้อนกัน แต่จะต้องคั่นด้วยฉนวนไมก้า ดังแสดงในรูป ซึ่งตัวเก็บประจุจะถูกหุ้มห่อด้วยฉนวนจำนวนเมกาไลท์เพื่อป้องกันการชำรุดสึกหรอ



ภาพที่ 2.23 ตัวเก็บประจุไมก้าที่ห่อหุ้มด้วยฉนวนเมกาไลท์

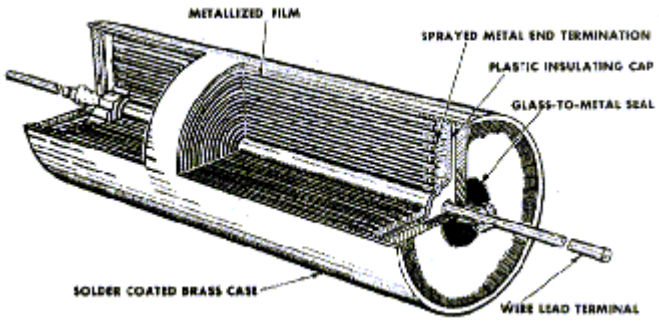
ตัวเก็บประจุชนิดไมก้าจะมีค่าความจุอยู่ในพิสัยจาก 1.5 pF ถึง 0.1 mF มีอัตราทนแรงไฟได้สูงมากประมาณ 350 โวลต์ จนถึงหลายพันโวลต์ โดยบริษัทผู้ผลิตจะพิมพ์บอกค่าความจุ อัตราทนแรงไฟและค่าความคลาดเคลื่อนไว้บนตัวของมัน หรือบางทีก็ใช้สีแต้มบอกเป็นโค้ดที่ตัวเก็บประจุนี้ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป ส่วนการใช้งานของตัวเก็บประจุชนิดไมก้า นิยมใช้งานในวงจรความถี่วิทยุ (RF) และวงจรที่มีแรงดันไฟสูงมากๆ ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิค เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้

ไดอิเล็กตริกที่ทำมาจากฉนวนจำพวกกระเบื้อง หรือที่เรียกว่า "เซรามิค" ซึ่งมีโครงสร้างของตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 2.24 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก

ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิคจะมีรูปร่างแบบแผ่นกลม (Disc) และแบบรูปทรงกระบอก (Tubular) ซึ่งจะมีค่าความจุอยู่ในพิสัยจาก 1.5 pF ถึง 0.1 mF อัตราทนแรงไฟประมาณ 500 โวลต์ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติกแต่จะใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ไมลาร์ (Mylar) โพลีสไตรีน (Polystyrene) และอื่นๆ โดยนำมาคั่นระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองแผ่นแล้วม้วนพับให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก



ภาพที่ 2.25 ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติก

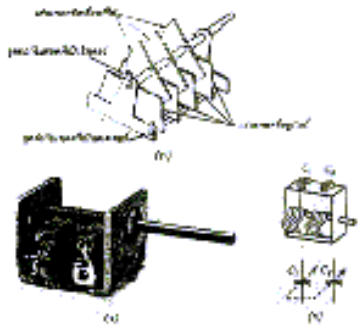
ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติกจะมีค่าความจุอยู่ในพิสัยตั้งแต่ 2 mF ขึ้นไปและอัตราทนกำลังไฟตั้งแต่ 200 ถึง 600 โวลต์

ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้น้ำยาอิเล็กโทรไลท์เป็นแผ่นข้างหนึ่งแทนโลหะ และอีกแผ่นหนึ่งเป็นแผ่นโลหะมีเยื่อบางๆ ที่เรียกว่า "ฟิล์ม" (Film) หุ้มอยู่ เยื่อบางๆ นี้คือ ไดอิเล็กตริก หรือแผ่นกั้น

ภาพที่ 2.26 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก

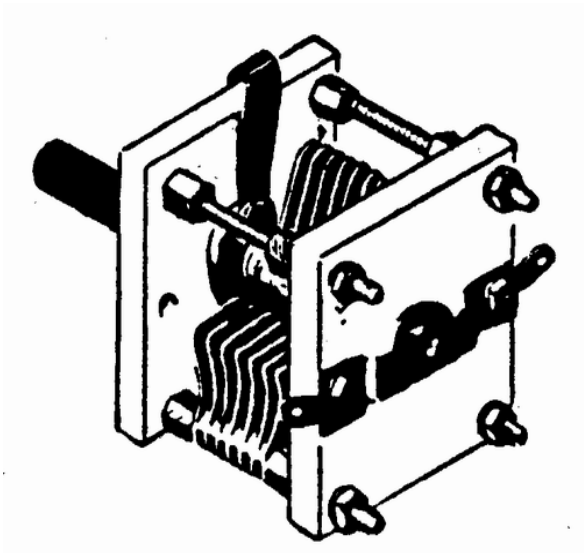
ลักษณะรูปร่างของตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก ซึ่งส่วนมากจะบรรจุในกระป๋องอะลูมิเนียมทรงกลมยาว และจะมีขั้วบอกไว้อย่างชัดเจน ว่าขั้วใดเป็นขั้วบวกและขั้วลบ สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก การต่อขั้วของตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกในการใช้งานจะต้องมีความระมัดระวังให้มากที่สุด ถ้าหากว่าต่อขั้วผิดจะมีผลทำให้กระแสไฟเข้าไปทำลายเยื่อที่เป็นไดอิเล็กตริกชำรุดเสียหายได้ ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกจะสามารถทำให้มีค่าความจุได้สูงนับเป็นร้อยๆ ไมโครฟารัด โดยที่ตัวเก็บประจุจะมีขนาดเล็ก ค่าความจุที่ใช้งานจะอยู่ในพิสัยสองสามไมโครฟารัดจนถึงมากกว่า 100 mF และอัตราทนกำลังไฟตั้งแต่ 5 โวลต์จนถึง 700 โวลต์ ซึ่งนิยมนำไปใช้ในวงจร ดี.ซี.

ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกจะมีข้อเสียอันเนื่องมาจากค่าสูญเสียจากสารไดอิเล็กตริกที่มีค่ามาก แต่จะมีตัวเก็บประจุอีกชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการเดียวกับตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก คือตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม (Tantalum Electrolytic Capacitor)



ภาพที่ 2.27 ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้

2. ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้ เป็นตัวเก็บประจุซึ่งการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ตัวเก็บประจุชนิดนี้ปกติแล้วจะประกอบด้วยอุปกรณ์ภายใน 2 ส่วน ได้แก่ แผ่นเพลตที่เคลื่อนที่ได้และแผ่นเพลตที่ติดตั้งอยู่กับที่โดยแผ่นเพลตทั้งสองจะเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับวงจรภายนอก การแบ่งประเภทของตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้นี้ จะแบ่งตามไดอิเล็กตริกที่ใช้ โดยแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ อากาศ ไมก้า เซรามิค และพลาสติก



ภาพที่ 2.28 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

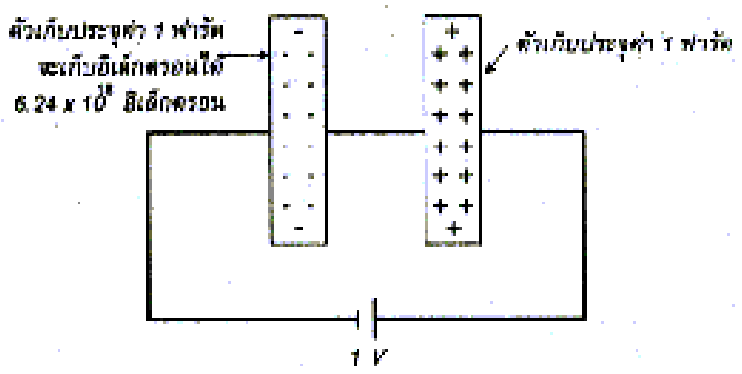
ภาพที่ 2.29 สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

Variable Capacitor เป็น Capacitor ที่เปลี่ยนค่าความจุได้ แบบนี้จะพบเห็นอยู่บ่อย ๆ ในเครื่องรับวิทยุต่าง ๆ ซึ่งเป็นตัวเลือกหาสถานีวิทยุโดยมีแกนหมุน

2.2.2 หน่วยของการเก็บประจุ

ค่าการเก็บประจุ แสดงถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ โดยมีหน่วยเป็น ฟารัด (Farad, F) ตัวเก็บประจุที่มีค่าการเก็บประจุ 1 ฟารัด (F) หมายถึง ความสามารถที่

จะเก็บประจุไฟฟ้าจำนวน 1 คูลอมป์ (6.24 ด 1018 อิเล็กตรอน) โดยให้แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ ระหว่างแผ่นเพลตทั้งสอง



ภาพที่ 2.30 การเก็บประจุไฟฟ้า

ค่าการเก็บประจุ 1 ฟารัด (F) เป็นค่าที่มีปริมาณมาก และไม่ค่อยพบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป แต่ที่ใช้กันมากจะมีค่าระหว่าง

$$(\mu F = \frac{1}{1{,}000{,}000} = \frac{1}{10^{6}}) \qquad (pF = \frac{1}{10^{12}})$$

ไมโครฟารัด และพิโกฟารัด จากความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า จึงเขียนเป็นสูตรความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{ค่าการเก็บประจุ } (C) = \frac{Q}{V}$$

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

Q = ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น คูลอมป์ (C)

V = แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

ตัวอย่าง

ถ้าตัวเก็บประจุตัวหนึ่งสามารถประจุไฟฟ้าได้ 36 C (36 x6.24 x10กำลัง18= 2.25 x10กำลัง20 อิเล็กตรอน) เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 V คร่อมระหว่างแผ่นเพลต จงคำนวณหาค่าการเก็บประจุ

วิธีทำ

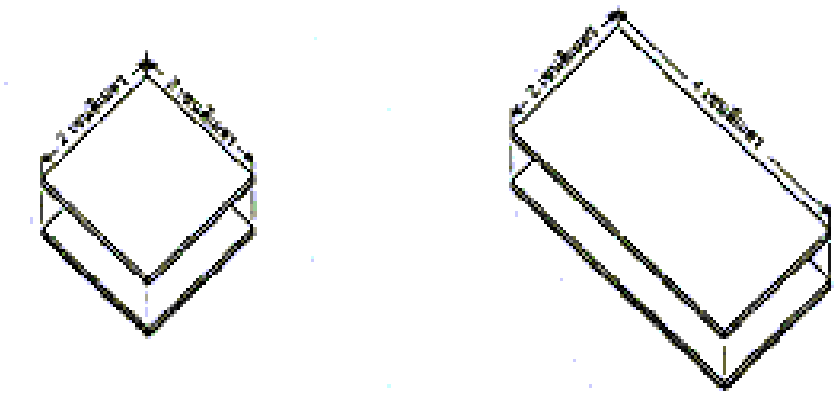
$$C = \frac{Q}{V}$$

$$= \frac{36\,C}{12\,V}$$

คำตอบ $= 3\,F$

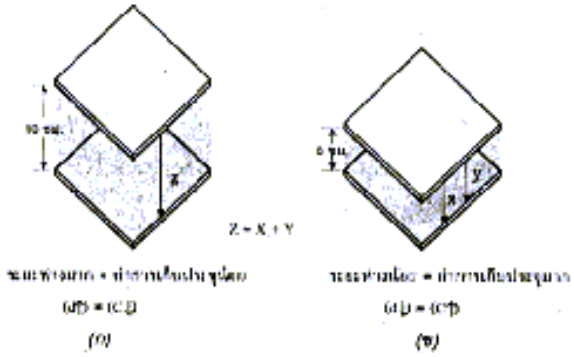
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเก็บประจุ ค่าการเก็บประจุจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ ดังนี้

1. พื้นที่ของแผ่นเพลต (A) ค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของแผ่นเพลต โดยพื้นที่สามารถคำนวณได้จากการนำเอาความกว้างคูณเข้ากับความยาวของแผ่นเพลต ดังแสดงในรูป จากตัวอย่างจะเห็นว่า แผ่นเพลตในรูป มีพื้นที่เป็นสองเท่าของแผ่นเพลตในรูปและด้วยค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ (C ต A) ดังนั้น แผ่นเพลตในรูปจึงมีค่าการเก็บประจุเป็นสองเท่าของแผ่นเพลตในรูป



ภาพที่ 2.30 พื้นที่ของแผ่นเพลต

2. ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต (d) ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตจะขึ้นอยู่กับความหนาของไดอิเล็กตริกที่ใช้ ดังนั้น ค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต ดังแสดงในรูป นั่นคือ ถ้าระยะห่างเพิ่มขึ้น (d) จะทำให้ค่าการเก็บประจุลดลง (C) จากรูประยะห่างระหว่างแผ่นเพลตทำให้ค่าการเก็บประจุน้อย ในขณะที่รูปความหนาของไดอิเล็กตริกเป็นครึ่งหนึ่งของตัวเก็บประจุในรูปดังนั้น ถ้าต้องการเพิ่มหรือลดระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตนี้เป็นการทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลตเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจให้เส้นแรงแม่เหล็ก Z ที่ปรากฏในรูปจะถูกแบ่งออกเป็นเส้นแรงแม่เหล็ก X และ Y ที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต ลดลงครึ่งหนึ่ง



ภาพที่ 2.31 ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต

3. ชนิดของไดอิเล็กตริก (K) สารไดอิเล็กตริกมีคุณสมบัติเป็นฉนวน และมีผลต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลต ดังนั้น ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกจึงมีผลต่อค่าการเก็บประจุ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectic Constant, K) เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลต สุญญากาศเป็นไดอิเล็กตริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น นั่นคือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1 สำหรับไดอิเล็กตริก ชนิดอื่นนั้นจะใช้สุญญากาศเป็นตัวอ้างอิงในการแสดงค่า ตัวอย่างเช่น ไมก้า มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 50 หมายความว่า ไมก้าสามารถทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก สามารถก่อตัวได้ง่ายกว่าสุญญากาศถึง 5 เท่า และด้วยค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (C α K) ดังนั้น ตัวเก็บประจุแบบไมก้าจึงมีค่าการเก็บประจุมากกว่าตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นไดอิเล็กตริกถึง 5 เท่า ส่วนไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดอื่นๆ แสดงในตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตรอน

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตรอน (K)
สุญญากาศ	1.0
อากาศ	1.0006
เทฟลอน	2.0
ขี้ผึ้ง	2.25
กระดาษ	2.5
อำพัน	2.65
ยาง	3.0
น้ำมัน	4.0
ไมก้า	5.0
เซรามิก	6.0
แบค	7.0
คาไลต์	7.5
แก้ว	78.0
น้ำ	

