

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบชี้เฉพาะโดยคลื่นความถี่วิทยุ

RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION



โดย

นาย สรศักดิ์ ลีลาพรอุดม

นาย ศุภยุทธ สิงห์ทิพย์

นางสาว วรารัตน์ เตติกิตติวัฒนกุล

ร.พ.

๘ 342๗

๒๕๕๐

เลขหมู่.....**83004**

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี...**๓๐.๐๘.๒๕๕๑**...

b. 11๙๕๗๙๑๒
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร

บัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบชี้เฉพาะ โดยคลื่นความถี่วิทยุ
RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION

โดย

นาย สรศักดิ์ ลีลาพรอุดม	47010815
นาย ศุภยุทธ สิงห์ทิพย์	47010783
นางสาว วรรัตน์ เลิศกิตติวัฒนกุล	47010667

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ประภากร สุวรรณะ

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์


คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบชี้เฉพาะโดยคลื่นความถี่วิทยุ (RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION)

ผู้จัดทำ

- | | |
|------------------------------------|----------|
| 1.นาย สรศักดิ์ ลีลาพรอุดม | 47010815 |
| 2.นาย ศุภยุทธ สิงห์ทิพย์ | 47010783 |
| 3.นางสาว วรารัตน์ เลิศกิตติวัฒนกุล | 47010667 |

ลงชื่อ  อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ประภากร สุวรรณะ)

17 / ๗ / ๒๕๕1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบชี้เฉพาะโดยคลื่นความถี่วิทยุ

นาย สรศักดิ์ สีลาพรอุดม รหัส 47010815

นาย ศุภยุทธ สิงห์ทิพย์ รหัส 47010783

นางสาว วรารัตน์ เลิศกิตติวัฒนกุล รหัส 47010667

ผศ.ประภากร สุวรรณะ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

หัวข้อโครงงานนี้นำเสนอชิ้นงาน RFID (Radio Frequency Identification Defination) คือระบบที่สามารถระบุอัตลักษณ์(ลักษณะเฉพาะ)ของวัตถุหนึ่งๆ ได้ด้วยการใช้คลื่นความถี่วิทยุ ระบบที่ออกแบบนี้ใช้งานที่ความถี่ย่าน 13.56 MHz ประกอบด้วยวงจรหลัก 2 ส่วน คือ วงจรส่วนของเครื่องอ่าน(Reader) และ วงจรของเครื่องถูกข่าย (Tag) สำหรับวงจรของ Reader ประกอบด้วย 1. ไมโครคอนโทรลเลอร์(CPU) 2. modulation 3. power amplifier 4. reader coil และวงจรของ Tag ประกอบด้วย 1. ไมโครคอนโทรลเลอร์(CPU) 2. modulation 3. regulation 4. Tag coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION

Mr. Sorasak Leelapornudom ID 47010815

Mr. Suphayut Singtip ID 47010783

Ms. Wararat Lertkittiwatthanakun ID 47010667

Asst. Prapakorn Suwana Advisor

Educational Year 2007

Abstract

This project is present about “RFID System” This system can identificate each object uniquely with using radio frequency. As this project using the frequency at 13.56 MHz. There are two parts, Reader circuit and Tag circuit, with complicate circuit component, there are microchip, modulation, power amplifier and reader coil and Tag circuit has a microchip, modulation, regulation and Tag coil.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

ผศ. ประภากร สุวรรณะ (อาจารย์ที่ปรึกษา) ที่ให้การอุปการะในการให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับโครงการ RFID และทางภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ยืมเครื่องมือในการทดลอง ตลอดจนส่งเสริมให้ความรู้จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการทำโครงการนี้

คุณพ่อคุณแม่ ที่คอยให้ความเป็นห่วง และสนับสนุนทางการเงินตลอดมาจนทำให้โครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีในโครงการนี้ ทางผู้จัดทำขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

(นาย สรศักดิ์ สีลาพรอุดม)

(นาย ศุภยุทธ สิงห์ทิพย์)

(นางสาว วรรัตน์ เลิศกิตติวัฒนกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	
Abstract	
กิตติกรรมประกาศ	
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบ Auto ID	1
1.2 RFID คืออะไร	2
1.3 มาตรฐานของ RFID	4
1.4 คลื่นพาห้ในระบบ RFID	5
1.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน RFID	6
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ส่วนประกอบของ RFID	8
2.1.1 แท็กส์ (Tags)	9
2.1.2 เครื่องอ่าน (Reader)	11
2.1.3 ขั้นตอนการทำงานระหว่างเครื่องอ่านกับแท็กส์	12
2.2 หลักการทำงานของ RFID	13
2.3 การเข้ารหัส (Coding)	14
2.4 การผสมข้อมูลแบบดิจิทัล	18
2.4.1 Amplitude Shift Keying (ASK)	19
2.4.2 Frequency Shift Keying (FSK)	19
2.4.3 Phase Shift Keying (PSK)	20
2.5 การสื่อสารแบบไร้สาย	20
2.6 อัตราการรับส่งข้อมูลและแบนด์วิดธ์	21
2.7 ระยะการรับส่งข้อมูลและกำลังส่ง	21
2.8 รูปแบบการส่งข้อมูลโดยใช้ความถี่คลื่นวิทยุ	23
2.8.1 การสื่อสารแบบ Full Duplex	23
2.8.2 การสื่อสารแบบ Half Duplex	23
2.8.3 การสื่อสารแบบ Sequential	23
2.9 เทคโนโลยี RFID ที่ใช้การสื่อสารแบบ Duplexing	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 พื้นฐานการออกแบบสายอากาศ	25
2.10.1 กระแสและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	25
2.10.2 แรงดันที่เหนี่ยวนำได้จากขดลวดสายอากาศ	27
2.10.3 ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำและชนิดของลวด	31
2.10.4 ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ	31
2.10.5 ความต้านทานของตัวนำด้วยการประมาณที่ความถี่ต่ำ	33
2.10.6 ตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบด้วยขดลวดสี่เหลี่ยมหลายชั้น	34
2.11 ค่าเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)	34
2.11.1 พลังงานในวงจรที่เชื่อมโยงกัน	37
2.11.2 หม้อแปลงเชิงเส้น	38
2.12 วงจรเรโซแนนซ์	38
2.12.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	39
2.12.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานหรือแบบวงจรเทงต์	40
2.13 การแมทซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance matching)	41
2.13.1 วงจรเสมือนการแปลงระหว่างอิมพีแดนซ์อนุกรมและขนาน	42
2.13.2 วงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์อย่างง่าย	43
2.13.3 Reader Coil matching using Quarter wave transformer	47
2.14 Class Pqwer Amplifier	50
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบวงจร	52
3.1 วงจร Tag	52
3.1.1 การออกแบบวงจร Tag Regulator	53
3.1.2 การคำนวณค่า NQ ของ Tag	59
3.2 วงจร Reader	69
บทที่ 4 โปรแกรมการติดต่อสื่อสารข้อมูล	
4.1 โปรแกรมของ Tag	75
4.2 โปรแกรมของ reader	76
บทที่ 5 การทดลองและบันทึกผล	78
บทที่ 6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	93
ภาคผนวก	
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ระบบ Auto ID ที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน	1
รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบ RFID	2
รูปที่ 3 RFID Microchip และ RFID Tag	3
รูปที่ 4 ความถี่ย่านที่ระบบ RFID ถูกใช้งาน	5
รูปที่ 5 การประยุกต์ใช้งาน RFID ในงานต่างๆ	7
รูปที่ 6 ส่วนประกอบหลักของระบบ RFID	8
รูปที่ 7 โครงสร้างภายในของ Tag	9
รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของ Passive Tag	10
รูปที่ 9 Active Tag ที่มีแบตเตอรี่ Lithium อยู่ภายนอก	10
รูปที่ 10 โครงสร้างภายในของ Reader	11
รูปที่ 11 ตัวอย่างเครื่องอ่านแบบต่างๆ	12
รูปที่ 12 รูปคลื่นของสัญญาณระหว่าง Tag และ เครื่องอ่านแบบ AM	13
รูปที่ 13 รูปตัวนำที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก (ขวา) แสดงวงจรที่สมมูลกับรูปทางซ้ายมือ	14
รูปที่ 14 การเข้ารหัสแบบต่างๆ	17
รูปที่ 15 การกระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของไลน์โค้ดชนิดต่างๆ	18
รูปที่ 16 การมอดูเลตเชิงขนาด	19
รูปที่ 17 การมอดูเลตเชิงความถี่	19
รูปที่ 18 การมอดูเลตเชิงเฟส	20
รูปที่ 19 การสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายและตัวรับข้อมูล	21
รูปที่ 20 ความแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบ Full Duplex ,Half Duplex และ Sequency	23
รูปที่ 21 การคำนวณสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง P เนื่องจากกระแสที่ไหลในลวดเส้นตรง	26
รูปที่ 22 การคำนวณสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง P เนื่องจากกระแสที่ไหลในเส้นลวดที่เป็นรูป	27
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะทาง r	27
รูปที่ 24 โครงสร้างพื้นฐานของตัวอ่านและ แท็กส์ในการประยุกต์ใช้ RFID	29
รูปที่ 25 ตำแหน่งของสายอากาศของแท็กส์	30
รูปที่ 26 ขดลวดลูปสี่เหลี่ยมหลายชั้น	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 27	ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น	35
รูปที่ 28	ขดลวดที่ค่า self inductance เท่ากับ L1 และ L2	36
รูปที่ 29	ทิศทางของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวด	37
รูปที่ 30	สัมประสิทธิ์การคลี่ปลีง	38
รูปที่ 31	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	39
รูปที่ 32	วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	40
รูปที่ 33	วงจรเสมือนอิมพีแดนซ์	42
รูปที่ 34	วงจรเมทซ์อิมพีแดนซ์แบบง่ายที่สุด	43
รูปที่ 35	การเมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่าง R1 และ R2	45
รูปที่ 36	วงจรเสมือนของสายส่ง	47
รูปที่ 37	การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เมทซ์ของสายส่งด้วยวงจร LC	49
รูปที่ 38	การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เมทซ์ของสายส่งด้วยวงจร LC (ต่อ)	49
รูปที่ 39	กราฟแสดงวงจรขยายคลาส C	50
รูปที่ 40	กราฟแสดงการ drive กระแสของวงจรขยายคลาส C	51
รูปที่ 41	กราฟแสดงการ drive กระแสของวงจรขยายคลาส C ขณะเกิด overdrive	51
รูปที่ 42	บล็อกไดอะแกรมของวงจรแท็กส์	52
รูปที่ 43	วงจร Tag Regulator	53
รูปที่ 44	Tag coil ชนิด Rectangular loop	59
รูปที่ 45	กราฟแสดง ripple filter เพื่อใช้สำหรับการคำนวณ $R_{L(AC)}$	63
รูปที่ 46	วงจร Sequential Tag (ภาคเรียนที่ 2)	66
รูปที่ 47	วงจร Reader	67
รูปที่ 48	วงจร Reader (ต่อ)	68
รูปที่ 49	วงจร Tag ที่ใช้ในการทดลองเห็นยว่นาแรงดัน	78
รูปที่ 50	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 470 \Omega$	81
รูปที่ 51	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 1 k\Omega$	82
รูปที่ 52	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 2 k\Omega$	83
รูปที่ 53	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = \infty$	84
รูปที่ 54	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 470 \Omega$	85
รูปที่ 55	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 1 k\Omega$	86
รูปที่ 56	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 2 k\Omega$	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = \infty$	88
รูปที่ 58 สัญญาณที่วัดได้จาก reader coil จากการทำงานแบบ Sequential	89
รูปที่ 59 สัญญาณที่ออกจากขา comparater	89
รูปที่ 60 สัญญาณ T_x	90
รูปที่ 61 สัญญาณ $\overline{T_x}$	90
รูปที่ 62 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง T_x กับ $\overline{T_x}$	91
รูปที่ 63 สัญญาณ input ของ MCU ฟัง Reader ขณะที่ยังไม่มี Data จาก Tag	91
รูปที่ 64 ระยะไกลที่สุดระหว่าง reader กับ tag ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้	92
รูปที่ 65 ระยะไกลที่สุดระหว่าง reader และ tag ที่สามารถส่งข้อมูลได้	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความถี่มาตรฐานกับ RFID Tags แบบต่างๆ	22
ตารางที่ 2.2 AWG WIRE CHART	33
ตารางที่ 3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของวงจร Tag	65
ตารางที่ 5.1 วงจรรักษาระดับแรงดันเมื่อ V_{in} ค่าต่างๆ ที่ $R_L = 470 \Omega$	79
ตารางที่ 5.2 วงจรรักษาระดับแรงดันเมื่อ V_{in} ค่าต่างๆ ที่ $R_L = 1 k\Omega$	79
ตารางที่ 5.3 วงจรรักษาระดับแรงดันเมื่อ V_{in} ค่าต่างๆ ที่ $R_L = 2 k\Omega$	80
ตารางที่ 5.4 วงจรรักษาระดับแรงดันเมื่อ V_{in} ค่าต่างๆ ที่ $R_L = \infty$	80
ตารางที่ 5.5 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 3W, R_L = 470 \Omega$	81
ตารางที่ 5.6 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 3W, R_L = 1 k\Omega$	82
ตารางที่ 5.7 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 3W, R_L = 2 k\Omega$	83
ตารางที่ 5.8 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 3W, R_L = \infty$	84
ตารางที่ 5.9 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 750 mW, R_L = 470 \Omega$	85
ตารางที่ 5.10 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 750 mW, R_L = 1 k\Omega$	86
ตารางที่ 5.11 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 750 mW, R_L = 2 k\Omega$	87
ตารางที่ 5.12 วัตต์ค่าแรงดันที่ระยะต่างๆ เมื่อ $P = 750 mW, R_L = \infty$	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบ Auto ID