2.2.4 สูตรการคำนวณหาค่าการเก็บประจุ

ด้วยปัจจัยที่กำหนดค่าการเก็บประจุ ได้แก่ พื้นที่ของแผ่นเพลต ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต และชนิดของไดอิเล็กตริก ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$C = \frac{(8.85 \times 10^{-12}) \times K \times A}{d}$$

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

8.85 x10 กำลัง -12 = ค่าความเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) มีหน่วยเป็น ฟารัด/เมตร (F/m)

K = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

A = พื้นที่ของแผ่นเพลต มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m2)

d = ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต มีหน่วยเป็น เมตร (m)
จากสมการจะเห็นว่า ค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (K) และพื้นที่ของแผ่นเพลต (A) และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะห่างระหว่างเผ่นเพลต (d)

ตัวอย่าง

จงหาค่าการเก็บประจุของตัวเก็บประจุแบบเซรามิกที่มีพื้นที่ของแผ่นเพลตเท่ากับ 0.3 m2 และมีระยะระหว่างแผ่นเพลต 0.0003 m

วิธีทำ

$$C = \frac{(8.85\times10^{-12})\times K\times A}{d}$$

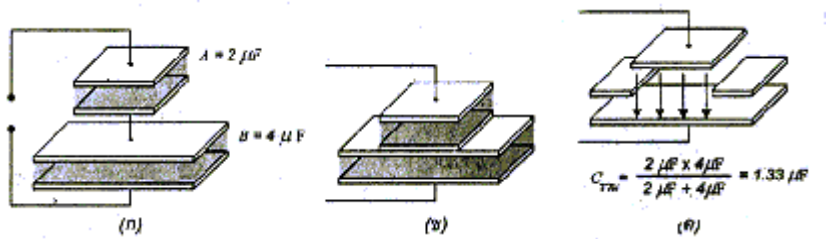
$$= \frac{(8.85\times10^{-12}\ F/m)\times 6\times 0.3m^{2}}{0.0003m}$$

$$= 5.31\times10^{-8}$$

คำตอบ $= 0.0531\ \mu F = 53.1\ pF$

2.2.5 การต่อตัวเก็บประจุ

การต่อตัวเก็บประจุแบบอันดับหรืออนุกรมการต่อตัวเก็บประจุค่า 2 mF และ 4 mF แบบอันดับ โดยต่อด้านล่างแผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ A เข้ากับด้านบนแผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ B ดังแสดงในรูป



ภาพที่ 2.32 แสดงการต่อตัวเก็บประจุ

จากการที่ด้านบนแผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ A และด้านล่างแผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ B ถูกต่อเข้ากับวงจรจึงทำให้แผ่นเพลตที่อยู่บริเวณตรงกลางทั้งสองแผ่นไม่มีผลใดๆ แต่สิ่งที่ได้จากการต่อแบบอันดับนี้ คือ ความหนาของไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น และทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต

เพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่มีแผ่นเพลตรองรับในทิศทางตรงกันข้ามเท่านั้น ซึ่งในที่นี้จะขึ้นอยู่กับแผ่นเพลตที่มีพื้นที่น้อย นั่นคือ แผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ

สรุปได้ว่า เมื่อทำการต่อตัวเก็บประจุแบบอันดับจะทำให้พื้นที่รวมของแผ่นเพลตลดลง และความหนาของไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการเก็บประจุรวมลดลง การคำนวณหาค่าการเก็บประจุรวมของตัวเก็บประจุที่ต่อกันแบบอันดับ หาได้จากสูตร ดังนี้

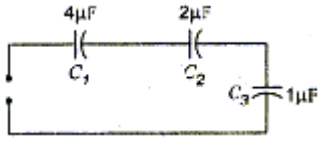
$$C_T = \frac{1}{(1/C_1)+(1/C_2)+(1/C_3)+\ldots}$$

สำหรับตัวเก็บประจุ 2 ตัว จะใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

ตัวอย่าง

จงคำนวณหาค่าการเก็บประจุรวม ของวงจรในรูป



ตัวอย่างการต่อตัวเก็บประจุแบบอันดับ

วิธีทำ

$$C_T = \frac{1}{(1/C_1)+(1/C_2)+(1/C_3)}$$

$$= \frac{1}{(1/4\mu F)+(1/2\mu F)+(1/1\mu F)}$$

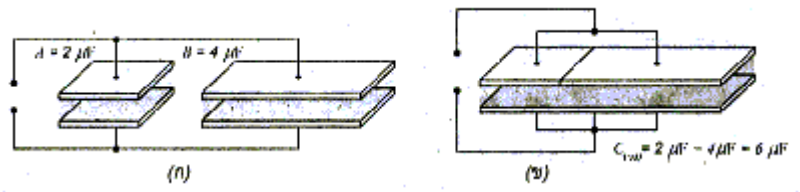
$$= \frac{1}{1.75\times10^{6}} = 5.7143 \times 10^{-7}$$

คำตอบ $= 0.5714\ \mu F$

การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

แสดงการต่อตัวเก็บประจุ 2 ตัว A และ B ค่า 2 mF และ 4 mF แบบ แสดงการต่อตัวเก็บประจุ A และ B ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเท่ากันเข้าด้วยกันแบบขนานจะเห็นว่า ทั้งด้านบนและด้านล่างแผ่นเพลตของตัวเก็บประจุทั้งสองถูกต่อเข้าด้วยกัน จึงเสมือนว่าแผ่นเพลตทั้งสองเป็นแผ่นเดียวกัน สรุปได้ว่า ถ้าต่อตัวเก็บประจุแบบขนานจะทำให้พื้นที่ของแผ่นเพลตเพิ่มขึ้น และเนื่องด้วยค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของแผ่นเพลต ดังนั้น จึงส่งผลให้ค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้นด้วย

$$C\uparrow = \frac{(8.85\times10^{-12})\times K\times A\uparrow}{d}$$

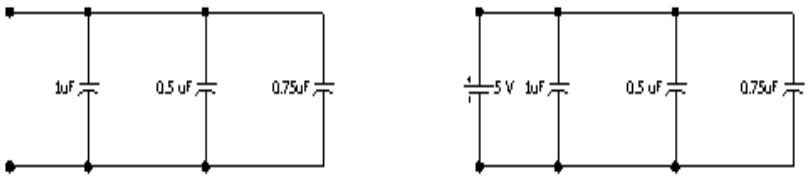


ค่าการเก็บประจุรวม คำนวณจากการรวมพื้นที่ของแผ่นเพลตทุกแผ่นรวมกัน ดังนั้นค่าการเก็บประจุรวมของตัวเก็บประจุที่ต่อกันแบบขนานจึงเท่ากับผลรวมของค่าการเก็บประจุของตัวเก็บประจุทุกตัว

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

ตัวอย่าง

จงหาค่าการเก็บประจุรวมของวงจรในรูป (ก) และ (ข)



ก ข

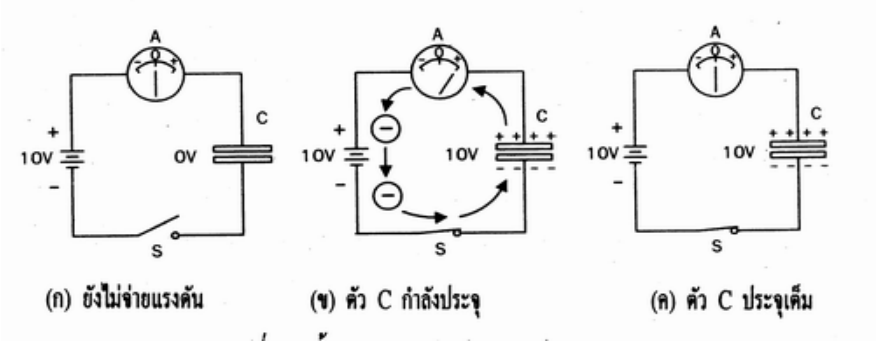
ภาพการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

วิธีทำ $C_T = C_1 + C_2 + C_3$

$= 1\,\mu F + 0.5\,\mu F + 0.75\,\mu F$

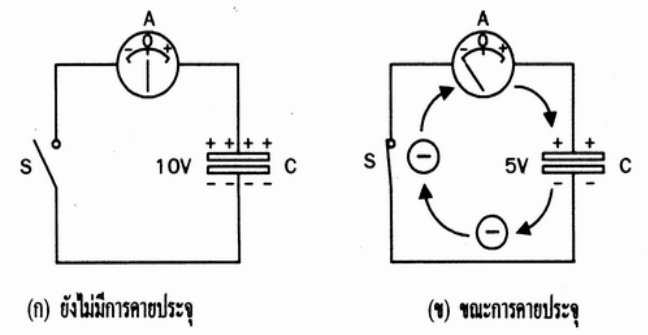
คำตอบ $= 2.25\,\mu F$

2.2.6 **การทำงานของตัวเก็บประจุ** ตัวเก็บประจุมีสภาวะการทำงานอยู่ 2 สภาวะคือ ประจุ (Charge) และ คายประจุ (Discharge) การประจุ การเก็บประจุก็คือ การเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลตของตัวเก็บประจุนั่นเอง ซึ่งอธิบายโดยละเอียดดังในรูป ก. เมื่อนำแบตเตอรี่อื่นๆ ต่อกับตัวเก็บประจุ อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเข้าไปออกันที่แผ่นเพลต ทำให้เกิดประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไป ผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลตตรงข้าม (เหมือนกับนำแผ่นแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันมาใกล้กันมันก็จะผลักกัน) ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตจะมี ประจุเป็น + และ - ปะปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตนี้ถูก ผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร แผ่นเพลตนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น (เมื่อเทียบกับอีกด้าน)



ภาพที่ 2.33 ขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

การคายประจุ ตัวเก็บประจุที่ถูกประจุแล้วยังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกันอิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลต แต่ถ้ามีการครบวงจร ระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองเมื่อไร อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบ ไปครบวงจรที่แผ่นเพลตบวกทันที เรียกเหตุการณ์นี้ว่า "การคายประจุ"



ภาพที่ 2.34 ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

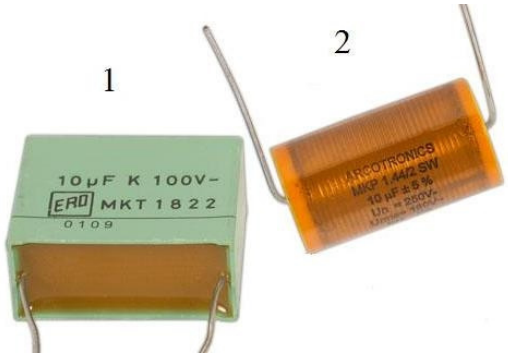
2.2.7 การอ่านค่าความจุของคาปาซิเตอร์ ตัวเก็บประจุจะบอกลักษณะอยู่ทั้งหมด 3 แบบ คือ

1. การอ่านค่าโดยตรง

คาปาซิเตอร์ประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีความจุสูง และบอกอัตราทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมาด้วย

ภาพที่ 2.35 คาปาซิเตอร์ 3

จากรูปสามารถอ่านได้ 1500 ไมโครฟารัด ทนแรงดันสูงสุดที่ 35 โวลท์



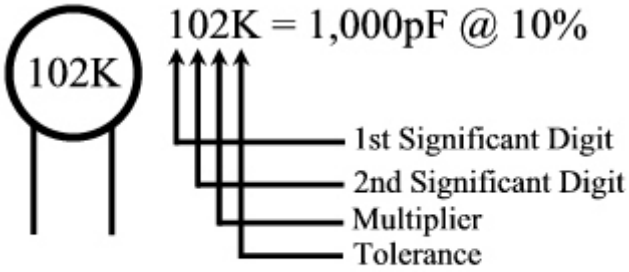
ภาพที่ 2.36 คาปาซิเตอร์

ตัวที่ 1 สามารถอ่านได้ 10 ไมโครฟารัด ทนแรงดันสูงสุดที่ 100 โวลท์
ตัวที่ 2 สามารถอ่านได้ 10 ไมโครฟารัด ทนแรงดันสูงสุดที่ 250 โวลท์

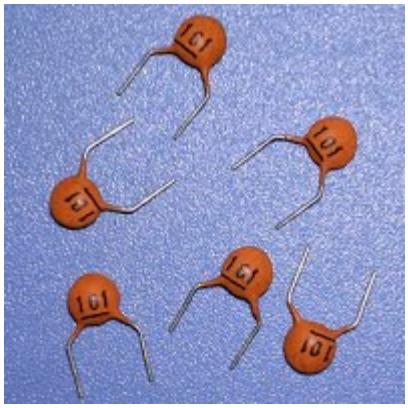
2. การอ่านแบบตัวเลข

คาปาซิเตอร์ชนิดนี้จะบอกเป็นตัวเลขมา 3 ตำแหน่งด้วยกัน โดยที่ ตัวที่หนึ่งจะเป็นตัวตั้งหลักที่หนึ่ง ตัวที่สองจะเป็นตัวตั้งหลักที่สอง และตัวเลขตัวที่สามจะเป็นตัวเติมเลขศูนย์ลงไป(หรือตัวคูณก็ได้) หน่วยที่ได้จะเป็นพิโกฟารัด เสมอ ส่วนค่าผิดพลาดถูกบอกในรูปของอักษรแทนเช่น ตัว K มีค่าผิดพลาดเท่ากับ + – 10%

ยกตัวอย่าง



ภาพที่ 2.37 การอ่านค่าคาปาซิเตอร์



ภาพที่ 2.38 f

1 0 และเติมศูนย์อีกสองตัว จะได้ 1000 pF หรือ 1 nF(หารด้วย1,000) หรือ 0.001 uF (หารด้วย 1,000,000) อ่านได้ 100 pF

ภาพที่ 2.39 คาปาซิเตอร์ 154

อ่านได้ 150000 pF 150 nF 0.15 uF

3. การอ่านแถบสี

การอ่านค่าความจุสามารถกระทำได้ตามวิธีที่อธิบายดังกล่าว แต่ในปัจจุบันตัวเก็บประจุได้ผลิตออกมามากมาย วิธีการอ่านก็มีหลากหลายวิธีมาก ดังนั้นผู้เขียนจะแสดงรูปและอธิบายวิธีการอ่านแต่ละตัวพอสังเขป เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป นอกจากนี้ตัวเก็บประจุได้แสดงค่าผิดพลาด และอัตราทนแรงดันไว้บนตัวเป็นอักษรภาษาอังกฤษเอาไว้แต่ละตัวมีความหมายดังนี้คือ