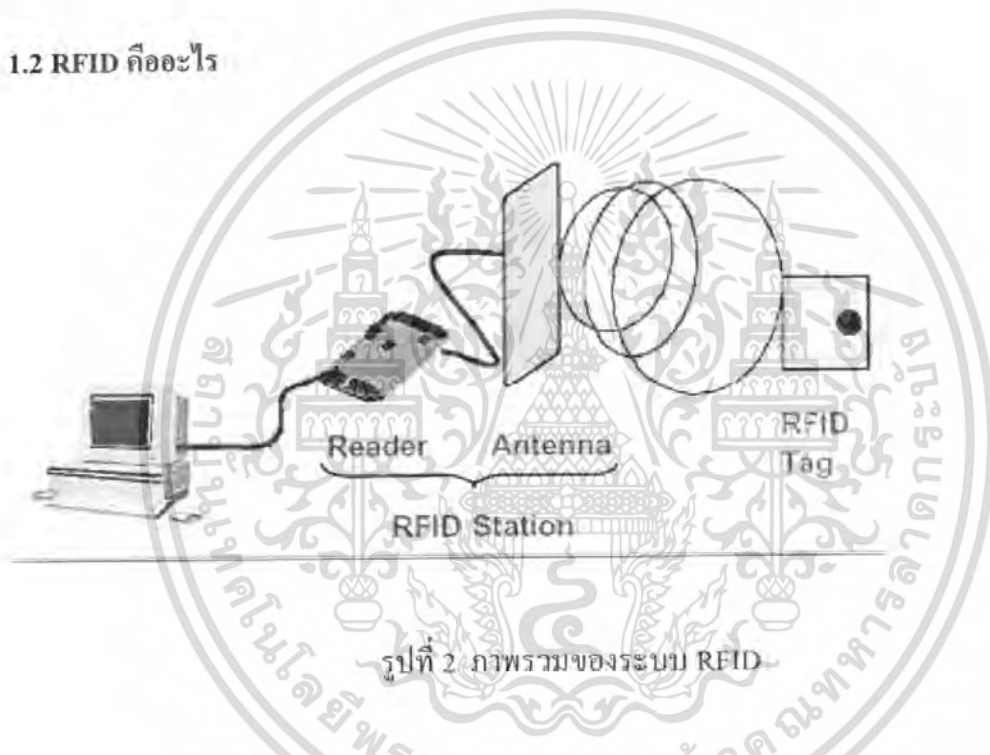


รูปที่ 1 ระบบ Auto-ID ที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน

ในปัจจุบันนี้ระบบบ่งชี้อัตโนมัติ (Automatic Identification) หรือ Auto ID ถูกนำมาใช้งาน และพัฒนาไปอย่างมากทั้งในภาคอุตสาหกรรม ลอจิสติกส์ กระบวนการผลิต การขนถ่ายวัตถุดิบ ฯลฯ ระบบ Auto ID ถูกนำมาใช้ในการจัดเก็บข้อมูล ระบุสถานะของคน สัตว์ สิ่งของ เช่น สินค้า ที่เราให้ความสนใจ ระบบ Auto ID ที่เป็นที่รู้จักและใช้งานกันแพร่หลายที่สุดคือ “ระบบบาร์โค้ด” (Barcode System) ซึ่งสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น บนหีบห่อสินค้าหนังสือ หรือ บนตัวสินค้า เนื่องจากมีต้นทุนต่อหน่วยที่ต่ำง่ายต่อการใช้งานจึงเป็นเหตุผลให้บาร์โค้ด ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด แต่บาร์โค้ดก็มีข้อจำกัดหลายประการได้แก่ จัดเก็บข้อมูลได้จำกัด เสียหาย หรือมีปัญหาระหว่างการอ่านได้ง่าย ระบบ Auto ID ที่เรารู้จักรองลงมาจากบาร์โค้ดก็คือระบบสมาร์ทการ์ด (Smart Card System) ซึ่งเป็นระบบที่กำลังมีบทบาทอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน เราจะพบเห็นสมาร์ทการ์ดในรูปแบบของบัตรต่างๆ เช่น บัตรชม ภาพยนตร์ ซิมการ์ดของโทรศัพท์เคลื่อนที่ และบัตรสมาชิกตามคลับต่างๆ โดยใช้แถบแม่เหล็กหรือไมโครชิปในการอ่าน/เขียนข้อมูล ระบบซิมการ์ดนั้นมีข้อดีคือสามารถเก็บข้อมูลได้มาก ปลอดภัย แต่เนื่องจากเป็นแถบแม่เหล็ก วิธีการอ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติโทษไปไซ้ประโยชน์ดานการคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจากสมาร์ทการ์ดจึงต้องใช้วิธีสัมผัสทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องอ่านเมื่อใช้ไปนานๆ นอกจากนี้ยังมีระบบ Auto ID อีกชนิดหนึ่งซึ่งกำลังเป็นที่นิยมและเป็นระบบที่จัดข้อเสียของทั้งระบบบาร์โค้ดและสมาร์ทการ์ด เราเรียกระบบนี้ว่า **RFID (Radio Frequency Identification)** เป็นระบบ Auto ID ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นความถี่วิทยุ เป็นพาหะในการสื่อสารข้อมูล ในหนังสือเล่มนี้จะเป็นเนื้อหาของระบบ RFID ตั้งแต่พื้นฐาน โครงสร้างการทำงานและการประยุกต์ใช้งาน โดยส่วนแรกจะเป็นการแนะนำระบบ RFID ให้เป็นที่รู้จักก่อนดังนี้

1.2 RFID คืออะไร



รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบ RFID

RFID เป็นระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่ มีมานานเกือบร้อยปีแล้ว แต่ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ยังมีขนาดใหญ่ไม่สะดวกในการติดตั้งและใช้งาน ปัจจุบันเทคโนโลยีนี้กำลังจะมีบทบาทมากขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้ามาเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเราอย่างเลี่ยงไม่ได้ ส่วนประกอบของระบบ RFID มี 2 ส่วนดังนี้

1. RFID Tags หรือ Transponder
2. เครื่องอ่าน Reader หรือ Interrogator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานของ RFID คือความต้องการให้ สิ่งมีชีวิต ,วัตถุ หรือ เจ้าของวัตถุ ที่มีฉลากหรือป้าย RFID ติดอยู่ สามารถแจ้งข้อมูล ประวัติ หรือ ลักษณะเฉพาะ ของตัวเองให้ผู้อื่น ที่มีเครื่องอ่านRFID ทราบได้ ผ่านทางคลื่นวิทยุ โดยอัตโนมัติ RFID ย่อมาจากคำว่า “Radio Frequency IDentification” คือการใช้ไอซีประเภทไมโครชิปใส่ไว้ใน ป้ายหรือฉลาก ซึ่งไมโครชิปจะเก็บข้อมูลที่สำคัญและ จำเป็นไว้ และส่งสัญญาณข้อมูลออกมาด้วยความถี่วิทยุที่กำหนดไว้ ไปยังเครื่องรับหรือเครื่องอ่าน ข้อมูลRFID ที่อยู่ในระยะส่ง แผ่นป้ายหรือฉลากที่ระบุข้อมูลไว้ในไมโครชิปนี้ เราเรียกว่า RFID Tags หรือ Transponder แผ่นป้ายระบุข้อมูล (RFID Tags) ประกอบด้วยแผงวงจรไมโครชิปกับเสาอากาศขนาดเล็ก(แบบไดโพล) ที่ฝังเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นป้ายระบุข้อมูล



รูปที่ 3 RFID Microchip และ RFID Tags

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RFID มีระบบที่ทำงานคล้ายคลึงกับ Smart Card และทำหน้าที่แทน Barcode ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในระบบ Smart Card จะใช้บัตรที่มีหน่วยความจำ และไม่โครโปรเซสเซอร์บรรจุอยู่ภายใน สัมผัสโดยตรงกับเครื่องอ่านบัตร ทำให้สามารถทราบข้อมูลต่างๆที่ต้องการให้ทราบของผู้ถือบัตรได้ ส่วนระบบ RFID ตัวบัตรสามารถอยู่ห่างจากเครื่องอ่านได้ ไม่ต้องสัมผัสเครื่องอ่านแบบบัตรสมาร์ตการ์ด และไม่ต้องหันบัตรเข้าหาเครื่องอ่านเหมือน Barcode นอกจากนี้ RFID ยังมีจุดเด่นอยู่ที่การอ่านข้อมูลจากแท็ก (Tag) ได้หลายๆ แท็กแบบไร้สัมผัสและสามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก สามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิพที่อยู่ในแท็ก RFID

ในปัจจุบันได้มีการนำ RFID ไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ นอกเหนือจากการนำมาใช้งานในระบบบาร์โค้ดแบบเดิม เช่น ใช้ในบัตรชนิดต่างๆ อาทิ บัตรสำหรับผ่านเข้าออกสถานที่ต่างๆ บัตรที่จ่อครดตามศูนย์การค้าต่างๆ ที่เราอาจพบเห็นอยู่ในรูปของแท็กสินค้า มีขนาดเล็กมากจนสามารถแทรกลงระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษได้ หรือเป็นแคปซูลขนาดเล็กฝังเอาไว้ในตัวสัตว์เพื่อบันทึกประวัติต่างๆ เป็นต้น