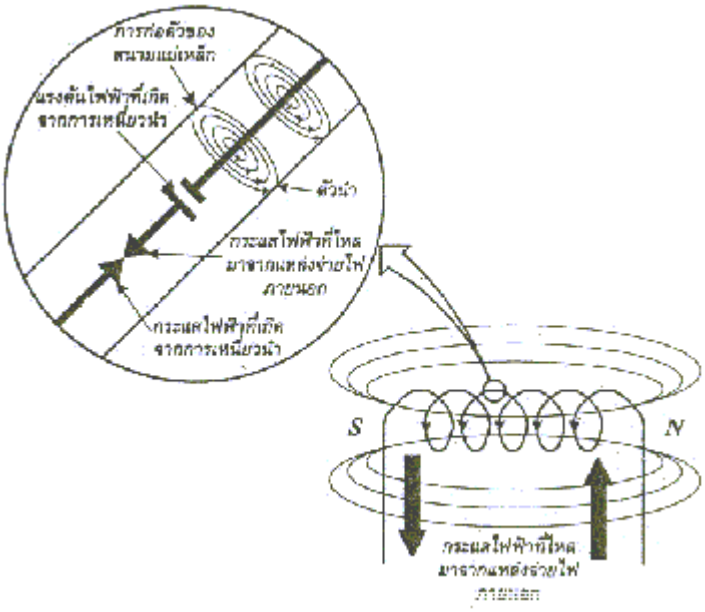
ตารางที่ 2.2 แสดงอักษรที่บอกค่าผิดพลาดและอัตราทนแรงดันบนตัวเก็บประจุ

อักษรตัวที่ 1	ค่าความผิดพลาด(%)	อักษรตัวที่ 2	อัตราทนแรงดั(VDC)
D	5	A	50
F	1	B	125
G	2	C	160
H	2.5	D	250
J	5	E	350
K	10	G	700
M	20	H	1,000

ตารางที่ 3.2 แสดงอักษรที่บอกค่าผิดพลาดและอัตราทนแรงดันบนตัวเก็บประจุ

2.3 ตัวเหนี่ยวนำ

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคร่อมเข้ากับขดลวดเป็นผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุดในช่วงเวลาสั้นๆ โดยการขยายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเริ่มจากส่วนกลางของลวดตัวนำ ซึ่งการขยายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเป็นการเคลื่อนที่ตัดกับตัวนำที่อยู่กับที่ ดังนั้น จึงส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น (การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำแล้วทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในนี้ เรียกว่า การเหนี่ยวนำภายใน (Self Inductance)



ภาพที่ 2.40 การต่อตัวเหนี่ยวนำคร่อมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

การต่อตัวเหนี่ยวนำคร่อมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อปิดสวิตช์ กระแสไฟฟ้าในวงจรจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานที่ต่ออันดับอยู่ ถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดก็จะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการขยายตัว และ ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างสนามแม่เหล็กกับตัวเหนี่ยวนำก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะคอยต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรโดยค่าความเหนี่ยวนำของ ตัวเหนี่ยวนำ 1 เฮนรี่ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์/วินาที ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 โวลต์ ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นการแสดงว่า Counter EMF (แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ) ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำจะมีปริมาณ

เท่าไรสำหรับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเดียวกัน สูตรคำนวณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือ Counter EMF เป็นดังนี้

$$V_{ind} = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)
ΔI = การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไฟฟ้า
Δt = การเปลี่ยนแปลงของเวลา

เมื่อความเหนี่ยวนำมีค่ามาก ($L \uparrow$) จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาก ($V_{ind} \uparrow$) และถ้าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเวลาที่ค่าเพิ่มขึ้น ($\Delta I / \Delta t \uparrow$) ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือ Counter EMF มีขนาดเพิ่มมากขึ้นด้วย ($V_{ind} \uparrow$)

ตัวอย่าง

จงคำนวณหาขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำคร่อมตัวเหนี่ยวนำค่า 4 H เมื่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอยู่ในอัตรา ก. 1 A/s ข. 4 A/s

วิธีทำ ก. $V_{ind} = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t} = 4\,H \times 1\,A/s$

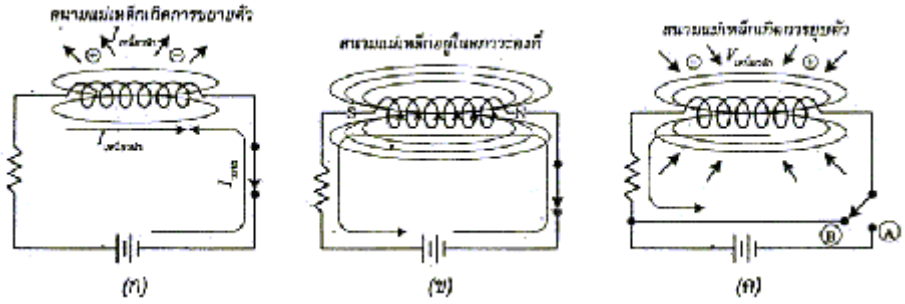
คำตอบ $= 4\,V$

ข. $V_{ind} = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t} = 4\,H \times 4\,A/s$

คำตอบ $= 16\,V$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ถ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นมากด้วยเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดจะทำให้สนามแม่เหล็กซึ่งจะมีปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าก็ถึงค่าสูงสุดด้วย และทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เกิดการขยายตัวอีกต่อไปโดยจะรักษาระดับให้คงที่ไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้าคงที่แล้วการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจึงไม่เกิดขึ้น ดังนั้น การเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างตัวเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงไม่เกิดขึ้น และสุดท้ายกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะไปต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรก็จะไม่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน ขดลวดจะรับพลังงานไฟฟ้า

และเก็บไว้ในรูปของพลังงานสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับกรณีที่ตัวเก็บประจุที่เก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปของสนาม ไฟฟ้านั่นเอง ถ้าปรับสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง B กระแสไฟฟ้าที่ไหลมาจากแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และทำให้สนามแม่เหล็กยุบตัวลงมา ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจรจึงไม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอีกต่อไป และถึงแม้เส้นแรงแม่เหล็กจะยุบตัวลงมา แต่ก็ยังเป็นการเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดตัวนำอยู่ (เป็นเหตุให้มีการเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างตัวเหนี่ยวนำ และสนามแม่เหล็ก) ส่ง ผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด ซึ่งผลที่ตามมาก็คือ เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะไหลไปในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าของวงจรซึ่งไหลอยู่ก่อนหน้านี้แล้ว (ก่อนหน้าที่สวิตช์จะเปิดวงจร) ขดลวดในขณะนี้จะเปลี่ยนพลังงานสนามแม่เหล็กไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และคืนพลัง งานที่เก็บสะสมไว้ในตอนแรกออกมาหลังจากเวลาผ่านไป สนามแม่เหล็กก็จะยุบตัวหมดแรงดัน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะกลายเป็นศูนย์ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในวงจรก็จะไม่เกิดขึ้นอีก

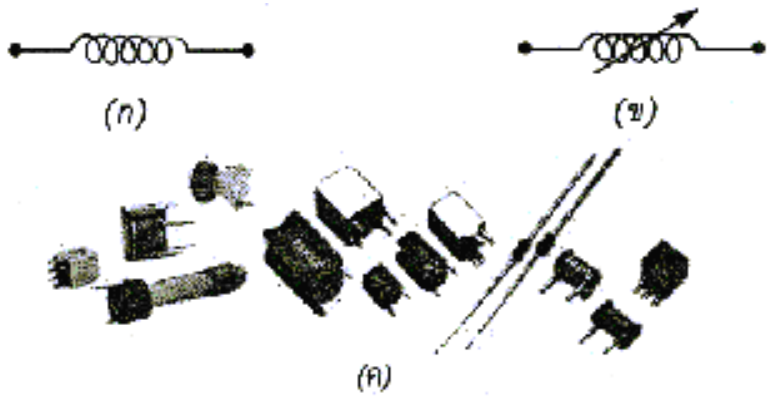


ภาพที่ 2.41 ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดนี้เรียกว่า Counter Electromotive Force (Counter EMF หรือ Back EMF) ซึ่งจะทำหน้าที่ต้านทานแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่และความสามารถของขดลวดหรือตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิด Counter EMF ขึ้นภายในซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเรียกว่า Self-Inductance หรือที่นิยมเรียก คือ ความเหนี่ยวนำ (Inductance, L) และมีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

การแบ่งชนิดของตัวเหนี่ยวนำ สามารถแบ่งได้เช่นเดียวกับการแบ่งชนิดของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ นั่นคือ ตัวเหนี่ยวนำชนิดค่าคงที่ และตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้ โดยมีสัญลักษณ์

ตามลำดับ นอกจากการแบ่งตัวเหนี่ยวนำออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ นี้แล้ว ตัวเหนี่ยวนำยังสามารถแยกออกเป็นแบบต่างๆ ได้อีกมากมาย ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำแกน



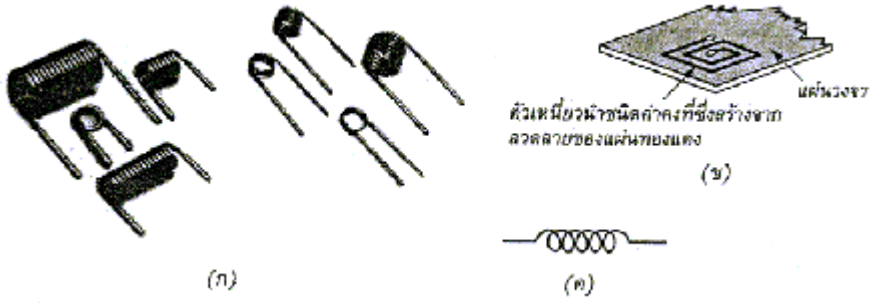
ภาพที่ 2.42 ตัวเหนี่ยวนำ

โดยปกติแล้วตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ทำมาจากขดลวดทองแดง โดยมีวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเคลือบลวดตัวนำนี้ไว้ วัสดุเคลือบหรือน้ำมันวานิชที่ใช้เคลือบลวดตัวนำนี้ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจร ทั้งนี้เนื่องจากการพันขดลวดจะต้องพันซ้อนทับซึ่งกันและกัน ตัวเหนี่ยวนำชนิดค่าคงที่ ที่พบมากในตลาดมี 3 แบบ ดังนี้

1. แบบแกนอากาศ

2. แบบแกนเหล็ก

3. แบบแกนเฟอร์ไรต์



ภาพที่ 2.43 ตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้

2.3.1 ตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้

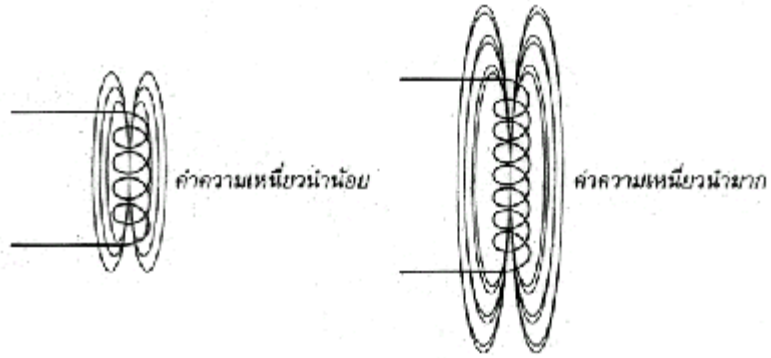
ค่าความเหนี่ยวนำจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยการปรับตำแหน่งของแกน โดยสัมพันธ์กับขดลวดที่อยู่กับที่ ตัวเหนี่ยวนำชนิดปรับค่าได้แบบเฟอร์ไรต์ ดังแสดงในรูป เป็นเพียงชนิดเดียวที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน การเคลื่อนที่เข้าออก ของแกนเฟอร์ไรต์จะปรับจากสกรู ถ้าแกนเคลื่อนที่ออกมานอกสุดจะทำให้ค่าความซาบซึมได้มีค่าต่ำ เนื่องจากการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเสมือนเกิดกับแกนอากาศ ดั่งนั้นค่าความเหนี่ยวนำจึงมีค่าต่ำ $(L\downarrow \propto \mu\downarrow)$ แต่ถ้าหมุนสกรูให้แกนเฟอร์ไรต์เคลื่อนที่เข้าไปในขดลวดมากขึ้น จะทำให้ค่าความซาบซึมที่ได้มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นด้วย$(L\uparrow \propto \mu\uparrow)$

ภาพที่ 2.44 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความเหนี่ยวนำถูกกำหนดโดย 4 ปัจจัย ดังนี้

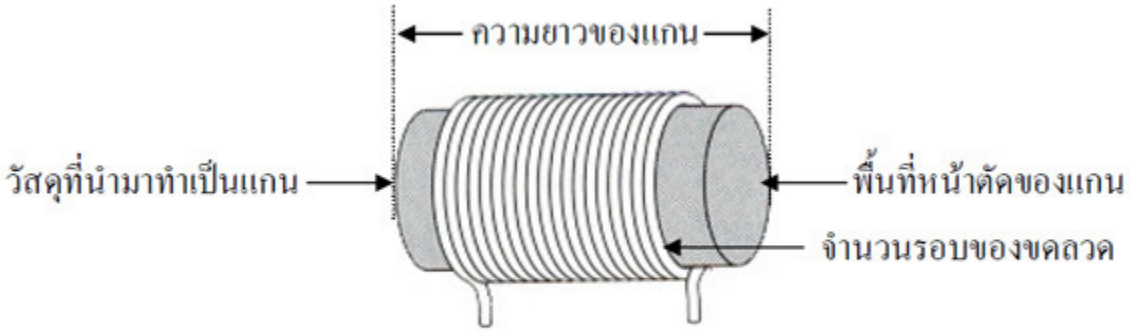
1. จำนวนรอบของขดลวด ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะเกิดขึ้นมากด้วย สนามแม่เหล็กปริมาณมากนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำที่เรียกว่า "Counter EMF หรือ Back EMF" และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด (N)

$L \propto N$



ภาพที่ 2.45 ค่าความเหนี่ยวนำ

2. พื้นที่ของขดลวด ถ้าพื้นที่ของขดลวดเพิ่มขึ้นสำหรับขดลวดที่มีจำนวนรอบใดๆ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมากขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด (A)