1.3 มาตรฐานของ RFID

เนื่องจากการที่กำหนดมาตรฐานออกมาใช้ในประเทศอย่างเป็นทางการล่าช้าจะส่งผลให้เทคโนโลยี RFID ในประเทศมีการพัฒนาช้าตามไปด้วย ซึ่งมาตรฐานของ RFID สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. คลื่นความถี่ (RF Spectrum) คลื่นความถี่ที่จะใช้สำหรับอุปกรณ์ RFID นี้ค่อนข้างยากที่จะกำหนดให้เป็นมาตรฐานสากล เนื่องจากแต่ละประเทศเป็นเจ้าของและเป็นผู้ควบคุมการใช้คลื่นความถี่เอง ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับว่าแต่ละประเทศที่จะเป็นผู้พิจารณาจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับการใช้งานประเภทต่างๆ

2. มาตรฐาน RFID (RFID Standards) บริษัทผู้ผลิตต่างๆ ได้พัฒนาและผลิตระบบ RFID ออกมา โดยมีมาตรฐานที่ใช้ในการส่งถ่ายข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านกับแท็กที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นกับความต้องการของตลาดเป็นสำคัญ

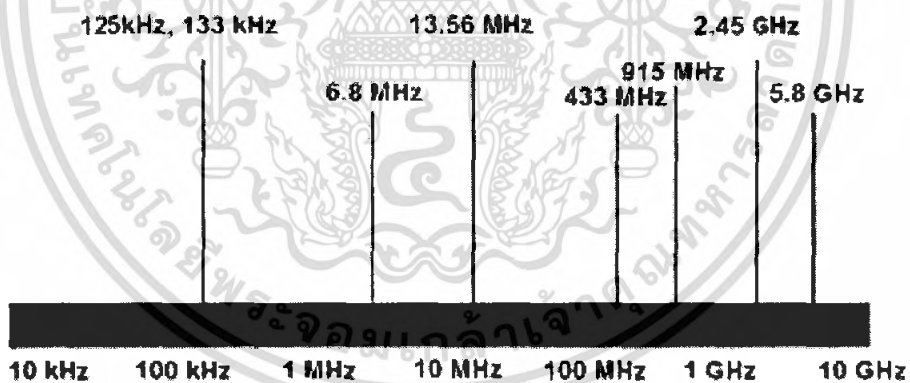
อย่างไรก็ตาม หลายองค์กรได้ตระหนักถึงปัญหาเรื่องมาตรฐานนี้ และได้เริ่มมีการพัฒนาระบบมาตรฐานขึ้นมาทั้งในยุโรปและอเมริกา ตัวอย่างเช่น

- หน่วยงาน ANSI's X3T6 ซึ่งประกอบไปด้วยผู้ผลิตและผู้ใช้งานระบบ RFID ในอเมริกาได้กำลังทำการพัฒนามาตรฐานของระบบ RFID ที่ความถี่ 2.45 GHz

- The International Organization for Standards : ISO ก็ได้มีมาตรฐานเกี่ยวกับการใช้ระบบ RFID กับงานปฐุสัตว์ออกมาแล้ว คือ ISO 11784 และ 11785

- The Electronic Product Code(EPC Global) เป็นองค์กรที่เกิดจากความร่วมมือระหว่าง The Uniform Code Council (UCC) และ EAN International โดยได้รับการสนับสนุนจากภาคอุตสาหกรรม ทำหน้าที่ในการกำหนด และพัฒนามาตรฐานรหัสของสินค้าอิเล็กทรอนิกส์และโครงข่ายมาตรฐาน EPC นี้เป็นมาตรฐานเปิด (Open standard) พัฒนาขึ้นโดย The Auto-ID Center ซึ่งได้รับทุนจากบริษัทขนาดใหญ่หลายบริษัท ได้แก่ บริษัท Coca-Cola , Intel , Wal-Mart และ Philips Semiconductors เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้ราคาของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ลดต่ำลงจนอยู่ในระดับที่สามารถนำFID ไปติดไว้กับสินค้ารายชิ้นได้

1.4 คลื่นพาที่ในระบบ RFID



รูปที่ 4 ความถี่ย่านที่ระบบ RFID ถูกใช้งาน

ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบ RFID จะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และ

การแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสารทั่วไป สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบ RFID อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ย่านความถี่ใช้งานหลัก ได้แก่

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) ใช้ความถี่ต่ำกว่า 150 kHz
- ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) ใช้ความถี่ 13.56 MHz
- ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) ใช้ความถี่ 433/868/915 MHz

การใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (LF ระยะอ่านประมาณ 10-20 เซนติเมตร และ HF ระยะอ่านประมาณ 1 เมตร) เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนย่านความถี่สูงยิ่ง จะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล (UHF ระยะอ่านประมาณ 1-10 เมตร) เช่น ระบบเก็บค่าบริการทางด่วน และในปัจจุบันระบบ RFID กำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz เพื่อใช้งานที่ต้องการระยะอ่านที่ไกลกว่า 10 เมตร เป็นต้น ดังรูปที่ 3 ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้ว RFID ซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุด และมีราคาแพงที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วน RFID ที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่จะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่น กันไป

1.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน RFID

ปัจจุบันการนำระบบ RFID มาประยุกต์ใช้งานหลากหลายประเภท เช่น

- Access Control/ Personal Identification หรือ การเข้า-ออกอาคาร แทนการใช้บัตรแม่เหล็ก เมื่อใช้งานมากๆ ก็จะเสื่อมเร็ว แต่บัตรแบบ RFID (Proximity Card) ใช้เพียงแตะหรือแสดงผ่านหน้าเครื่องอ่านเท่านั้น รวมทั้งยังสามารถใช้กับการเช็คเวลาเข้า-ออกงานของพนักงานด้วย

- ห่วงโซ่อุปทาน และระบบลอจิสติกส์ที่จะเห็นในโรงงานอนาคตคือ สามารถติด Tag ไว้กับชิ้นงานเมื่อชิ้นงานผ่านสายพานขนสินค้าในโรงงาน แต่ละแผนกจะรู้ว่าต้องทำอะไร ดิคอะไรบ้าง และต้องส่งไปที่ไหนต่อ รวมถึงการจัดการสินค้าในคลังสินค้าว่ารับสินค้านามาเมื่อใด จะต้องเก็บไว้ที่ไหน จะส่งไปที่ไหนอย่างไร ใครจะมารับ ส่วนภาพที่ผู้บริโภคจะเห็น คือ การซื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สินค้าในซูเปอร์มาร์เก็ต เวลาซื้อก็หยิบใส่ตะกร้า คิดเงินผ่านเครื่องอ่าน RFID ครั่งเดียวคิดเงินได้ทันที ไม่ต้องหยิบมายิงบาร์โค้ดทีละชิ้นให้เสียเวลาและเดือนผู้ซื้อได้หากสินค้าที่ซื้อหมดอายุ

• ระบบ Animal Tracking มาใช้ เหมาะกับเกษตรกรไทยในการพัฒนาด้านปศุสัตว์ให้เป็นระบบฟาร์ม ออโต-เมชันด้วยชิป RFID ติดตัวสัตว์เลี้ยง ทำให้สามารถทราบเจ้าของตรวจสอบสายพันธุ์ การให้อาหารและการควบคุมโรคติดต่อในสัตว์ รวมถึงการสร้าง Food Traceability สำหรับต่อสู้กับข้อกีดกันทางการค้าของสหรัฐอเมริกา และกลุ่มสหภาพยุโรปที่อยู่ระหว่างตัดสินใจว่าผู้ส่งออกสินค้าเนื้อสัตว์ชำแหละ

- ระบบตั๋วอิเล็กทรอนิกส์ (e-ticket) เช่น บัตรทางด่วนบัตรรถไฟฟ้าใต้ดิน
- ระบบหนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์ (e-Passport) ที่ทางประเทศสหรัฐกำลังกำหนดมาตรฐานการเข้าออกของประเทศของเค้า เพื่อป้องกันผู้ก่อการร้าย รวมไปถึง e-Citizen ด้วย
- ระบบกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ (immobilizer) ในรถยนต์ป้องกันกุญแจในการขโมยรถยนต์ หรือ พวก Keyless ในรถยนต์ราคาแพงบางรุ่นก็เริ่มนำมาใช้งานแล้ว
- ระบบห้องสมุดดิจิทัล (e-Library) ในการยืมคืนอัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้บริการได้รวดเร็วและสะดวก-สบายยิ่งขึ้น



รูปที่ 5 การประยุกต์ใช้งาน RFID ในงานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

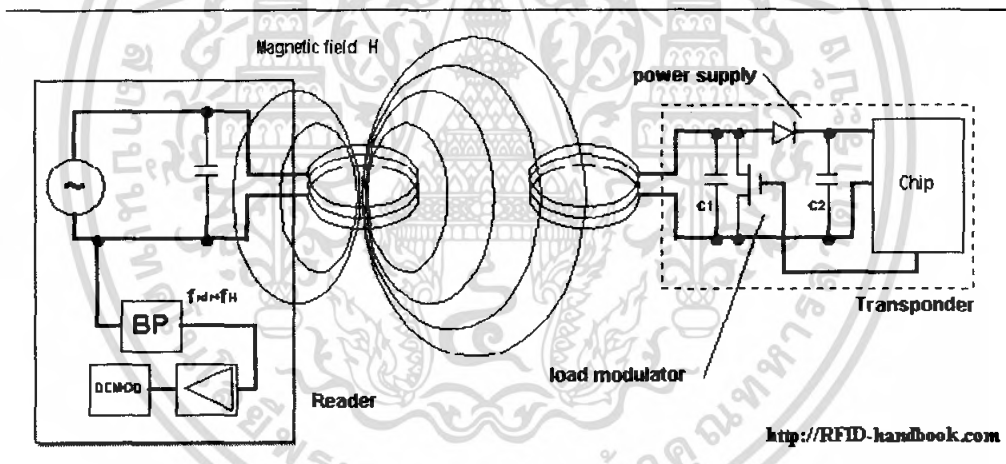
ทฤษฎี

2.1 ส่วนประกอบของระบบ RFID

ในระบบ RFID จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ

ส่วนที่หนึ่ง : ทรานสปอนเดอร์หรือแท็ก (Transponder/Tag) ที่ใช้ติดกับวัตถุต่าง ๆ ที่เราต้องการ โดยแท็กที่ว่านี้จะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้นๆ เอาไว้

ส่วนที่สอง: เครื่องสำหรับอ่าน/เขียนข้อมูลภายในแท็ก (Interrogator/Reader) ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 6 ส่วนประกอบหลักของระบบ RFID

ถ้าจะเปรียบเทียบระบบ RFID นี้กับระบบบาร์โค้ด สามารถอธิบายได้ว่า แท็กในระบบ RFID ก็คือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านในระบบ RFID ก็คือ เครื่องอ่านบาร์โค้ด (Scanner) โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบ คือ ระบบ RFID จะใช้คลื่นวิทยุในการอ่าน/เขียน ส่วนระบบรหัสแท่งจะใช้แสงเลเซอร์ โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือ หลักการอ่านเป็นการใช้แสงในการอ่านแท็กบาร์โค้ด ซึ่งจะต้องอ่านแท็กในขณะที่ไม่มีวัตถุมาบังหรือจะต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงมาจากเครื่องสแกน และอ่านได้ทีละแท็กในระยะใกล้ๆ แต่ระบบ RFID จะแตกต่างโดยสามารถอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็กหรือแท็กนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุ และไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับคลื่น เพียงอยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้ และการอ่านแท็กในระบบ RFID ยังสามารถอ่านได้หลายๆ แท็กในเวลาเดียวกัน โดยระยะอ่านข้อมูลได้ไกลกว่าระบบบาร์โค้ดอีกด้วย