ภาพที่ 2.46 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

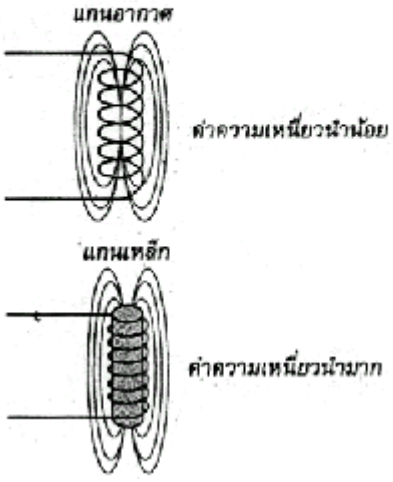
3. ความยาวของขดลวด ถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบ ขยายพื้นที่ออก (นั่นคือความยาวของขดลวดเพิ่มขึ้น) ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าขดลวดที่มีจำนวนเท่าเดิมนี้นำมาพันให้อยู่ชิดกันมากขึ้น (ความยาวของขดลวดสั้นลง) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของขดลวด

$$L \propto \frac{1}{l}$$

ภาพที่ 2.49 ความผกผันของความยาวขดลวด

4. วัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด (u) ตัวเหนี่ยวนำส่วนมากมีแกนที่ทำจากวัสดุจำพวกนิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก เฟอร์ไรต์ หรืออัลลอย ซึ่งแกนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยรวมหรือเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้น ค่าความซาบซึมได้ (Permeability) จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ โดยถ้าค่าความซาบซึมได้ของวัสดุที่ใช้ทำแกนมีค่ามาก ก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังแสดงในตารางแสดงตัวอย่างของวัสดุหลายชนิดที่นำมาใช้ทำแกน

$$L \propto \mu$$



ค่าความซาบซึมได้ของวัสดุชนิดต่าง ๆ	
วัสดุ	ค่าความซาบซึมได้ (μ)
อากาศ หรือสุญญากาศ	1.26×10^{-6}
นิกเกิล	6.28×10^{-5}
เคบอลต์	7.56×10^{-5}
เหล็กหล่อ	1.1×10^{-4}
เหล็กแท่ง	5.56×10^{-4}
แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	6.9×10^{-3}
เหล็กซิลิกอน	8.8×10^{-3}
เฟอร์มาลอย	0.126
ซุปเปอร์มาลอย	1.26

ภาพที่ 2.47 ความซาบซึมของวัสดุชนิดต่างๆ

สูตรการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ

จากปัจจัยทั้ง 4 ประการที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงสามารถนำมาเขียนเป็นสูตรคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L = \frac{N^2 \times A \times \mu}{l}$$

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

N = จำนวนของขดลวด

A = พื้นที่ของขดลวด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m2)

u = ค่าความซาบซึมได้ (Permeability)

l = ความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

2.3.3 การต่อตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร การต่อตัวเหนี่ยวนำจะมีรูปแบบการต่อเช่นเดียวกับการต่อตัวต้านทาน นั่นคือ ต่อแบบอนุกรมหรืออันดับ และต่อแบบขนาน กรณีนำตัวเหนี่ยวนำจำนวน 2 ตัว หรือมากกว่ามาต่อกันแบบอนุกรมจะเป็นการเพิ่มความยาวให้กับขดลวด และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรวมเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน การหาค่าความเหนี่ยวนำรวมจะใช้วิธีคำนวณเช่นเดียวกับวิธีของตัวต้านทาน โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำรวมที่ได้ จะมีค่าน้อยกว่าค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าน้อยที่สุดในวงจร

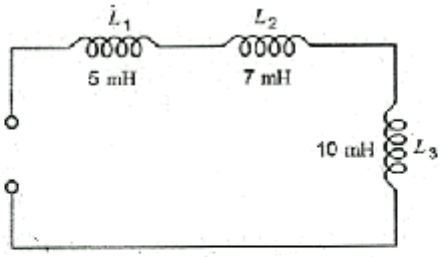
การต่อตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมหรืออันดับ

เมื่อตัวเหนี่ยวนำหลายๆ ตัวมาต่อกันแบบอนุกรม ค่าความเหนี่ยวนำรวมจะคำนวณได้จากการนำค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำทุกตัวมารวมกัน

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

ตัวอย่าง

จงคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำรวมของวงจรที่แสดงในรูป



วิธีทำ $L_T = L_1 + L_2 + L_3$

$= 5\text{ mH} + 7\text{ mH} + 10\text{ mH}$

คำตอบ $= 22\text{ mH}$

การต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน

การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำรวม เมื่อนำตัวเหนี่ยวนำมากกว่า 2 ตัว ต่อกันแบบขนาน

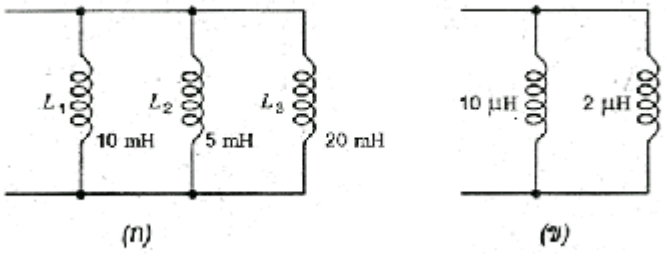
$$L_T = \frac{1}{(1/L_1)+(1/L_2)+(1/L_3)+\ldots}$$

กรณีต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน 2 ตัว จะได้ค่าความเหนี่ยวนำรวมเป็น

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2}$$

ตัวอย่าง

จงหาค่าความเหนี่ยวนำรวม (LT) ของวงจรที่แสดงในรูป



วิธีทำ ก. ใช้สูตรคำนวณทั่วไป

$$L_T = \frac{1}{(1/L_1)+(1/L_2)+(1/L_3)}$$

$$= \frac{1}{(1/10\text{mH})+(1/5\text{mH})+(1/20\text{mH})}$$

คำตอบ = 2.9 mH

ข. ใช้สูตรสำหรับการต่อตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน 2 ตัว

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2}$$

$$= \frac{10\mu\text{H} \times 2\mu\text{H}}{10\mu\text{H} + 2\mu\text{H}}$$

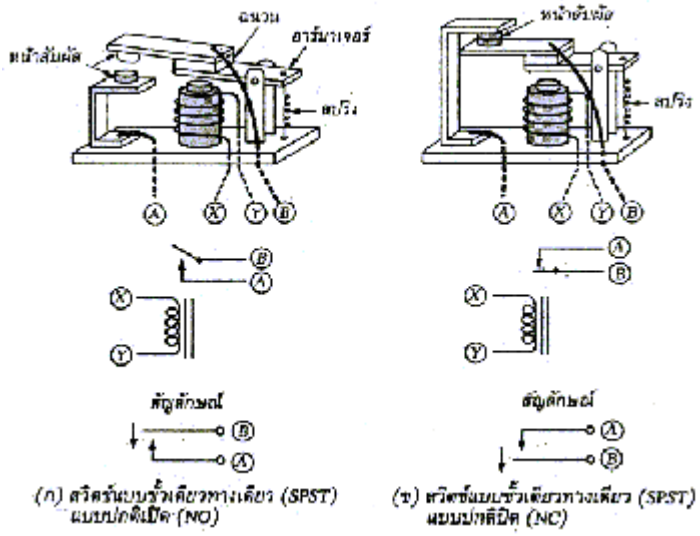
คำตอบ $= \frac{20 \times 10^{-12}\ \text{H}}{12\mu\text{H}} = 1.67\ \mu\text{H}$

2.3.4 อุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1. รีเลย์ (Relay)

ภาพที่ 2.48 รีเลย์

รีเลย์เป็นสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Swich) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อหรือเปิดวงจร การทำงานจะดึงหน้าสัมผัสเข้าหาหรือให้หนีออกจากอีกข้างหนึ่ง ดังแสดงในรูปแสดงสัญลักษณ์และรูปลักษณะของรีเลย์ แสดงรีเลย์แบบปกติเปิด (Normally Open Relay, NO) รีเลย์แบบปกติปิด (Normally Closed Relay, NC)



ภาพที่ 2.49 โครงสร้างภาพในรีเลย์

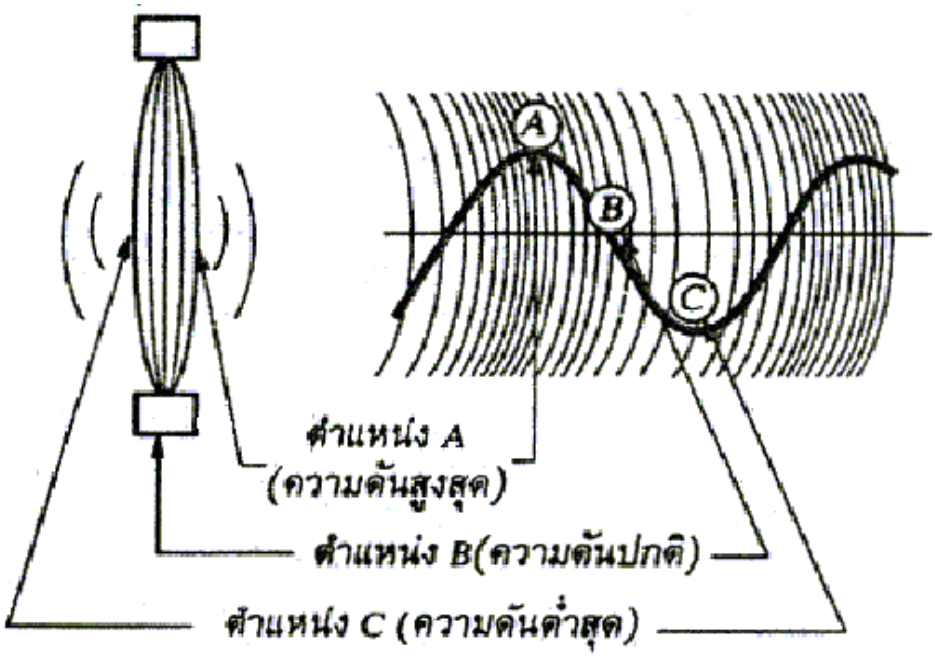
ส่วนประกอบของรีเลย์ประกอบด้วยชุดแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic) ที่ต่ออยู่กับสายไฟ X และ Y ชุดแขนเหล็กเคลื่อนที่หรือที่รู้จักว่า อาร์มาเจอร์ (Armature) และชุดหน้าสัมผัส (Contacts) สำหรับ การทำงานนั้น เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากสายไฟ X และ Y จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ชุดแม่เหล็กไฟฟ้า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ชุดแม่เหล็กไฟฟ้าถูกกระตุ้นให้เกิดพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ผลทำให้เกิดแรงดึงอาร์มาเจอร์เข้าหาชุดแม่เหล็กไฟฟ้า จากการทำงานในลักษณะเช่นนี้ ทำให้มีผลต่อการทำงานของรีเลย์ทั้งสองแบบ ดังนี้

- รีเลย์ชนิดปกติเปิด จะเป็นการดึงหน้าสัมผัสเข้าหาอีกข้างหนึ่ง
- รีเลย์ชนิดปกติปิด จะเป็นการเปิดหน้าสัมผัสให้หนีออกจากกัน

ถ้าหยุดการกระตุ้นชุดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการตัดกระแสไฟฟ้าไม่ให้ไหลผ่านขดลวด จะทำให้ไม่มีแรงดึงดูดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้สปริงที่คอยรั้งอาร์มาเจอร์อยู่ดึงอาร์มาเจอร์กลับในกรณีของรีเลย์ชนิดปกติเปิดก็จะเป็นการเปิดหน้าสัมผัสตัดการเชื่อมต่อกันระหว่าง

เส้นทาง A และ B ส่วนรีเลย์ชนิดปกติปิดก็จะเป็นการดึงหน้าสัมผัสให้กลับมาชิดกันเช่นเดิม ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อเส้นทาง A และ B เข้าด้วยกันนั่นเอง

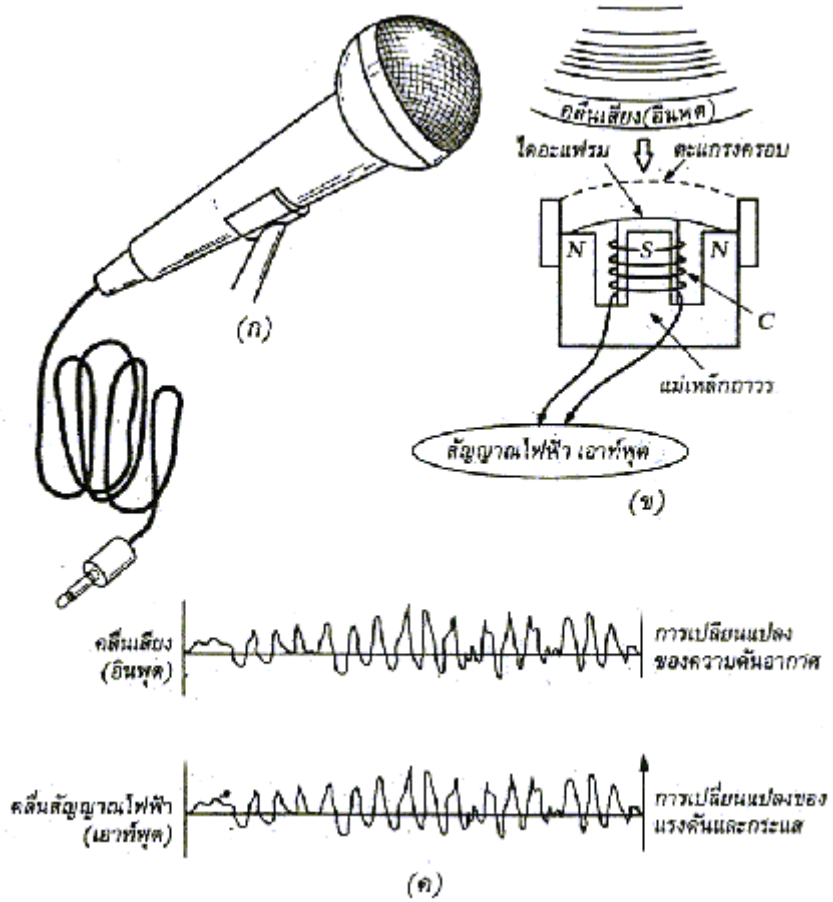
2. ไมโครโฟน (Microphone) ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากขดลวดเคลื่อนที่ โดยการทำงานจะอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) เพื่อที่จะเปลี่ยนคลื่นเสียงไปเป็นคลื่นสัญญาณ ไฟฟ้า จากที่ทราบว่าเสียงที่ได้ยินนั้นเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นความดันผ่านอากาศ ซึ่งการที่จะให้เกิดคลื่นความดันในลักษณะเช่นนี้ สามารถทำได้โดยใช้เส้นเชือกที่ขึงให้ตึง ผิวเนื้อเยื่อแผ่นบางๆ หรืออาจเป็นกล่องเสียงในลำคอของมนุษย์ และทำให้สิ่งที่กล่าวมาข้างต้นนี้เกิดการสั่นซึ่งจะส่งผลให้เกิดการอัดหรือขยายของโมเลกุลอากาศ เป็นตัวอย่างของการทำให้เส้นเชือกที่ถูกขึงให้ตึงเกิดการสั่นกลับไปกลับมา ผลของการสั่นจะทำให้เกิดย่านความดันอากาศสูงสุด (ตำแหน่ง A) และต่ำสุด (ตำแหน่ง B) สำหรับความถี่ของคลื่นเสียงที่เกิดจากการทำให้เส้นเชือกสั่นนั้นจะหาได้จากจำนวนรอบของการสั่นไปกลับจากตำแหน่งสูงสุดไปยังตำแหน่งต่ำสุดในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz) หรือ รอบ/วินาที ส่วนแอมปลิจูดหรือความเข้มของคลื่นเสียงจะหาได้จากช่วงของการเคลื่อนที่ของเส้นเชือกไปทางซ้ายหรือทางขวาโดยวัดจากตำแหน่งกึ่งกลาง (ตำแหน่ง B)