2.1.1 แท็ก(Tag)



รูปที่ 7 โครงสร้างภายในของแท็ก

โครงสร้างภายในของแท็กจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna) สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ และสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิพที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ เช่น รหัสสินค้า โดยทั่วไปตัวแท็กอาจอยู่ทั้งในชนิดที่เป็นกระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่างๆ กันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาไปติดและมีหลายรูปแบบ เช่น ขนาดเท่าบัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า เป็นต้น ดังรูป แต่โดยหลักการอาจแบ่งแท็กที่มีการใช้งานกันอยู่ 2 ประเภทใหญ่ๆ แต่ละชนิดก็จะมีความแตกต่างกันในแง่ของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงานอยู่ ซึ่งจะขอกล่าวอธิบายเป็นหัวข้อดังนี้

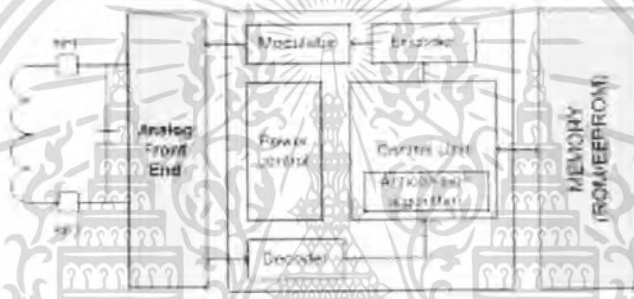
Passive RFID Tags

แท็กชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใดๆ เพราะภายในแท็กจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กเป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนักระยะอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ปกติแท็กชนิดนี้ราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

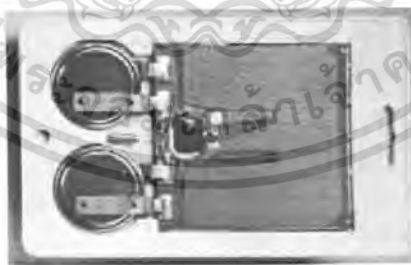
มักจะมีหน่วยความจำขนาดเล็กโดยทั่วไปประมาณ 16 ถึง 1024 ไบต์ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ราคาต่อหน่วยต่ำ

ไอซีของแท็กชนิดพาสซีฟที่มีการผลิตออกมา จะมีทั้งขนาดและรูปร่างเป็นแท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่ต่างกัน ส่วนโครงสร้างภายในที่เป็นไอซีของแท็กนั้น ก็ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนควบคุมการทำงานของภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุ (Analog Front -End) ส่วนควบคุมลอจิก (Digital Control Unit) ส่วนของหน่วยความจำ(Memory) ซึ่งอาจจะเป็นแบบ ROM หรือ EEPROM ดังรูป



รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของ Passive tag

Active RFID Tags



รูปที่ 9 Active Tag ที่มีแบตเตอรี่ Lithium 2 ก้อนอยู่ภายนอก

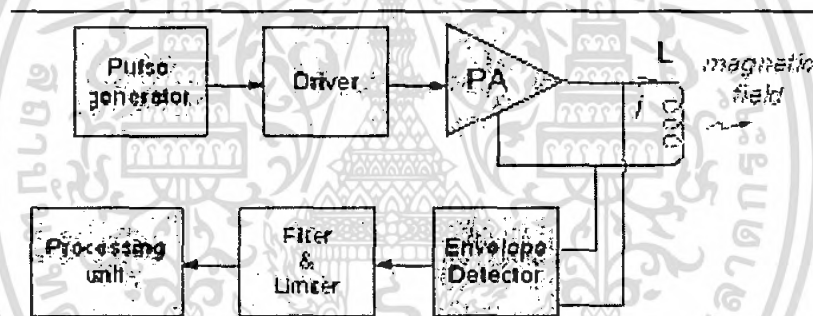
แท็กชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในทำงาน แท็กชนิดนี้มีหน่วยความจำภายในได้ใหญ่ถึง 1 เมกะไบต์ และสามารถอ่านได้ในระยะไกลสูงสุดประมาณ 10 เมตร แม้ว่าแท็กจะมีข้อดีอยู่หลายข้อแต่ก็มีข้อเสียด้วยเช่นกัน คือ มีราคาต่อหน่วยแพง ขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีระยะเวลาในการทำงานที่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการแบ่งจากชนิดที่ว่ามาแล้วแท็กก็ยังคงถูกแบ่งประเภทจากรูปแบบในการใช้งานได้เป็น 3 แบบที่สามารถถูกอ่านและเขียนข้อมูลได้อย่างอิสระ (Read-Write), แบบเขียนได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นแต่อ่านได้อย่างอิสระ (Write-Once Read-Many หรือ WORM) และแบบอ่านได้เพียงอย่างเดียว (Read-Only) ด้วย

2.1.2 เครื่องอ่าน (Reader)

โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านก็คือ การเชื่อมต่อเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลลงในแท็กด้วยความถี่วิทยุภายในเครื่องอ่านจะประกอบด้วย เสาอากาศที่ทำจากลวดทองแดงเพื่อใช้รับส่งสัญญาณภาครับและภาคส่งสัญญาณวิทยุและวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูล จำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ดังรูป



รูปที่ 10 โครงสร้างภายในของ Reader

โดยทั่วไปเครื่องอ่านจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ
- ภาคสร้างสัญญาณพาหะ
- ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ
- ส่วนประมวลผลข้อมูล และภาคติดต่อกับคอมพิวเตอร์

หน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรมจะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับและทำหน้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง จนถึงขนาดใหญ่เท่าประตู เป็นต้น



รูปที่ 11 ตัวอย่างเครื่องอ่านแบบต่างๆ

2.1.3 ขั้นตอนการทำงานระหว่างเครื่องอ่านกับแท็ก

1. ตัวเครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณวิทยุอย่างต่อเนื่องหรือเป็นจังหวะ และรอคอยสัญญาณตอบจากตัวแท็ก
2. เมื่อแท็กได้รับสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากเครื่องอ่านในระดับที่เพียงพอ ก็จะทำเหม็นยวนำเพื่อสร้างพลังงานป้อนให้แท็กทำงาน โดยแท็กจะสร้างสัญญาณนาฬิกาเพื่อกระตุ้นให้วงจรภาคดิจิทัลในแท็กทำงาน
3. วงจรภาคดิจิทัลจะไปอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำภายในและเข้ารหัสข้อมูลแล้วส่งไปยังภาคอนาล็อกที่ทำหน้าที่มอดูเลตข้อมูล
4. ข้อมูลที่ถูกมอดูเลตจะถูกส่งไปส่งขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ เพื่อส่งไปยังเครื่องอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องอ่านจะสามารถตรวจจับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด (Envelope Detector) และใช้พีค ดีเทกเตอร์ (Peak Detector) ในการแปลงสัญญาณข้อมูลที่มีมอดูเลตแล้วจากแท็ก
6. เครื่องอ่านจะถอดรหัสข้อมูลและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรมต่อไป

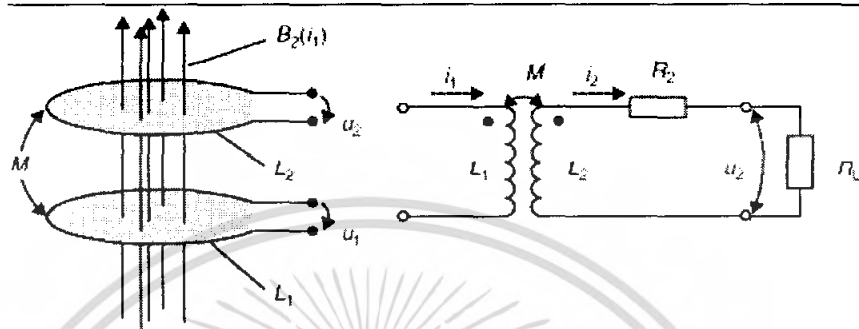
2.2 หลักการทำงานของ RFID



โดยมากเทคนิคในการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านและแท็กจะใช้หลักการมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM) หรือ ใช้การมอดูเลตทางแอมพลิจูดบวกกับการเข้ารหัสแบบแมนเชสเตอร์ (Manchester encoded AM) แต่ทว่าในปัจจุบันก็มีแท็กที่ใช้การมอดูเลตแบบอื่นๆ ด้วย เช่น การมอดูเลชันแบบเฟสชิฟต์คีย์อิง (Phase Shift Keying: PSK) , ฟรีควเอนซ์ชิฟต์คีย์อิง (Frequency Shift Keying: FSK) หรือการใช้การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation: FM) ดังรูปที่ 12

ในการรับส่งข้อมูลหรือสัญญาณวิทยุระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเมื่อสายอากาศมีความยาวที่เหมาะสมกับความถี่พาหะที่ใช้งาน เช่น เมื่อความถี่ใช้งานเป็น 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ ความยาวของเสาอากาศ (เป็นเส้นตรง) ที่เหมาะสมก็คือ 22.12 เมตรแน่นอนว่าในทางปฏิบัติเราคงไม่สามารถนำเสาอากาศที่ใหญ่ขนาดนั้นมาใช้งานกับแท็กขนาดเล็กของเราได้ สายอากาศที่ดูเหมาะสมจะใช้ร่วมกับแท็กมากที่สุดก็คือสายอากาศที่เป็นขดลวดขนาดเล็กหรือที่มีชื่ออย่างเป็นทางการว่าสายอากาศแบบแมกเนติกไดโพล (magnetic dipole antenna) รูปแบบของสายอากาศแบบนี้จะมีอยู่หลากหลาย ทั้งแบบที่เป็นขดลวดพันบนแกน อากาศหรือแกนเฟอร์ไรต์ แบบที่เป็นวงรูปที่ทำขึ้นจากสายทองแดง บนแผ่นวงจรพิมพ์ทั้งที่เป็นรูปแบบวงกลมและเอกซารันเป็นเอกซารันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยม ทั้งนี้ความเหมาะสมในการใช้งานก็แตกต่างกันไปตามความถี่พาหะ และประเภทของงานด้วยเช่นกัน



รูปที่ 13 รูปตัวนำที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก (ขวา) แสดงวงจรที่สมมูลกับรูปทางซ้ายมือ

นอกจากการรับส่งข้อมูลแล้วสายอากาศก็ยังทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับแท็กด้วย โดยอาศัยหลักการทำงานตามแนวคิดของไมเคิล ฟาราเดย์ เรื่องแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็ก (จากเครื่องอ่าน) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time-varying magnetic field) พุ่งผ่านสายอากาศของแท็กเมื่อแท็กและเครื่องอ่านตั้งอยู่ห่างกันในระยะ 0.16 เมตรของความยาวคลื่นพาหะที่ใช้เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า transformer-type coupling ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเดียวกับการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิ(primary) และขดลวดทุติยภูมิ (secondary) ในหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) จะเป็นวงจรพื้นฐานสำหรับอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นในการส่งข้อมูลของแท็ก