ภาพที่ 2.50 การเหนี่ยวนำของไมโครโฟน

ไมโครโฟนชนิดขดลวดเคลื่อนที่ (Moving Coil Microphone) ทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นเสียงไปเป็นคลื่นสัญญาณไฟฟ้าโดยอาศัยคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า รูปลักษณะภาย

นอกและโครงสร้างภายในของไมโครโฟนชนิดขดลวดเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูป จากรูปจะเห็นว่ามีขดลวดพันอยู่ในช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก และมีไดอะแฟรมซึ่งเป็นแผ่นวัสดุที่มีความบางและมีความยืดหยุ่นสูงยึดติดอยู่ โดยส่วนของไดอะแฟรมนี้จะถูกปิดครอบตัวฝาตะแกรงที่มีช่องพรุนเพื่อป้องกันความเสียหายใดๆ ที่จะเกิดกับไดอะแฟรมเมื่อคลื่นเสียงที่ไปกระทบกับผิวของไดอะแฟรมก็จะทำให้ไดอะแฟรมเกิดการสั่นกลับไปกลับมา ส่งผลให้ขดลวดที่ยึดติดอยู่กับไดอะแฟรมเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วย ซึ่งการเคลื่อนที่ของขดลวดตัดเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรกลับไปกลับมานี้ จะทำให้เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จะสามารถเหนี่ยวนำผ่านขดลวดนี้ออกไป (ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับนี้จะมีรูปคลื่นสัญญาณลักษณะเดียวกับคลื่นเสียงที่เป็นต้นกำเนิดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้านี้

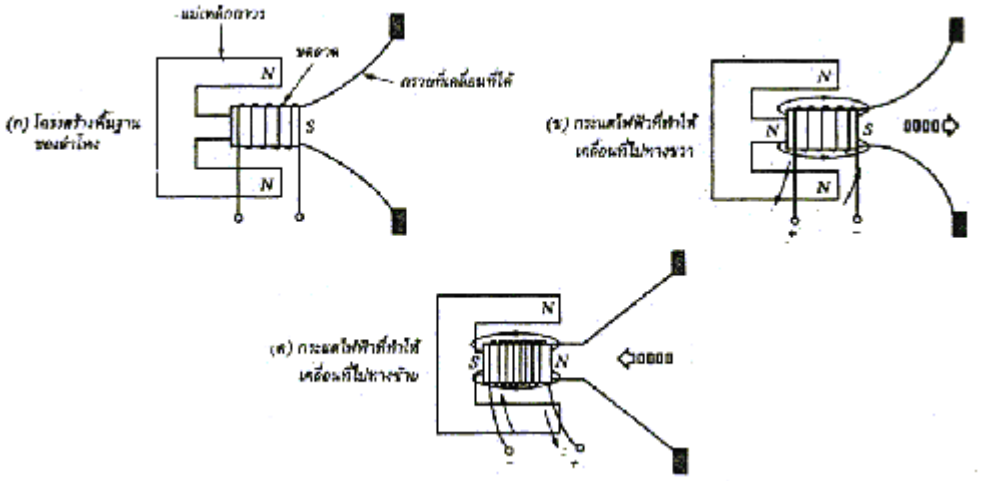


ภาพที่ 2.51 ไมโครโฟนชนิดขดลวนเคลื่อนที่

ไมโครโฟนชนิดขดลวดเคลื่อนที่นี้บางครั้งจะเรียกว่า ไมโครโฟนแบบไดนามิก (Dynamic Microphone) ทั้งนี้ก็เพราะโครงสร้างภายในมีการเคลื่อนที่ของขดลวดนั่นเอง

3. ลำโพง ลำโพงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณเสียง เช่น เสียงพูด เสียงดนตรี ให้ได้ยินผ่านทางวิทยุ หรือโทรทัศน์ เป็นต้น ลำโพงโดยทั่วไปจะเป็นแบบแม่เหล็กถาวร นั่นคือ การทำงานจะอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ลำโพงที่พบกันโดยทั่วไปจะถูกสร้างจากแม่เหล็กถาวรทำงานร่วมกับแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่บริเวณฐานของตัวลำโพงจะประกอบไปด้วยไดอะแฟรมซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแผ่นกระดาษบางๆ ยึดติดอยู่กับกระบอกลวงและมีขดลวดพันอยู่รอบๆ ซึ่งจะใช้เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดขึ้น ซึ่งการจัดลักษณะแบบนี้เป็นการให้ขั้วแม่เหล็กถาวรขั้วหนึ่งปรากฏอยู่ภายในกระบอกกลวงที่มีขดลวดพันอยู่รอบๆ นี้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในทิศทางหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาต่อกันระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด ส่งผลให้ตัวกระบอกเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา แต่ถ้าในกรณีที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนแรกก็จะมีผลให้ตัวกระบอกเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย

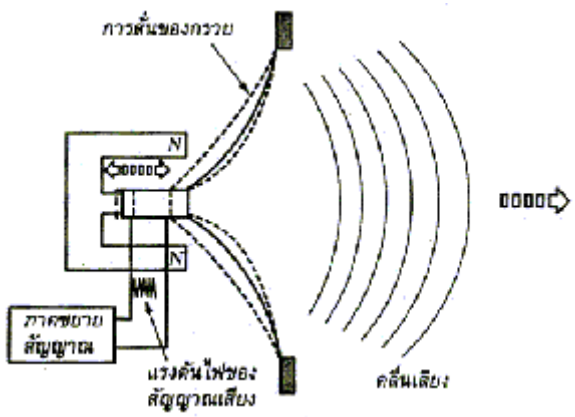
การเคลื่อนที่ของกระบอกกลวงที่ถูกพันด้วยขดลวดนี้จะทำให้ไดอะแฟรมซึ่งสามารถยืดหดได้เกิดการเคลื่อนที่เข้าออก โดยทิศทางของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าไปในขดลวด สำหรับปริมาณของกระแสไฟฟ้านั้นจะเป็นตัวกำหนดความเข้ม ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งก็หมายถึงการควบคุมการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรมนั่นเอง



ภาพที่ 2.52 โครงสร้างของลำโพง

จะเห็นว่า เมื่อมีสัญญาณเสียง (Audio Signal) เช่น เสียงพูด หรือเสียงดนตรีที่เปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วถูกส่งผ่านเข้ามายังขดลวด ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นมีการ

เปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาทั้งสองทิศทาง รวมทั้งปริมาณของกระแสไฟฟ้าก็แตกต่างกันด้วย จากเหตุผลข้างต้นส่งผลให้ไดอะแฟรมเกิดการสั่นเข้าออกอยู่ตลอดเวลาตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งการสั่นของไดอะแฟรมนี้จะทำให้อากาศที่สัมผัสอยู่กับไดอะแฟรมเกิดการสั่นเช่นเดียวกัน ซึ่งผลของการสั่นของโมเลกุลอากาศที่กระทบต่อๆ กันออกไปนี้จะเกิดเป็นคลื่นเสียงที่ได้ยินกันนั่นเอง



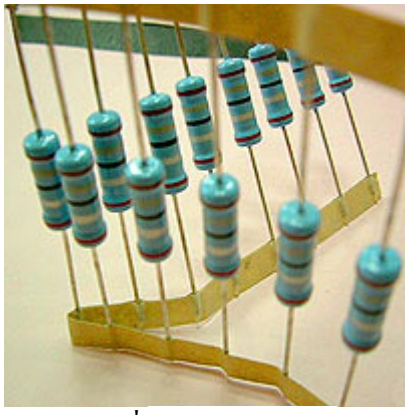
ภาพที่ 2.53 สัญญาณและทิศทองของลำโพง

2.4 วงจรกรองความถี่ (FILTER CIRCUIT)

วงจรกรองความถี่จะใช้สำหรับ กำหนดให้ความถี่ ผ่านไปได้ หรือผ่านไปไม่ได้ อาจจะเป็นเฉพาะช่วงใดช่วงหนึ่ง หรือช่วงกว้าง ๆ ก็ได้ ซึ่งจะประกอบขึ้นด้วย R (resistor) L (inductors) และ C (capacitors) โดยเอาคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์แต่ละชนิด คือ L จะยอมให้ความถี่ต่ำผ่านได้ง่าย ความถี่สูงผ่านยาก C ความถี่ต่ำผ่านยาก ความถี่สูงผ่านง่าย ส่วน R จะมีต้านทานทุกความถี่ให้มีระดับสัญญาณลดลง วงจรกรองความถี่ จะมีทั้งแบบ passive และ active คำว่า passive นั้นหมายถึงวงจร Filter ที่ไม่ต้องการไฟฟ้า ไม่มีการขยาย (Unpowered Components (R,L,C)) มีแต่การลดทอนสัญญาณลง การลดทอนนี้จะเรียกว่า insertion loss ส่วนวงจรแบบ active นั้นจะมีวงจรขยายสัญญาณอยู่ภายใน จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า มักจะใช้กันที่ความถี่ต่ำ ๆ เช่น ในวงจรเครื่องขยายเสียง

ภาพที่ 3.54 (inductors) หรือว่า ขดลวด

ภาพที่ 2.55 (capacitors) หรือว่า ตัวเก็บประจุ

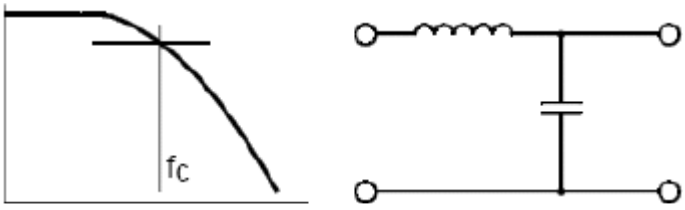


ภาพที่ 2.56 ตัวต้านทาน

Resistor หรือว่า ตัวต้านทาน แต่ในวงจรกรองสัญญาณนี้อาจจะเป็นความต้านทานของ ขดลวดก็ได้

วงจรกรองความถี่ มี 4 แบบคือ

2.4.1 Low pass filter (ความถี่ต่ำกว่าผ่านได้) บางครั้งอาจจะเรียกว่าวงจร high-cut filter สำหรับ ความถี่วิทยุ และtreble cut filter สำหรับวงจรขยายเสียง

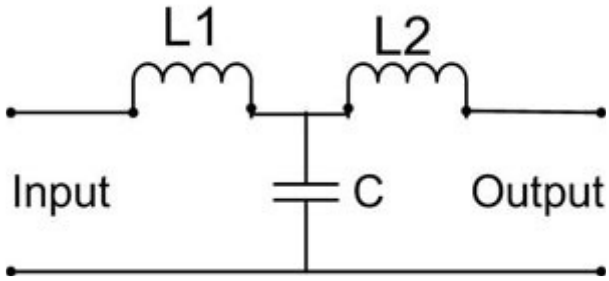


ภาพที่ 2.57 Low pass filter

วงจร low pass filter มีลักษณะการต่อคือ ใช้ L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อป้อนความถี่ ต่ำเข้าวงจร L จะมีค่า XL ต่ำ C จะมีค่า XC สูง ทำให้ความถี่ ต่ำผ่าน L ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า XL จะมากขึ้น ค่า XC จะลดลง ทำให้ความถี่ ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก

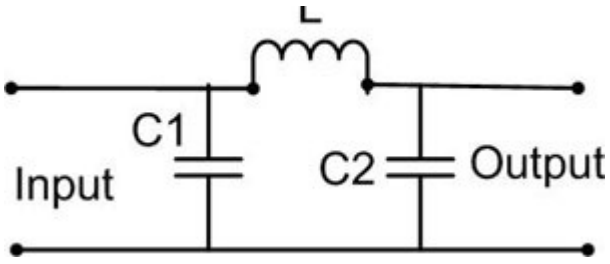
วงจร low pass filter ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

2.4.2 T Type low pass filter การใช้ L หรือ C เพียงตัวเดียว ไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมด ตรงจุด Cut Off ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้จึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่ม L เข้าไปในวงจรอีกชุด เมื่อต่อแล้ว ลักษณะวงจรคล้าย ตัว T จึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบที การกรองความถี่ ถ้าต้องการประสิทธิภาพ อาจจะใช้วงจรนี้หลายชุด



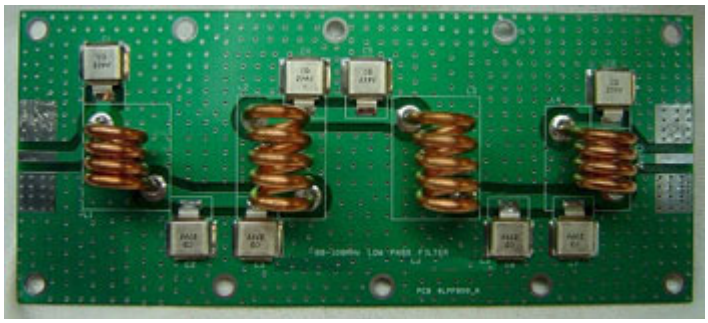
ภาพที่ 2.58 Type low pass filter

Pi Type low pass filter วงจรนี้จะใช้ C 2 ตัวและ L 1 ตัว ต่อกันดังรูป รูปร่างคล้ายตัว Pi (พาย) เรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย วงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟ และวงจร Regulator



ภาพที่ 2.59 Pi Type low pass filter

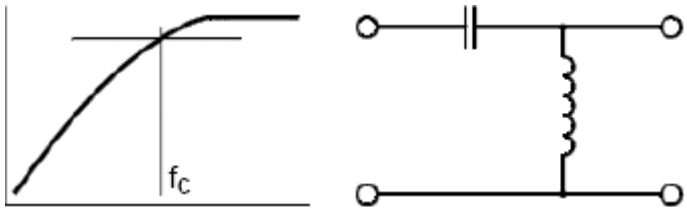
ตัวอย่างวงจร low pass filter ในย่าน วิทยุ FM 88 -108 MHz สามารถทนกำลังส่งได้ 800 วัตต์ ใช้ขดลวดเบอร์ 8 Awg และใช้ C แบบ Metal clad silver teflon caps



ภาพที่ 2.60 วงจร Low pass filter

วงจร low pass filter ที่กล่าวมาข้างต้น จะนำมาใช้ในวิทยุรับส่ง เมื่อ ไม่ต้องการให้สัญญาณความถี่ harmonic (ความถี่ harmonic จะสูงกว่าความถี่ที่ใช้งาน เป็นเท่าตัว เช่น 2 เท่า 3 เท่า เป็นต้น) จากเครื่องส่งของไปรบกวนระบบอื่น ๆ

2.4.3. High pass filter (ความถี่สูงกว่าผ่านได้) บางครั้งอาจจะเรียกว่าวงจร Low-cut filter สำหรับ ความถี่วิทยุ และ bass-cut filte สำหรับวงจรขยายเสียง

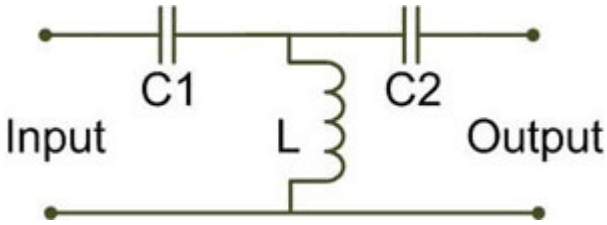


ภาพที่ 2.61 High pass filter

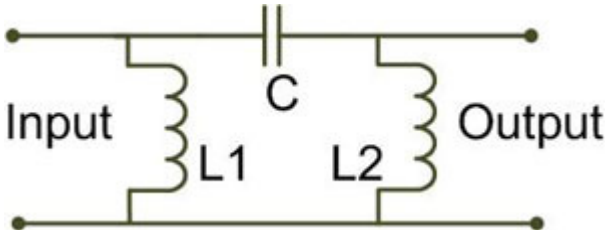
วงจรนี้จะยอมให้ความถี่ที่สูงกว่ากำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่าจะโดนจับลงกราวด์ จากรูปจะเห็นว่า C ต่ออนุกรมกับวงจร ส่วน L ต่อขนานกับวงจร เมื่อป้อนความถี่ต่ำกว่าเข้ามา C จะมีค่า XC สูง ทำให้สัญญาณผ่านไปได้น้อย ส่วน L จะมีค่า XLน้อย ทำให้สัญญาณที่ผ่านมาจาก C ลงกราวด์ได้หมด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้น C จะมีค่า XC ลดลง สัญญาณจะผ่านได้มากขึ้น ส่วน L จะมีค่า XL มากขึ้น สัญญาณก็จะลงกราวด์น้อยลง สัญญาณที่ออกไปยัง Output ก็มากขึ้น จนถึงระดับความแรงของสัญญาณประมาณ 70.7 % ของความแรงสูงสุด ระดับนี้เองที่เรียกว่า ช่วงความถี่

Cut off เมื่อความถี่สูงกว่า ความถี่ นี้ C จะยอมให้สัญญาณผ่านได้สะดวกและค่า XL จะต้านสัญญาณไม่ให้ลงกราวด์ ความถี่จึงผ่านไปที่จุด Output ได้ทั้งหมด

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ก็มี 2 แบบเช่นกัน

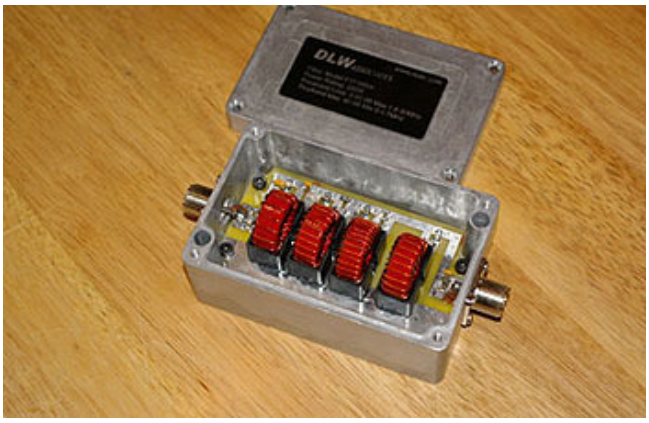


ภาพที่ 2.62 วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบที



ภาพที่ 2.63 วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาย

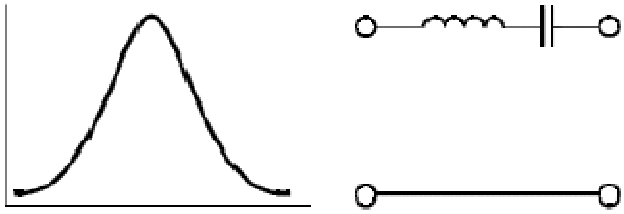
ตัวอย่างวงจร high pass filter ตัดความถี่ย่าน วิทยุ AM ออกไป สามารถทนกำลังส่งได้ 200 วัตต์ ใช้ C แบบ high voltage NPO ceramic capacitors



ภาพที่ 2.64 วงจร High pass filter

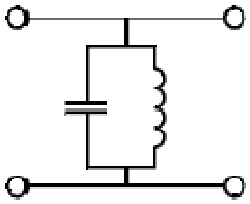
วงจร high pass filter ที่กล่าวมาข้างต้น จะนำมาใช้ในวิทยุรับส่ง เมื่อ ไม่ต้องการให้สัญญาณจากสถานีส่ง ที่มีความถี่ต่ำกว่า เข้ามารบกวน เช่น ที่บ้านผมอยู่ใกล้สถานีส่งวิทยุ AM ผมใช้วิทยุย่าน HF อยู่ คลื่นวิทยุ AM เข้ามารบกวนมาก ผมเลยใช้วงจร high pass filter กำจัดสัญญาณ AM ทิ้งไป

วงจรกรองความถี่แบบ band pass filter จะยอมให้ความถี่เฉพาะช่วงที่กำหนดให้ผ่านได้ควาถี่นอกจากนี้จะโดนตัดลงกราวด์ สามารถสร้างวงจร band pass filter โดยการใช้วงจร Resonance



ภาพที่ 2.65 band pass filter วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม

ในรูปวงจรจะใช้วงจร วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม คุณสมบัติของวงจรนี้คือ ความต้านทานต่ำที่ความถี่เรโซแนนท์ ทำให้สัญาณผ่านไปได้ง่าย แต่สำหรับความถี่อื่น ๆ ทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าจะไหลผ่านได้ยาก



ภาพที่ 2.66 band pass filter วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน

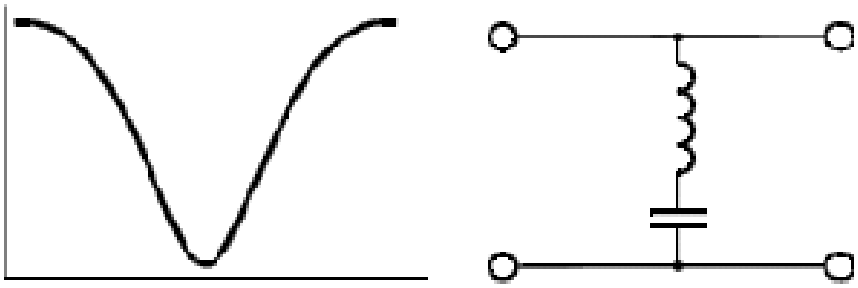
ในรูปวงจรจะใช้ วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน ต่อสัญญาณลงกราวด์ คุณสมบัติของวงจรนี้คือ ความต้านทานสูงที่ความถี่เรโซแนนท์ ความถี่อื่น ๆ จะถูกดึงลงกราวด์ (เพราะมีความต้านทานต่ำ) ส่วนความถี่เรโซแนนท์ จะผ่านไปได้ (ไม่ถูกดึงลงกราวด์ เพราะความต้านทานสูง)

ภาพที่ 2.67 ตัวอย่าง band pass filter ย่านความถี่ 144 MHz +/- 7 MHz ทนกำลังส่งได้ 100 วัตต์

วงจร band pass filte ที่กล่าวมาข้างต้น จะนำมาใช้ในวิทยุรับส่ง เช่น ใช้ความถี่ วิทยุสมัครเล่น 145 MHz แต่โดนสัญญาณรบกวนจาก สถานีวิทยุ ต่าง ๆ (ที่ใช้ความถี่อื่น) จำเป็นต้องใช้ตัว band pass filte ให้รับเอาเฉพาะความถี่เฉพาะที่ต้องการจริง ๆ

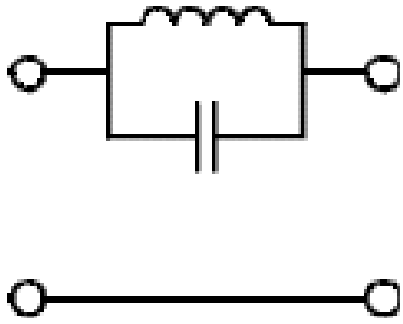
2.4.4 band stop (หรือ notch) filter (ช่วงความที่กำหนดผ่านไม่ได้)

วงจรกรองความถี่แบบ band stop filter จะยอมให้ความถี่อื่น ๆ ผ่านไปได้สะดวก แต่สำหรับความถี่ Resonance (ความถี่ที่จะกำจัด) จะโดนดึงลงกราวด์



ภาพที่ 2.68 band stop filter วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม

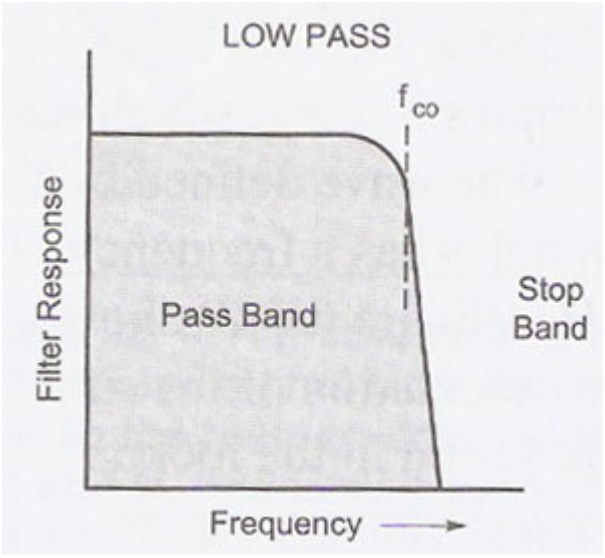
ในรูปวงจรจะใช้วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรมต่อลงกราวด์ คุณสมบัติของวงจรนี้คือ ความต้านทานต่ำที่ความถี่เรโซแนนท์ ทำให้สัญญาณผ่านลงกราวด์ได้ง่ายจึงไม่มีสัญญาณออกทาง Output แต่สำหรับความถี่อื่น ๆ ทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าวงจรจะมีความต้านทานสูง สัญญาณจะไม่ถูกดึงลงกราวด์ สามารถผ่านวงจรนี้ไปได้อย่างสบาย



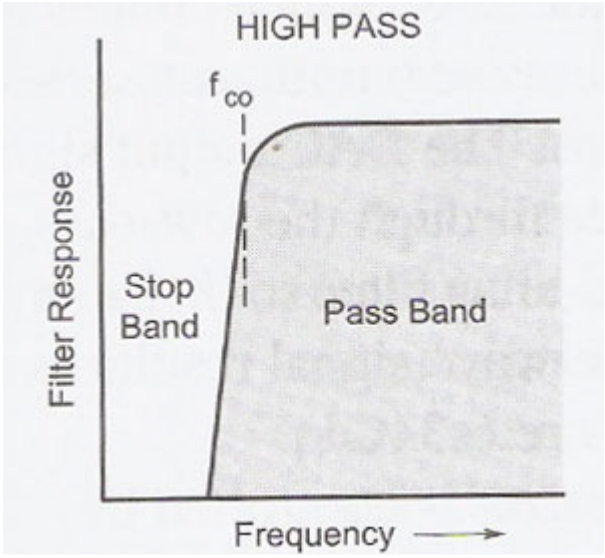
ภาพที่ 2.69 band stop filter วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน

ในรูปวงจรจะใช้ วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน แต่มาต่ออนุกรมกับวงจร คุณสมบัติของวงจรนี้คือ ความต้านทานสูงที่ความถี่เรโซแนนท์ สัญญาณจึงไม่สามารถผ่านไปได้ แต่พอความถี่อื่น ๆ จะมีความต้านทานต่ำ สัญญาณสามารถผ่านไปได้

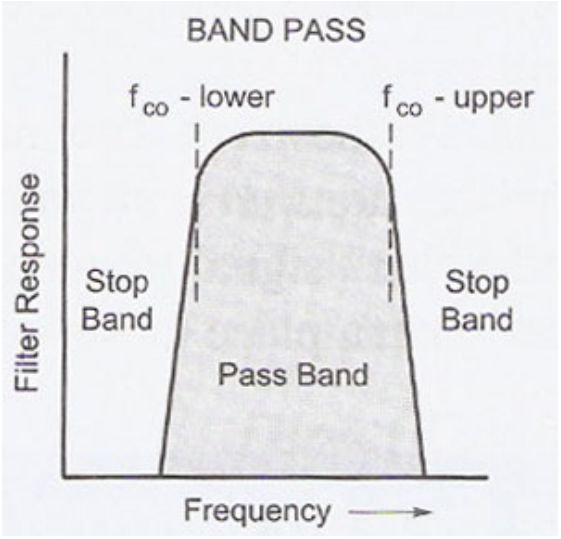
ภาพที่ 2.70 ตัวอย่าง band stop filter ใช้กับ ระบบทีวีรวม
สำหรับ ป้องกันความถี่บางช่องของทีวีออกไปเลย สามารถเลือกช่องได้



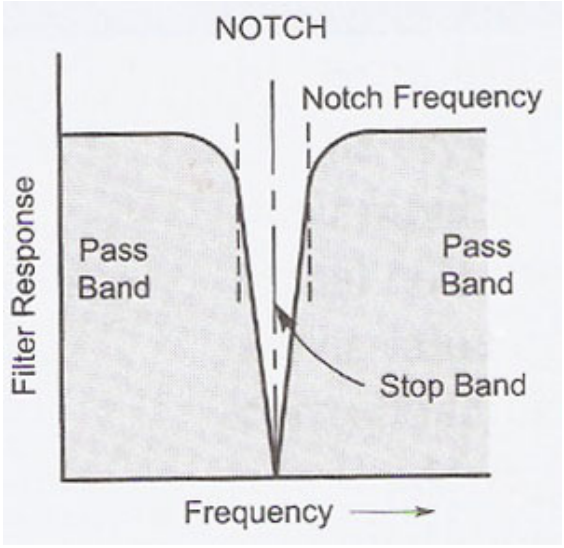
ภาพที่ 2.71 Low Pass Filter



ภาพที่ 2.72 High Pass Filter



ภาพที่ 2.73 Band Pass Filter

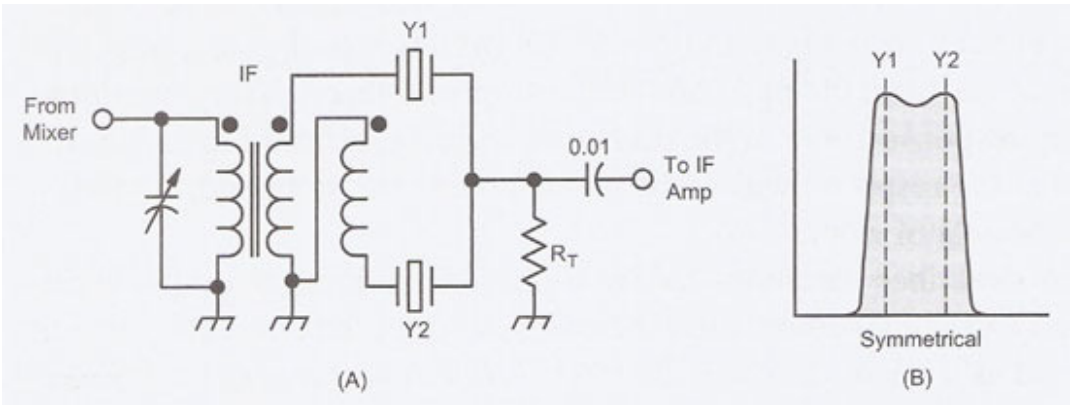


ภาพที่ 2.74 Notch Filter

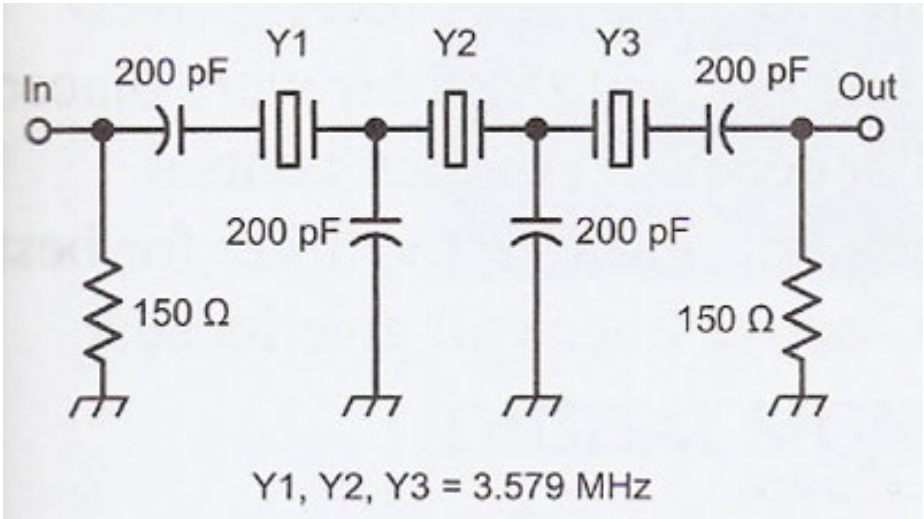
f_{co} (ย่อมาจาก Cutoff frequency) เป็นจุดที่กำลังไฟฟ้าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง Band Pass Filter จะมีจุด f_{co} 2 จุดทั้งด้านความถี่สูง และความถี่ต่ำ ส่วน Notch Filter หมายถึง วงจร Filter แบบ band stop filter ที่มี band แคบมาก ๆ (very narrow)

2.4.5 CRYSTAL FILTER

วงจรภาคขยาย IF ต้องการ วงจรกรองที่มีคุณภาพ และมี band ที่แคบ (Narrow bandwidth) เพื่อจะแยกสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณอื่น ๆ ที่มีความถี่ใกล้เคียงไม่สามารถที่จะใช้วงจรกรองความถี่แบบ L,C ธรรมดาได้ วงจรที่เลือกใช้คือวงจรกรองความถี่แบบ Crystal Filter ซึ่งจะมีค่า Q และ band ที่แคบกว่าวงจรแบบอื่น ๆ

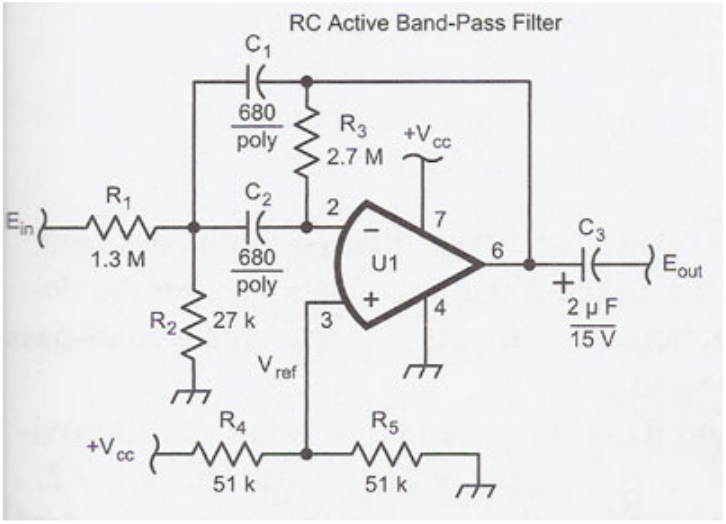


ภาพที่ 2.75 ตัวอย่างวงจร Crystal Filter แบบ Half-lattice Crystal Filter นิยมใช้ในเครื่องรับ SSB โดยต่อหลังจากวงจร Balnced Modulator ทำหน้าที่กำจัดสัญญาณ Sideband ที่ไม่ต้องการออกไป



ภาพที่ 2.76 ตัวอย่างวงจร Crystal Filter แบบ Ladder filter นิยมใช้ในวงจรเครื่องรับ CW

2.4.6 ACTIVE FILTER



ภาพที่ 2.77 ACTIVE FILTER

วงจรกรองความถี่ปกติแล้วจะออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ แบบพาสซีพ (PASSIVE FILLTERS) และแบบแอคทีฟ (ACTIVE FILLTERS) วงจรกรองความถี่สองประเภทนี้จะสามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการหรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกได้ ซึ่งวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟมีข้อดีกว่า แบบพาสซีฟ คือ

- ไม่มีการสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากออปแอมป์สามารถทำการขนานสัญญาณเพื่อชดเชยการลดทอนของสัญญาณได้

- ราคาถูก โดยเฉลี่ยแล้ววงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟจะมีราคาถูกกว่าแบบพาสซีฟ เนื่องจาก ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในแบบพาสซีฟมีราคาแพง และสร้างได้ยากกว่า

- การปรับค่า วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ สามารถปรับค่าความถี่ที่ต้องการได้ง่ายภาพใต้ย่านความถี่ที่กว้างกว่าที่สามารถปรับได้ในแบบพาสซีฟ

- การแยกระหว่างอินพุตและเอาต์พุต เนื่องจากวงจรกรองความถี่ แบบแอคทีฟมีการใช้ออปแอมป์ประกอบในวงจรจึงทำให้วงจรกรองความถี่แบบนี้มีอินพุต อินพีแดนซ์สูงและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ ทำให้ไม่มีผลการรบกวนกันระหว่างแหล่งจ่ายสัญญาณอินพุตและโหลด แต่อย่างไรก็ตาม การกรองความถี่แบบแอคทีฟก็มีข้อเสียอยู่บางประการ เมื่อเทียบกับแบบพาสซีฟ คือ

- การตอบสนองความถี่ วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟนั้นมีความสามารถในการตอบสนองความถี่ได้แคบกว่าแบบพาสซีฟเนื่องจากขีดจำกัดของออปแอมป์ยกตัวอย่างเช่นออปแอมป์เบอร์ 741 มีความสามารถในการตอบสนองความถี่ได้เพียง 1 MHZ

- แหล่มจ่ายไฟเลี้ยง เนื่องจากการใช้ออปแอมป์ทำให้ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงในการทำงานในขณะที่แบบพาสซีฟไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบ โดยจะกล่าวถึงวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ โดยวงจรกรองหยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถรองรับการใช้งานที่ ย่านความถี่ต่ำมีค่าเท่ากับ 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 2.3 – 2.7 GHz และคุณสมบัติในการใช้งานเป็นไปตามที่ต้องการได้

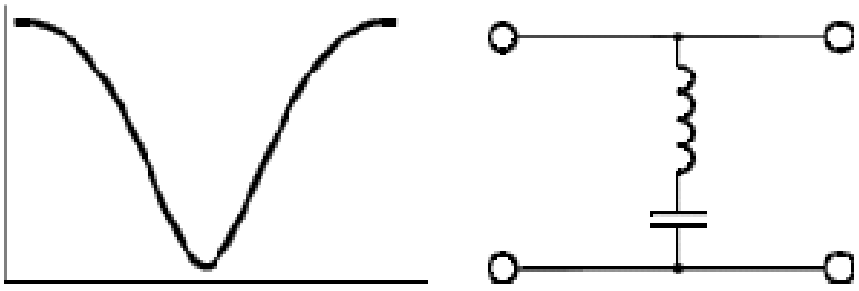
3.1 วงจรกรองความถี่ (FILTER CIRCUIT)

วงจรกรองความถี่จะใช้สำหรับ กำหนดให้ความถี่ ผ่านไปได้ หรือผ่านไปไม่ได้ อาจจะเป็นเฉพาะช่วงใดช่วงหนึ่ง หรือช่วงกว้าง ๆ ก็ได้ ซึ่งจะประกอบขึ้นด้วย R (resistor) L (inductors) และ C (capacitors) โดยเอาคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์แต่ละชนิด คือ L จะยอมให้ความถี่ต่ำผ่านได้ง่าย ความถี่สูงผ่านยาก C ความถี่ต่ำผ่านยาก ความถี่สูงผ่านง่าย ส่วน R จะมีต้านทานทุกความถี่ให้มีระดับสัญญาณลดลง วงจรกรองความถี่ จะมีทั้งแบบ passive และ active คำว่า passive นั้นหมายถึง วงจร Filter ที่ไม่ต้องการไฟฟ้า ไม่มีการขยาย (Unpowered Components (R,L,C)) มีแต่การลดทอนสัญญาณลง การลดทอนนี้จะเรียกว่า insertion loss ส่วนวงจรแบบ active นั้นจะมีวงจรขยายสัญญาณอยู่ภายใน จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า มักจะใช้กันที่ความถี่ต่ำ ๆ เช่น ในวงจรเครื่องขยายเสียง

* Resistor หรือว่า ตัวต้านทาน แต่ในวงจรกรองสัญญาณนี้อาจจะเป็นความต้านทานของขดลวดก็ได้

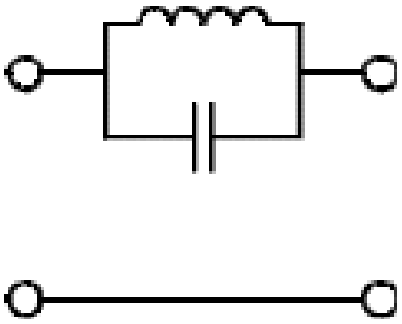
3.2 วงจรกรองหยุดแถบ (band stop filter)

วงจรกรองความถี่แบบ band stop filter จะยอมให้ความถี่อื่น ๆ ผ่านไปได้สะดวก แต่สำหรับความถี่ Resonance (ความถี่ที่จะกำจัด) จะโดนดึงลงกราวด์



ภาพที่ 3.1 band stop filter แบบอนุกรม

ในภาพที่ 3.1 วงจรจะใช้วงจรกรองหยุดแถบแบบอนุกรมต่อลงกราวด์ คุณสมบัติของวงจรนี้คือ ความต้านทานต่ำ ทำให้สัญญาณผ่านลงกราวด์ได้ง่ายจึงไม่มีสัญญาณออกทาง Output แต่สำหรับความถี่อื่น ๆ ทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าวงจรจะมีความต้านทานสูง สัญญาณจะไม่ถูกดึงลงกราวด์ สามารถผ่านวงจรนี้ไปได้อย่างสบาย

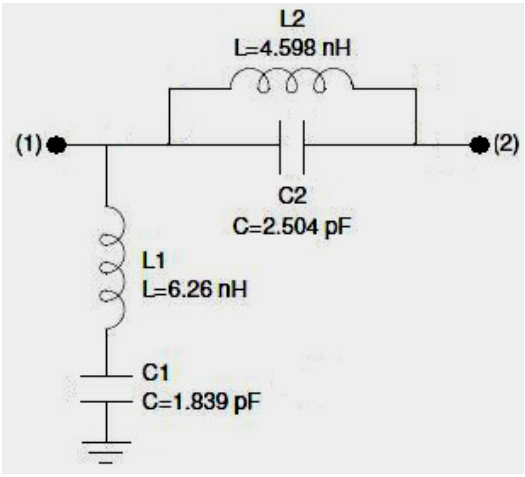


ภาพที่ 3.2 band stop filter แบบขนาน

ในรูปวงจรจะใช้ วงจรกรองหยุดแถบแบบขนาน แต่มาต่ออนุกรมกับวงจร คุณสมบัติของวงจรนี้คือ ความต้านทานสูง สัญญาณจึงไม่สามารถผ่านไปได้ แต่พอความถี่อื่น ๆ จะมีความต้านทานต่ำ สัญญาณสามารถผ่านไปได้