2.3 การเข้ารหัส (Coding)

สัญญาณ PCM(Pulse Code Modulation) ที่ได้จะประกอบด้วยกลุ่มข้อมูลของ “1” และ “0” ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปนีสื่อสัญญาณต่างๆ และเพื่อให้ข้อมูลนี้สามารถส่งไปถึงปลายทางได้อย่างถูกต้อง

จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนรูปของสัญญาณ PCM ที่ได้ให้มีรูปแบบที่เหมาะสมก่อนจึงจะส่งไปในีสื่อสัญญาณต่างๆ ได้ ซึ่งรูปแบบแต่ละรูปแบบเราเรียกว่า Line Code (หรือการเข้ารหัสทางสาย

ส่ง) โดยมี Code Conversion ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณ PCM ให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการ และมีหลักในการกำหนด Line Code ดังนี้

1. สัญญาณนั้นจะต้องไม่มีส่วนประกอบของสัญญาณไฟตรง(DC) ตลอดเวลาหรือเป็นช่วงเวลานาน เพราะสัญญาณไฟตรงไม่สามารถผ่านอุปกรณ์พวก Capacitor หรือ Transfotmer ซึ่งมีไว้อยู่ในวงจรส่วนต่างๆ ได้

2. พลังงานที่ความถี่ต่ำจะต้องมีค่าน้อย เนื่องจากจะทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ในส่วนของวงจร Equalization

3. สามารถซิงโครไนซ์ได้เอง(Self-synchronization) หมายถึงการที่ลำดับหรือชุดของสัญญาณที่รับได้มีข่าวสารของสัญญาณนาฬิกาที่เพียงพอผนวกมาพร้อมกับข่าวสารของบิตข้อมูล

4. ความน่าจะเป็นที่เกิดความผิดพลาดบิตต่ำ (low probability of bit error) คือ สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี

5. สัญญาณ Code นั้นจะต้องมีเพียง Code เดียวเพื่อไม่ให้เกิดความคลุมเครือที่ตะทำให้การ Decode แปลงค่าผิดไป

5. ต้องใช้ Bandwidth ในการส่งสัญญาณนั้นน้อยที่สุด และในขณะเดียวกันสเปกตรัมของสัญญาณนั้นจะต้องมีรูปลักษณะที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณด้วย(a spectrum that is suitable for the channel)

6. จะต้องมีกรตรวจจับหรือแก้ไขข้อผิดพลาดจากการส่งได้ (Error Detection and Correction)

7. ทรานส์พารেন্টซี (transparency) หมายถึงคุณสมบัติที่ระบบสามารถรับส่งชุดบิตที่มีรูปแบบใดก็ได้โดยไม่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ

สำหรับ Line Code ที่พบบ่อยและเป็นที่ยอมรับใช้ก็คือ NRZ และ Manchester Coding ซึ่งมีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

- Non Return to Zero: NRZ การทำไลน์โค้ดแบบ NRZ จะพบว่าภายในช่วงเวลาของแต่ละบิต รูปสัญญาณจะไม่มี การเปลี่ยนระดับไปสู่ค่าศูนย์โวลต์ ซึ่งต่างกับการทำไลน์โค้ดแบบ RZ หรือ Return to Zero ซึ่งลักษณะรูปสัญญาณจะมีการเปลี่ยนระดับไปสู่ค่าศูนย์โวลต์ทุกๆ บิต มีข้อดีคือสัญญาณพัลส์ที่ส่งออกจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างแน่นอน ซึ่งนับเป็นปัจจัยสำคัญในการจะช่วยให้การซิงโครไนซ์สัญญาณ ณ ภาครับทำได้โดยตรงจากสัญญาณที่รับมาได้ เพราะสัญญาณที่รับมาได้นั้นมีทั้งสัญญาณนาฬิกา รวมอยู่กับสัญญาณข้อมูลแล้ว แต่ขนาดของแบนด์วิดท์ที่ต้องใช้ใน

การส่งสัญญาณก็จำเป็นต้องใช้ขนาดที่กว้างกว่าใช้ไลน์โค้ดแบบ NRZ ดังนั้นการจะเลือกใช้ไลน์โค้ดแบบใดจึงต้องมีการพิจารณาคุณสมบัติหลายประการประกอบกัน

- **Manchester** เป็นการเข้ารหัสข้อมูลดิจิทัลวิธีหนึ่ง ก่อนที่ข้อมูลซึ่งผ่านการเข้ารหัสแล้วจะถูกส่งไปมอดูเลต เพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการซิงโครไนซ์ของข้อมูล เนื่องจากการส่งกระจายสัญญาณตาม

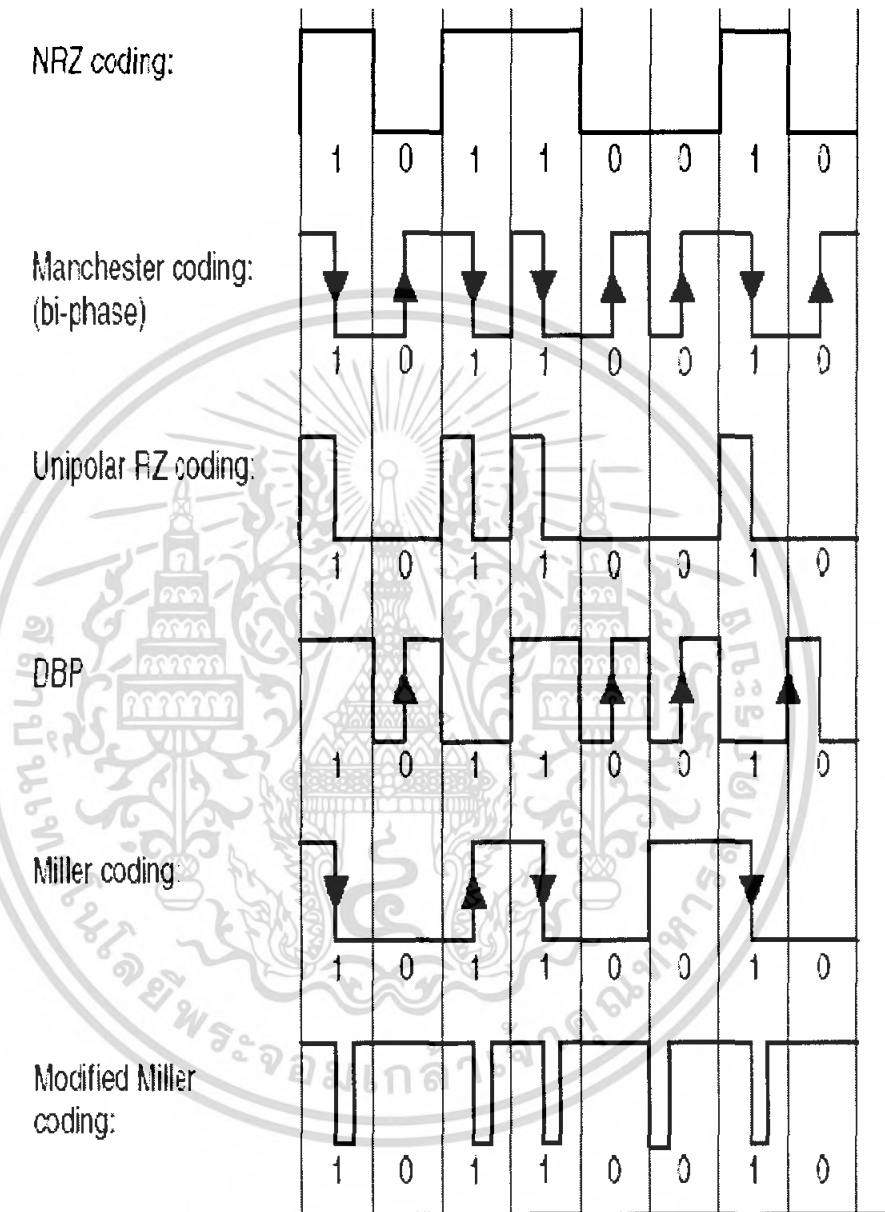
ปกติหากมีการส่งสัญญาณดิจิทัลในระดับเดียวกันเป็นช่วงยาว เช่น ส่งสัญญาณดิจิทัลที่มีค่าลอจิกเป็น 1 ออกไป 20 บิตติดต่อกัน จะทำให้การซิงโครไนซ์ของข้อมูลเกิดการคลาดเคลื่อน (โดยปกติวงจรดิจิทัลจะปรับการซิงโครไนซ์ของข้อมูลได้เฉพาะในช่วงที่มีการเปลี่ยนระดับของข้อมูลจาก 1 เป็น 0 หรือ จาก 0 เป็น 1) และทำให้รับข้อมูลผิดพลาดเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงจะต้องมีการนำสัญญาณดิจิทัลปกติไปผ่านเข้ารหัสเสียก่อน โดยการเข้ารหัสแบบแมนเชสเตอร์ จะเปลี่ยนให้สัญญาณดิจิทัลลอจิก 0 ถูกแทนด้วยการเปลี่ยนค่าจากลอจิก 1 เป็น 0 และสัญญาณดิจิทัลลอจิก 1 แทนด้วยการเปลี่ยนค่าจากลอจิก 0 เป็น 1 ข้อดีของการเข้ารหัสแบบนี้ก็คือทำให้การเปลี่ยนระดับของข้อมูลทุกๆ ครั้งเป็นไปอย่างแน่นอน หรือเกิดการเข้าจังหวะ (synchronize) กันของข้อมูลนั่นเอง แต่ว่าการเข้ารหัสแบบนี้ก็มีข้อเสียอยู่กล่าวคือช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลต้องเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า

เมื่อพิจารณาการกระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของไลน์โค้ด แต่ละประเภทอธิบายได้ดังรูปที่ 15

1. ไลน์โค้ด Unipolar NRZ: จัดว่ามีองค์ประกอบของกระแสตรงอยู่ในสัดส่วนที่สูงมาก และพลังงานของสัญญาณส่วนที่เหลือกระจายอยู่ในช่วงความถี่ [0-R]
2. ไลน์โค้ด Polar NRZ: ความหนาแน่นกำลังของถี่ว่ามีองค์ประกอบของกระแสตรงอยู่บ้างแต่ด้วยสัดส่วนที่น้อยมาก และพลังงานส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่ที่ความถี่ [0-R]
3. ไลน์โค้ดแบบ Unipolar RZ: มีลักษณะการกระจายกำลังงานที่คล้ายกับ Unipolar NRZ เพียงแต่มีความหนาแน่นของสเปกตรัมกว้างขึ้นอีกเท่าตัวเมื่อเทียบกับ NRZ
4. ไลน์โค้ดแบบ Bipolar RZ: แม้ว่าจะมีการกระจายกำลังงานส่วนใหญ่อยู่ที่ [0-R] เช่นเดียวกับ 2 กรณีแรก แต่สิ่งที่น่าสังเกตคือ ไลน์โค้ดชนิดนี้ไม่มีองค์ประกอบของไฟตรงปนอยู่เลย
5. ไลน์โค้ด Manchester: การกระจายตัวของพลังงานครอบคลุมช่วงความถี่ [0-2R] ซึ่งหมายความว่าไลน์โค้ด Manchester มีความต้องการ Bandwidth ในการส่งที่กว้างกว่าไลน์โค้ดชนิดอื่นเท่าตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานการทำ line code มีหลายลักษณะ ดังนี้