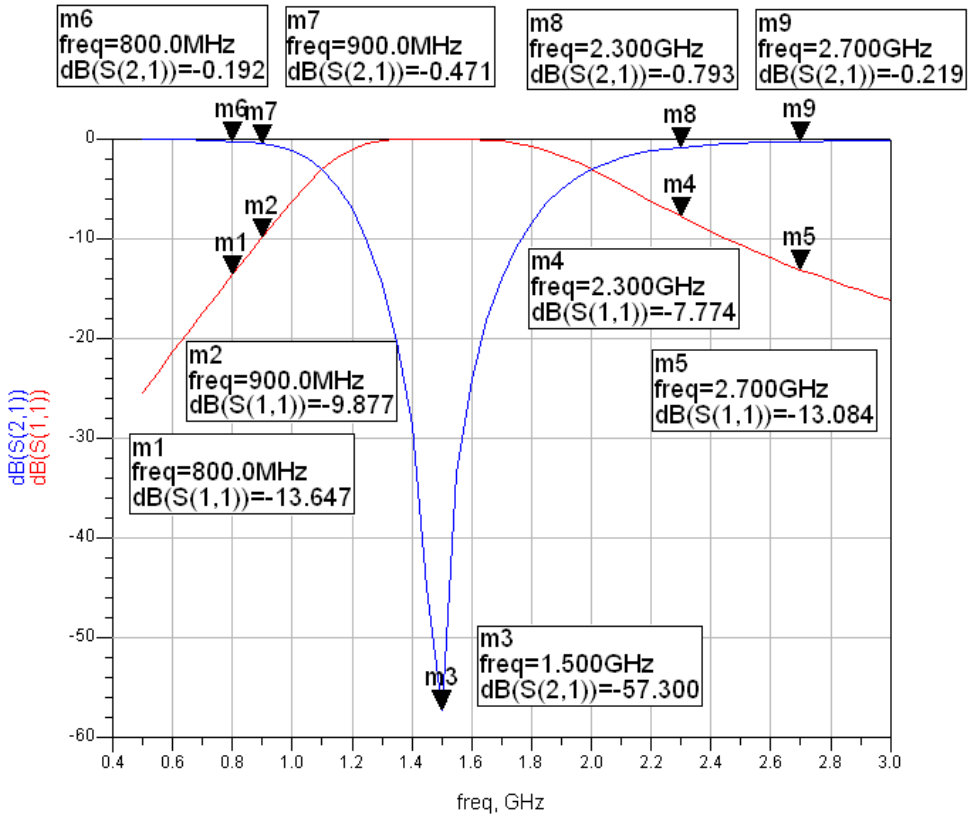
3.3 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์

วงจรกรองหยุดแถบนิยมถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์โดยอาศัยตารางการแปลงต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำไปเป็นวงจรกรองความถี่กรองหยุด เราจะออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบให้ทำงานรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 800 MHz ร่วมกับ 2.4 GHz จะได้วงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ *LC* ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์

นำวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบมาทดสอบการจำลอง



ภาพที่ 3.4 ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองวงจรหยุดแถบ

คุณสมบัติการทำงานที่ได้รับจากการจำลองวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์มีแสดงไว้ดังในภาพที่ 3.4 โดยค่า S_{11} (ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับหรือ Return Loss) และค่า S_{21} (ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับหรือ Return Loss) ที่ได้จากการจำลองของวงจรสรุปได้ดังนี้

(1) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -13.647 dB และ -9.877 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -7.774 dB และ -13.084 dB ตามลำดับ

(2) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.192 dB และ -0.471 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.793 dB และ -0.219 dB ตามลำดับ

(3) ที่ความถี่ศูนย์กลางของการออกแบบวงจรกรองหยุดแถบ 1.5 GHz พบว่า ค่า S_{21} มีค่าต่ำสุดตามต้องการ เท่ากับ -57.300 dB

บทที่ 4

ผลการวิจัย

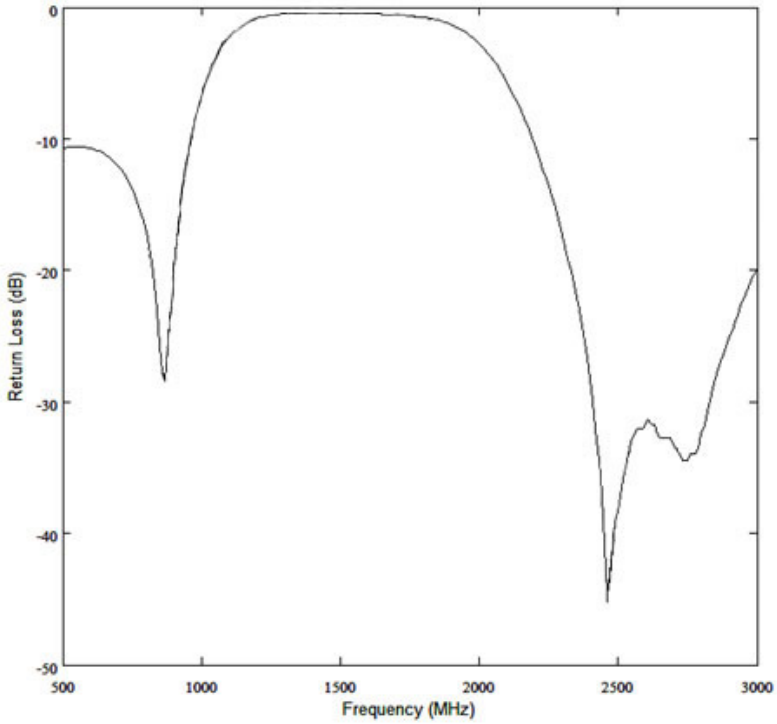
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและการวิเคราะห์สมรรถนะหรือคุณสมบัติในการทำงานของวงจรกรองหยุดแถบ การวัดค่าคุณสมบัติการทำงาน (Measurement Results) ได้แก่ ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss หรือ S_{21})

หลักการที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบวงจรไมโครเวฟชนิดต่างๆ ขึ้นมาใช้งานนั้น ผู้วิจัยจะต้องกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งาน ค่าเป้าหมายหรือเกณฑ์ที่ใช้ในการบ่งชี้ถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรนั้นๆ ขึ้นมาเสียก่อน โดยรายงานการวิจัยฉบับนี้ จะกำหนดค่าเป้าหมายต่างๆ ที่ต้องการจะได้รับจากวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ ดังนี้

1. รองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูง 2.3 - 2.7 GHz (กำหนดแบนด์วิดธ์ -3 dB ไว้ที่แถบหยุด 1.1 GHz – 2.2 GHz)
2. ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) มีค่าต่ำกว่า -20 dB (ค่าลบยิ่งมากจะทำงานได้ดีกว่า กล่าวคือ สัญญาณที่ส่งไปแทบจะสะท้อนกลับมาทางด้านอินพุตน้อยมากขึ้นเท่านั้น)
3. ค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss หรือ S_{21}) มีค่าไม่เกิน -1.5 dB (ค่าลบยิ่งน้อย จะทำงานได้ดีกว่า กล่าวคือ สัญญาณที่ส่งไปจะส่งผ่านจากอินพุตไปยังเอาต์พุตได้มากขึ้นเท่านั้น)

4.1 ผลการทดสอบวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ

ทดสอบวงจรกรองหยุดแถบให้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ และหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการทำงานของวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ



ภาพที่ 4.1 ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการทดสอบวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ

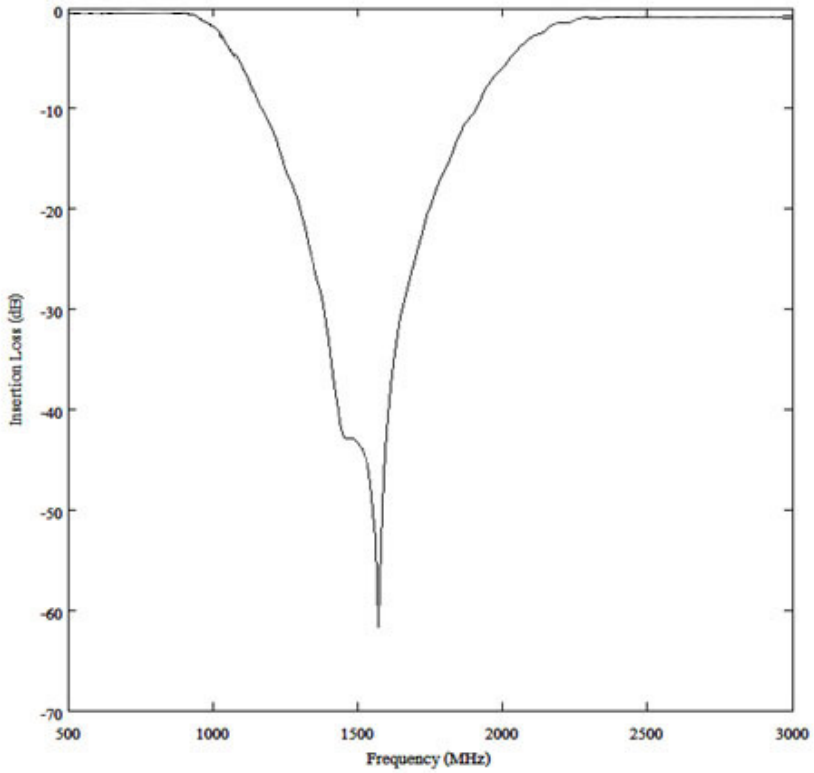
4.1.1 สามารถสรุปผลการทดสอบค่า S_{11} วงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบจากภาพที่ 4.1 ได้ดังนี้

1. ความถี่ 800 MHz ค่า S_{11} ที่ได้มีค่าเท่ากับ -20 dB ส่วนที่ความถี่ 900 MHz ค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB เช่นกัน

2. ค่า S_{11} ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทั้งย่านความถี่ต่ำ 800 - 900 MHz โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -28 dB ที่ 870 MHz

3. ความถี่ 2.3 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ -20 dB ส่วนที่ความถี่ 2.7 GHz ค่า S_{11} ค่าเท่ากับ -32.5 dB

4.วงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบสามารถใช้งานได้ คือ ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) มีค่าต่ำกว่า -20 dB



ภาพที่ 4.2 ค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการทดสอบวงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบ

4.1.2 สามารถสรุปผลการทดสอบค่า S_{21} วงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบจากภาพที่ 4.2 ได้ดังนี้

1. ตลอดทั้งย่านความถี่ต่ำ 800 - 900 MHz ค่า S_{21} ที่ได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง -0.38 dB ไปจนถึง -0.5 dB

2. ตลอดทั้งย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz ค่า S_{21} ที่ได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง -1.1 dB ถึง -0.85 dB

3. วงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบสามารถใช้งานได้ คือ ค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss หรือ S_{21}) มีค่าไม่เกิน -1.5 dB

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบด้านต่างๆ แล้วนั้น พบว่า วงจรกรองหยุดแถบที่ออกแบบนั้นสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ตามที่ต้องการ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อรองรับการใช้งานของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Dtac, TrueMove และ AIS) และย่านความถี่สูงในช่วง 2.3 – 2.7 GHz เพื่อรองรับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย ได้แก่ WiFi-2.4 GHz และ WiMAX-2.5 GHz โดยกำหนดสมรรถนะในการทำงานที่ให้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss) ที่ต่ำกว่า -20 dB และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss) มีค่าไม่เกิน -1.5 dB

5.2 อภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบวงจรหยุดแถบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อที่รองรับการใช้งานของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศ และรองรับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย โดยสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์งานวิจัยได้ดังนี้

5.2.1 ผู้วิจัยสามารถออกแบบวงจรกรองหยุดแถบที่รองรับการใช้งานในย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูงในช่วง 2.3 – 2.7 GHz

5.2.2 ผู้วิจัยออกแบบวงจรกรองหยุดแถบที่ใช้งานได้ โดยให้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -20 dB และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss) มีค่าไม่เกิน -1.5 dB

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 จากการออกแบบวงจรกรองหยุดแถบ พบว่า ย่านความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบ 800 – 900 MHz เป็นย่านความถี่ที่วงจรทำงานและตอบสนองแบบชันมาก ควรจะปรับจูนเพิ่มเติมเพื่อให้ค่า S_{11} ของย่านความถี่ต่ำผ่านแถบใช้งานในทางปฏิบัติได้ดียิ่งขึ้น

5.3.2 เนื่องจากระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ถูกใช้งานในปัจจุบันและในอนาคตของประเทศไทยยังคงที่จะมีอัตราการเติบโตที่สูงขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งแต่ละระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายมีการใช้งานย่านความถี่ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งและขอเสนอแนะว่า มีโอกาสที่จะนำหลักการออกแบบวงจรกรองหยุดแถบในงานวิจัยฉบับนี้ไปออกแบบและปรับปรุงเพื่อให้ได้โครงสร้างใหม่ที่สามารถรองรับการใช้งาน ณ ย่านความถี่อื่นๆ ของระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สาย

ของประเทศไทยในอนาคตได้ เช่น 3G หรือ 4G ที่ความถี่ 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz และ 2100 MHz ฯลฯ

บรรณานุกรม

ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. **คู่มือนักอิเล็กทรอนิกส์.** กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2538

นภัทร วัจนเทพินทร์. **เทคโนลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม.** กรุงเทพฯ : สกายบุ๊กส์, 2543

ประยุทธ อัครเอกฒาลิน. **การออกแบบวงจรไมโครเวฟ.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552

พิษณุ วิทย. **สู่โลกอิเล็กทรอนิกส์.** กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2538

ไพบูลย์ นาคมหาชลาสินธ์ และกนกพร คุณชัยเจริญกุล. **อิเล็กทรอนิกส์ หลักการประยุกต์ใช้งาน.** กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล อินเตอร์ไพรส์ อิงค์, 2542

อนันท์ คัมภิรานนท์. **เครื่องวัดไฟฟ้า.** กรุงเทพฯ : บริษัท เจริญรุ่งเรืองการพิมพ์ จำกัด, 2540

C.-Y. Hsu, H.-R. Chuang and C.Y. Chen. "Compact microstip UWB dual-band bandpass filter With tunable rejection band." **J. of Electromagn. Waves and Appl. (**2009) : 617-626

H.-Y. Anita Yim and K.-K. Michael Cheng. "Novel dual-band planar resonator and admittance For filter design and applications." **IEEE MTT-S Int'2005.** (June 2005) : 4 pages.

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล ว่าที่ร้อยตรีวรชัย ศรีสมุดคำ

   Acting Sub Lt.Worachai Srisamoodkham

2. ตำแหน่ง อาจารย์

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

   สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร

   มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ 67000

   โทรศัพท์ 056-717100 ต่อ 1491 E-mail hs5xij@hotmail.com

4. ประวัติการศึกษา

   ค.อ.บ.(วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์)

   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

   วศ.ม.(วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม)

   มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

5. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

   ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ โทรคมนาคม และคอมพิวเตอร์

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

   การสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดทดลองเพื่อเสริมทักษะ

   วิชาปฏิบัติการการออกแบบวงจรดิจิทัลและตรรกะ