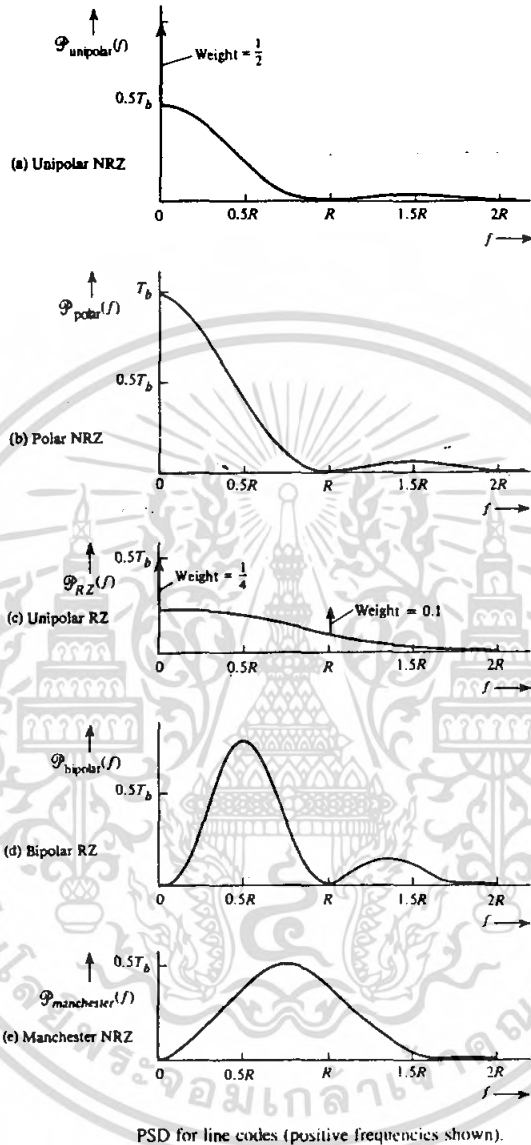


รูปที่ 14 การเข้ารหัสแบบต่างๆ

83004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Baseband Pulse and Digital Signaling



รูปที่ 15 การกระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของไลน์โค้ดชนิดต่างๆ

2.4 การผสมข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital Modulation Procedure)

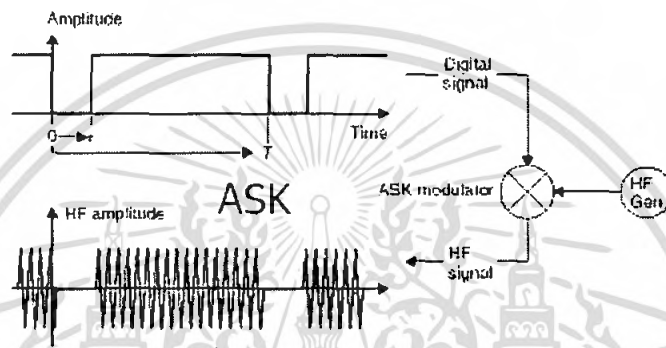
เนื่องจากหลักการพื้นฐานของ RFID คือใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสื่อสารรับส่งข้อมูล ดังนั้นก่อนการสื่อสารจะต้องมีกระบวนการผสมข้อมูลที่เข้ารหัสไว้แล้วไปกับคลื่นพาหะ (Modulation) แต่เนื่องจากลักษณะข้อมูลเป็นดิจิทัลจึงต้องใช้วิธีการผสมแบบดิจิทัลซึ่งจะแตกต่าง

จากการผสมแบบอนาล็อกที่ใช้กันอยู่หลายระบบในปัจจุบันเช่น FM และ AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผสมข้อมูลแบบคิจิตอล คือ กระบวนการแปลงข้อมูลคิจิตอลที่อยู่ในรูป 0 และ 1 ให้ได้เป็นสัญญาณที่มีรูปลักษณะเหมาะสมกับการส่งผ่านช่องสัญญาณ โดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการส่ง สัญญาณที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นสัญญาณไซน์ซอซอด์ และเราเรียกสัญญาณนี้ว่า คลื่นพาห้ (Carrier) การมอดูเลตสัญญาณข่าวสารคิจิตอลลงบนคลื่นพาห้สามารถกระทำได้ 3 วิธีดังนี้

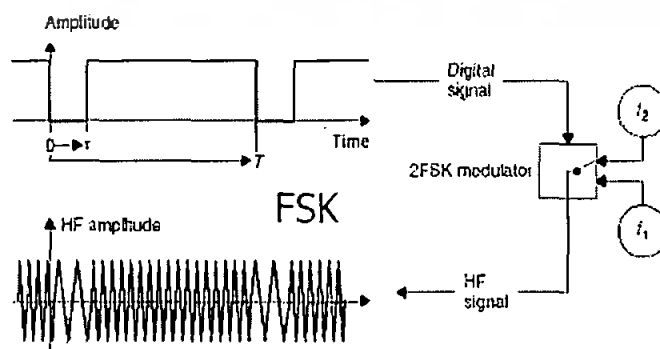
2.4.1 Amplitude Shift Keying (ASK)



รูปที่ 16 การมอดูเลตเชิงขนาด (ASK)

เป็นการผสมข้อมูลโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของยอดคลื่นพาห้ (Amplitude) ไปตามค่าของข้อมูลคิจิตอลที่ป้อนเข้ามา โดยกำหนดให้แอมพลิจูดของคลื่นพาห้มีค่าเป็นศูนย์เพื่อแทนบิตข้อมูลที่เป็น 0 ซึ่งเทียบได้กับการไม่ส่งสัญญาณ และจะส่งสัญญาณไซน์ซอซอด์ที่มีแอมพลิจูดไม่เป็นศูนย์เพื่อแทนบิตข้อมูลที่มีค่าเป็น 1 ในกรณีเฉพาะแบบนี้จะเรียกรวมวิธีการมอดูเลตแบบนี้ในอีกชื่อหนึ่งว่า ออนออฟคิย็อง (OOK : on-off keying)

2.4.2 Frequency Shift Keying (FSK)

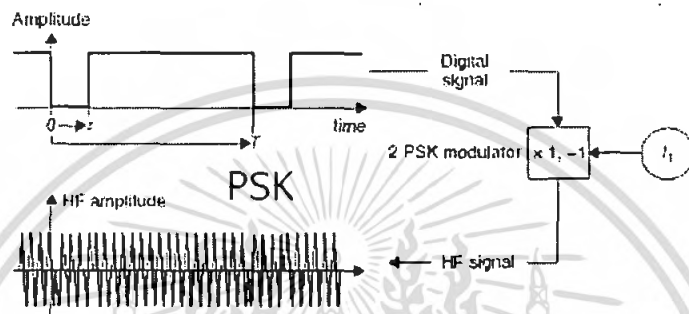


รูปที่ 17 การมอดูเลตเชิงความถี่ (FSK)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์ที่ใช้จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาห์ระหว่าง 2 ความถี่ขึ้นอยู่กับสถานะของข้อมูล 0 กับ 1 โดยความถี่สูงใช้แทนข้อมูลดิจิทัลที่มีค่าเป็น 1 และความถี่ต่ำใช้แทนข้อมูลที่เป็น 0

2.4.3 Phase Shift Keying (PSK)



รูปที่ 18 การมอดูเลตเชิงเฟส (PSK)

วิธีนี้แอมพลิจูดและความถี่ของคลื่นพาห์จะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ส่วนที่เปลี่ยนไปตามข้อมูลดิจิทัล 0 หรือ 1 คือ เฟส กล่าวคือถ้าบิตข้อมูลที่จะส่งมีค่าเป็น 0 ระบบจะส่งคลื่นพาห์ที่มีเฟสตามที่กำหนดค่าหนึ่ง และถ้าบิตข้อมูลมีค่าเป็น 1 ระบบจะส่งคลื่นที่ต่างไปจากกรณีแรก โดยทั่วไปถ้าเราต้องการให้ได้ระบบที่มีสมรรถนะดีก็มักจะเลือกเฟสทั้งสองให้มีค่าต่างกัน 180 องศา ดังรูปที่ 17

2.5 การสื่อสารแบบไร้สาย

การสื่อสารข้อมูลของระบบการชี้เฉพาะโดยคลื่นความถี่วิทยุ คือระหว่างเครื่องลูกข่ายและตัวอ่านข้อมูล จะสื่อสารแบบไร้สายผ่านอากาศ โดยจะนำข้อมูลมาทำการมอดูเลต กับคลื่นพาห์ที่เป็นคลื่นความถี่วิทยุโดยมีสายอากาศ (Antenna) ที่อยู่ในตัวอ่านข้อมูลเป็นตัวรับและส่งคลื่นซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive Coupling หรือ Proximity Electromagnetic) กับ วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Propagation Coupling) ดังรูปที่ 18

แม่เหล็กไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยอาจแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสี่ ปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า "Multi-path Attenuation" ซึ่งจะส่งผลให้ระยะการรับส่งข้อมูลสั้นลง หรือแม้กระทั่งความชื้นในอากาศก็อาจมีผลในกรณีที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นการนำระบบการชี้เฉพาะโดยคลื่นความถี่วิทยุ ไปใช้งานก็ควรมีการคำนึงถึงสภาพแวดล้อม เพราะจะมีผลกระทบกับระยะการรับส่งข้อมูล และพยายามติดตั้งระบบให้ห่างไกลจากโลหะ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

กำลังส่งของเครื่องลูกข่ายที่จะส่งกลับมายังตัวอ่านข้อมูลนั้น โดยทั่วไปจะมีกำลังที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับกำลังส่งของ ตัวอ่านข้อมูล ดังนั้นความไวในการตรวจจับสัญญาณของตัวอ่านข้อมูล ก็เป็นอีกจุดหนึ่งที่ต้องพิจารณา

	LF	HF	UHF	Microwave
Freq -Range	125-134 kHz	13.56 MHz	866-915 MHz	2.45-5.8 GHz
Read Range	10 cm	1 M	2-7 M	1M
Market share	74%	17%	6%	3%
Coupling	Magnetic	Magnetic	Electro Magnetic	ElectroMagnetic
Existilng Standard	11784/85,14223	18000-3.1,15693, 14443A,B and C	EPC CO,C1,C1G2, 18000-6	18000-4
Application	Smart Card, Ticketing, Animal tagging, Access, Laundry	Small item management, Supply chain, Anti-theft, Library, transportation	Transportation Vehicle ID, Access/Security, Large item management, Supply chain	Transportation vehicle ID(road toll), Access/Security, Large item management, Supply chain

ตารางที่ 2.1 ความถี่มาตรฐานกับ RFID tags แบบ ต่างๆ ที่มา : "RFID Overview", Greg Leeming, Intel Corporation, 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

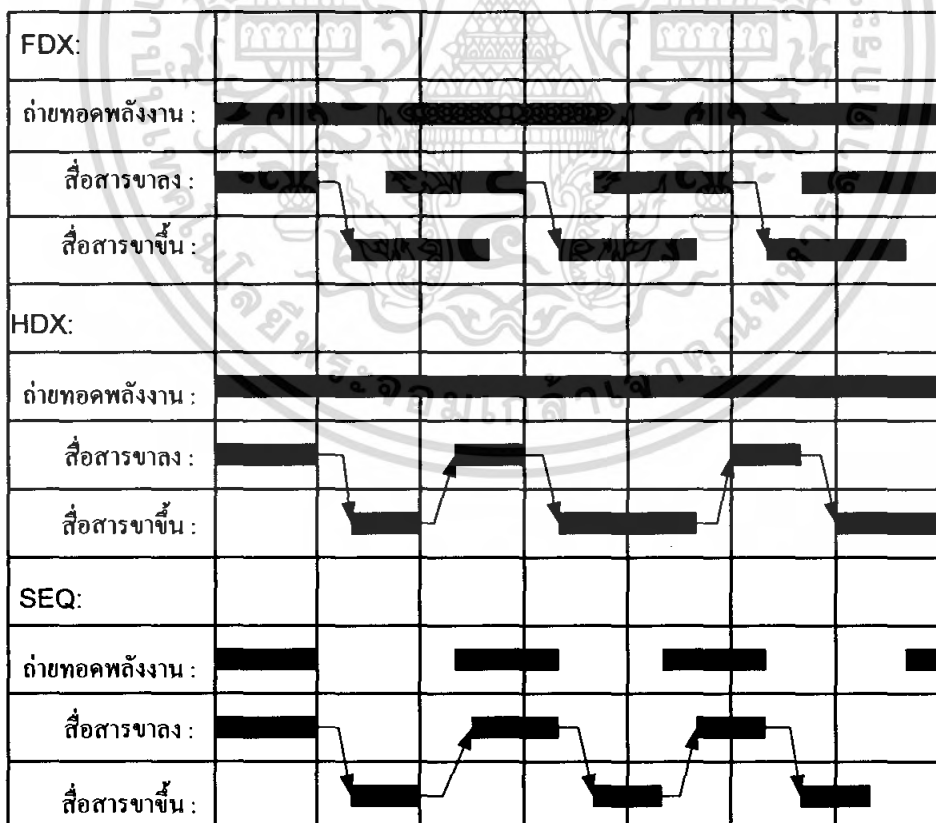
2.8 รูปแบบการรับส่งข้อมูลโดยใช้ความถี่คลื่นวิทยุ

รูปแบบการรับส่งข้อมูล โดยการใช้คลื่นวิทยุสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.8.1 การสื่อสารแบบ Full Duplex : แบบ Full Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องลูกข่ายได้ตลอดเวลา การส่งข้อมูลจากเครื่องอ่านไปยังเครื่องลูกข่าย (Downlink) และการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายกลับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด

2.8.2 การสื่อสารแบบ Half Duplex : แบบ Half Duplex แม้ว่าเครื่องอ่านจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับเครื่องลูกข่ายตลอดเวลา แต่ก็ต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดกันรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย

2.8.3 การสื่อสารแบบ Sequential : แบบ Sequential นั้น จะมีการจำกัดเวลาในการส่งพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอ่านไฟให้เครื่องลูกข่ายในลักษณะพัลส์ (Pulse) หรือก้อนพลังงานที่ส่งออกในแต่ละช่วงเวลาและใช้การปรากฏขึ้นของพลังงานไฟฟ้าหรือพัลส์เป็นสัญญาณกำหนดให้มีการส่งข้อมูล(Downlink)ส่วนช่วงที่ไม่มีพลังงานปรากฏอยู่จะเป็นการส่งสัญญาณ (Uplink)



รูปที่ 20 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex, Half Duplex และ Sequential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เทคโนโลยี RFID ที่ใช้การสื่อสารแบบ Duplexing

มาตรฐานการสื่อสาร RFID แบบ Duplexing ซึ่งสามารถจำแนกตามรูปแบบการทำงานได้ 4 ประเภท อันได้แก่เทคโนโลยีแบบ Inductive Coupling, Electromagnetic backscatter Coupling, Close Coupling และเทคโนโลยี Electrical Coupling ซึ่งจะขอกล่าวเฉพาะเทคโนโลยีแบบ Inductive Coupling

เทคโนโลยี แบบ Inductive Coupling

เป็นมาตรฐานที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำทางคลื่นแม่เหล็ก โครงสร้างของเครื่องลูกข่ายประกอบไปด้วยแผงวงจรหรือชิปที่ใช้เก็บข้อมูลต่างๆ โดยมีขดลวดพื้นที่กว้างทำหน้าที่เป็นสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ ทั้งนี้จะกล่าวถึงเทคนิคในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องลูกข่ายเพื่อเลี้ยงให้อุปกรณ์ชิปสามารถทำงานได้ก่อนจะกล่าวถึงเทคนิคที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล

การส่งพลังงานจากเครื่องอ่าน

เนื่องจากการทำงานของเครื่องลูกข่ายนั้นเป็นแบบพาสซีฟ (Passive operation) กล่าวคือไม่มีแหล่งพลังงานภายในเป็นของตนเอง จึงจำเป็นต้องรับพลังงาน (Energy) มาจากเครื่องอ่านโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่าน (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและพลังงานไปในตัว) ให้สามารถส่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำลังสูงสามารถตกกระทบขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศของเครื่องลูกข่ายได้อย่างเหมาะสม

ประกอบทั้งความยาวคลื่นของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งกระจายออกมาจากเครื่องอ่านนี้มีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่าน ซึ่งโดยทั่วไปมักจะห่างกันในหลักไม้มากนัก ในขณะที่เทคโนโลยี RFID แบบ Inductive Coupling ส่วนใหญ่ใช้ความถี่ต่ำเพียง 135 กิโลเฮิร์ตซ์หรืออาจจะต่ำกว่า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีความยาวคลื่นสูงมากถึง 2,400 เมตร แม้ในบางระบบที่ความถี่ใช้ความถี่สูงในย่าน 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ ก็ยังกำหนดคลื่นสัญญาณที่มีความยาวคลื่นถึง 22.1 เมตร จึงไม่มีปัญหาในเรื่องของความยาวคลื่นที่สั้นเกินไปจนเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนหรือถูกกลทอนจากผนังอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ หากพิจารณาถึงพื้นที่ใช้งานโดยทั่วไปที่มีได้ไกลหรือกว้างใหญ่มากนัก

สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะตกกระทบขดลวดสายอากาศของเครื่องลูกข่ายก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขนาดอ่อนๆ ขึ้นบนขดลวดดังกล่าว ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกนำไปเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเรกติไฟร์โดยตัวเก็บประจุและไดโอดเพื่อกรองให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนให้กับอุปกรณ์ชิป ทั้งนี้หัวใจของการออกแบบอยู่ที่การเลือกค่าของตัวเก็บประจุ C1 ซึ่งจะต้องมีค่าสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด L เพื่อให้สามารถกำหนดค่าความถี่กำทอน (Resonance Frequency) ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่านเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องลูกข่าย

สิ่งที่ผู้ออกแบบอุปกรณ์เครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย RFID แบบ Inductive Coupling ให้ความสำคัญมากที่สุดก็คือ การออกแบบขดลวดทั้งที่เครื่องอ่านและเครื่องลูกข่ายให้สามารถถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าให้แก่กันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด หากจินตนาการเปรียบเทียบการถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้งสองมิได้พันอยู่บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน กลับกลายเป็นใช้อากาศซึ่งมีคุณสมบัติในการนำพาสัญญาณที่เลวร้ายกว่าแกนแม่เหล็กมากๆ

ดังนั้นในการออกแบบระบบแบบ Inductive Coupling ให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายทอดพลังงานให้มากที่สุดจึงต้องเน้นไปที่ย่านความถี่ที่เหมาะสมต่อการส่งกระจายพลังงาน จำนวนรอบของขดลวดที่เครื่องอ่าน พื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่เครื่องลูกข่าย มุมติดตั้ง และระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย

เมื่อความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารมีค่าสูงมากขึ้น จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องใช้สำหรับขดลวดสายอากาศของเครื่องลูกข่ายจะมีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงใช้จำนวนรอบในการพันลดลงเช่นกัน ตัวอย่างเช่น หากใช้งานที่ความถี่ย่าน 135 กิโลเฮิร์ตซ์ จะต้องมีการพันขดลวดอากาศที่เครื่องลูกข่ายในช่วง 100-1,000 รอบ แต่หากเพิ่มความถี่ในการใช้งานเป็น 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ ก็จะสามารถลดจำนวนรอบของขดลวดจะเหลือเพียง 3-10 รอบเท่านั้น

2.10 ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบสายอากาศ

2.10.1 กระแสและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากกฎของแอมแปร์เมื่อกระแสจะไหลในตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆตัวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะผลิตจากกระแสในตัวอุปกรณ์ ดังในรูปที่ 20 พิจารณานตัวนำวงกลมที่มีความยาวจำกัด

$$\beta_{\phi} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (\text{Weber/m}^2) \quad (2.10.1a)$$

โดยที่

I = กระแส

r = ระยะทางจากศูนย์กลางของลวดตัวนำ

μ_0 = ค่าความซึมซับทางแม่เหล็กของอากาศ = $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากรณีที่ลวดตัวนำมีความยาวเป็นค่าอนันต์จะต้องแทน

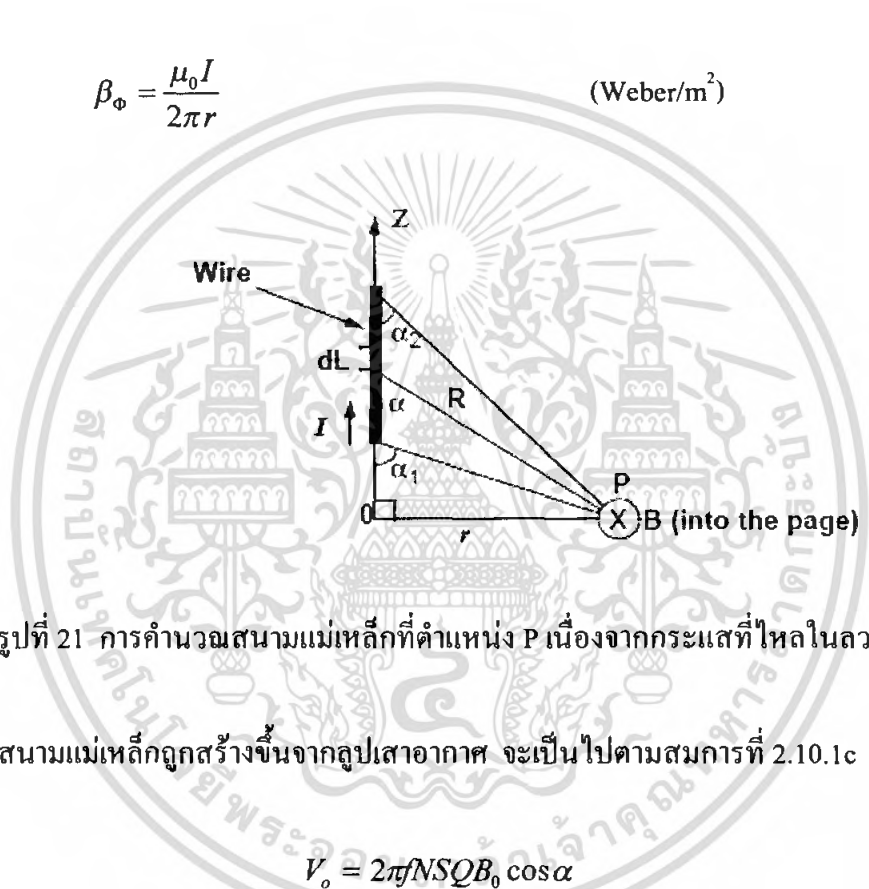
$$\alpha_1 = -180^\circ$$

$$\alpha_2 = 0^\circ$$

ฉะนั้นจากสมการที่ 2.10.1a

สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.10.1b

$$\beta_\Phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{Weber/m}^2) \quad (2.10.1b)$$



รูปที่ 21 การคำนวณสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง P เนื่องจากกระแสที่ไหลในลวดเส้นตรง

สนามแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นจากลูปเสาอากาศ จะเป็นไปตามสมการที่ 2.10.1c

$$V_o = 2\pi f N S Q B_0 \cos \alpha$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I N a^2}{2r^3} \quad \text{for } r^2 \gg a^2 \quad (2.10.1c)$$

โดยที่

I = กระแส

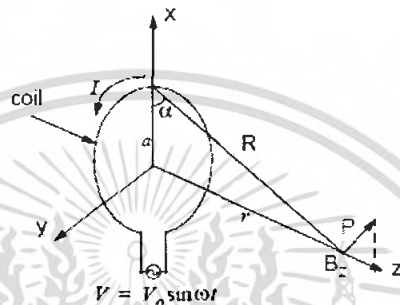
a = รัศมีของลูป

r = ระยะทางจากศูนย์กลางของลูป

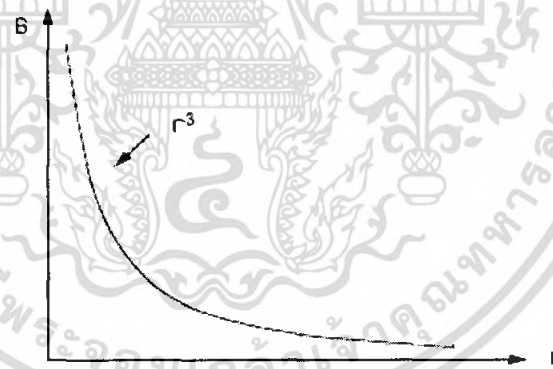
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.10.1c ต้องการชี้ว่าความแรงของสนามแม่เหล็กลดลงด้วย $1/r^3$ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 22 สนามแม่เหล็กจะมี Amplitude มากที่สุดในระนาบของและขึ้นอยู่กับทั้งกระแสและจำนวนรอบ

นอกจากนั้นสมการที่ 2.10.1c ถูกใช้ในการหาค่ากระแสต่อรอบที่ต้องการสำหรับระยะการอ่าน



รูปที่ 22 การคำนวณสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง P เนื่องจากกระแสที่ไหลในลวดเป็นลูป



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะทาง r

2.10.2 แรงดันที่เหนี่ยวนำได้จากขดลวดสายอากาศ

จากกฎของฟาราเดย์กล่าวว่า สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทะลุผ่านพื้นผิวที่ถูกรอบคลุมโดยเส้นทางเดินปิดจะเหนี่ยวนำให้เกิดรอบๆลูป

รูปที่ 23 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้ RFID จากกฎของฟาราเดย์ เมื่อสายอากาศของแท็กส์และตัวอ่านอยู่ในบริเวณปิด สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกสร้างขึ้นโดย สายอากาศของตัวอ่านเหนี่ยวนำแรงดัน(เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือ EMF อย่างง่าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังสายอากาศของแท็กส์ แรงดันเหนี่ยวนำที่ถูกระบายในสายอากาศของตัวอ่านเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในแท็กส์

แรงดันเหนี่ยวนำบนสายอากาศของแท็กส์ จะเท่ากับการชาร์ทของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.10.2a

$$V = -N \frac{d\psi}{dt} \quad (2.10.2a)$$

โดยที่

N = จำนวนรอบของสายอากาศ

ψ = เส้นแรงแม่เหล็กที่ทะลุผ่านในแต่ละรอบ

เครื่องหมายลบแสดงทิศทางการเหนี่ยวนำซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จากกฎของเลนส์ (Lenz's Law) เป็นการย้ำว่าทิศทางการไหลของกระแสในวงจรจะมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กที่ผลิตขึ้นจากการเหนี่ยวนำของกระแสแต่จะตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่จุดกำเนิด

เส้นแรงแม่เหล็กในสมการที่ 2.10.2 คือ ผลรวมของสนามแม่เหล็ก (B_{total}) ซึ่งทะลุผ่านเข้าไปยังพื้นผิวของสายอากาศ

$$\psi = \int B \cdot dS \quad (2.10.2b)$$

โดยที่

B = สนามแม่เหล็กจากสมการที่ 2.4

S = พื้นที่ผิวของขดลวด

\cdot = ผลคูณภายใน (มุม \cos ระหว่าง เวกเตอร์สองเวกเตอร์)

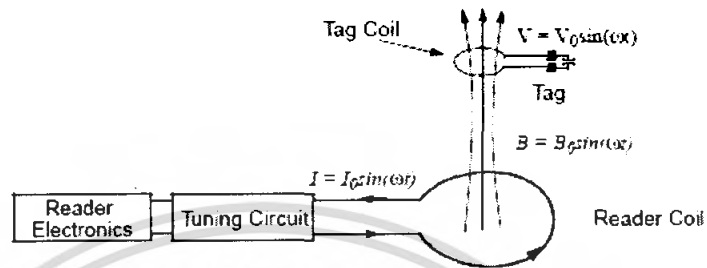
ซึ่งทั้ง B และ S เป็นปริมาณเวกเตอร์

ผลคูณภายในของสองเวกเตอร์ในสมการที่ 2.10.2b แสดงให้เห็นว่า เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่ทะลุผ่าน ขดลวดสายอากาศ เกิดจากการหาตำแหน่งมุมของขดลวดสายอากาศ ผลคูณภายในของสองเวกเตอร์จะมีค่าน้อยสุดเมื่อมุม \cos ระหว่างสองเวกเตอร์เท่ากับ 90 องศา หรือสองเวกเตอร์ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และจะมากที่สุดเมื่อ มุม \cos คือ 0 องศา

ขดลวดของแท็กส์ได้รับขนาดเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่ทะลุผ่านเมื่อขดลวดของตัวอ่านและแท็กส์อยู่ในตำแหน่งที่ขนานกัน ซึ่งก็หมายถึงจะมีแรงดันเหนี่ยวนำมากที่สุดเกิดขึ้นที่ขดลวด

ของแท็กส์และจะได้ระยะอ่านมากที่สุดด้วย ผลคูณภายในที่แสดงดังสมการที่ 2.10.2b สามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายในพจน์ของ mutual coupling ระหว่าง ขดลวดของตัวอ่านและแท็กส์ mutual coupling ระหว่างขดลวดทั้งสองจะสูงสุดในสถานะที่กล่าวมาแล้วเบื้องต้น



รูปที่ 24 โครงสร้างพื้นฐานของตัวอ่านและแท็กส์ในการประยุกต์ใช้ RFID

นำสมการที่ 2.10.1c และ 2.10.2b มาแทนลงในสมการที่ 2.10.2a จะได้

$$\begin{aligned} V &= -N_2 \frac{d\psi_{21}}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} (\int B \cdot dS) \\ &= -N_2 \frac{d}{dt} \left[\int \frac{\mu_0 i_1 N_1 a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \cdot dS \right] \\ &= - \left[\frac{\mu_0 N_1 N_2 a^2 (\pi b^2)}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \frac{di_1}{dt} \\ &= -M \frac{di_1}{dt} \\ M &= \left[\frac{\mu_0 \pi N_1 N_2 (ab)^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \end{aligned}$$

โดยที่

V = แรงดันในขดลวดแท็กส์

i_1 = กระแสที่ไหลในขดลวดตัวอ่าน

a = รัศมีของขดลวดตัวอ่าน

b = รัศมีของขดลวดแท็กส์

r = ระยะทางระหว่างขดลวดทั้งสอง

M = mutual inductance ระหว่างขดลวดแท็กส์และขดลวดตัวอ่าน โดยที่

ค่า M เป็นไปตามสมการที่ 2.10.2c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = \left[\frac{\mu_0 \pi N_1 N_2 (ab)^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \quad (2.10.2c)$$

เส้นแรงแม่เหล็กเกิดจากมีกระแสในขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ

ในสมการที่ 2.6 แรงดันขดลวดของแท็กส์จะขึ้นอยู่กับ mutual inductance ระหว่างขดลวดทั้งสอง mutual inductance ขึ้นอยู่กับรูปร่างของขดลวดและระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสอง แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดของแท็กส์ลดลงด้วยอัตรา r^{-3} ดังนั้น ระยะการอ่านจะลดลงในทางเดียวกัน

จากสมการที่ 2.10.2a และ 2.10.2b สมการรูปทั่วไปสำหรับแรงดันเหนี่ยวนำ V_0 ในขดลวดรูป คือ

$$V_0 = 2\pi fNSQB_0 \cos \alpha \quad (2.10.2d)$$

โดยที่

f = ความถี่ของสัญญาณที่เข้ามา

N = จำนวนรอบของขดลวดในรูป

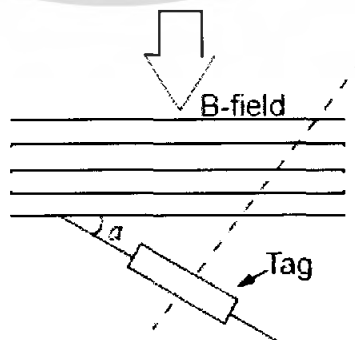
S = พื้นที่ของรูป มีหน่วยเป็น m^2

Q = quality factor ของวงจร

B_0 = ความเข้มของสัญญาณที่เข้ามา

α = มุมของสัญญาณที่เข้ามา

จากสมการที่ 2.10.2c ค่า quality factor (Q) คือ มาตรการในการเลือกความถี่ที่สนใจ



รูปที่ 25 ตำแหน่งของสายอากาศของแท็กส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเหนี่ยวนำทะเลลวดของสายอากาศในทิศทางมุมของสัญญาณที่เข้ามา แรงดันเหนี่ยวนำจะมากที่สุดเมื่อลวดตัวอ่านอยู่ในตำแหน่งที่ขนานกับสัญญาณที่เข้ามา นั่นก็คือ $a = 0$

2.10.3 ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำและชนิดของลวด

American Wire Gauge (AWG) เป็นเลขที่แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ เลขนี้เป็นสัดส่วนตรงกันข้ามกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ยิ่งลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กก็就会有ความต้านทานกระแสตรงสูง ความต้านทานกระแสตรงสำหรับตัวนำจะมีรูปแบบที่สัมพันธ์กับพื้นที่ตัดขวาง ดังสมการที่ 2.10.3

$$R_{DC} = \frac{l}{\sigma S} = \frac{l}{\sigma \pi a^2} \quad (2.10.3)$$

โดยที่

l = ความยาวทั้งหมดของลวด

σ = ความนำไฟฟ้าของลวด

S = พื้นที่ตัดขวาง

a = รัศมีของลวด

ค่าความต้านทานค่าน้อยๆ อาจเป็นไปได้สำหรับค่า Q ที่สูงๆ ของวงจรสายอากาศ นั่นหมายถึง ขดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางจะต้องถูกเลือกให้เป็นไปได้กับวงจร RFID ตามตารางที่ 2.4 แสดงถึง เส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับลวดที่มีสิ่งห่อหุ้มและเปลือย และแสดงถึงความต้านทานกระแสตรง

2.10.4 ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ

สำหรับกระแสตรง พาหะตัวนำจะกระจายอยู่รอบๆ ส่วนต่างๆ ของลวด ถ้าความถี่เพิ่มขึ้นที่ศูนย์กลางของตัวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นความต้านทานของขดลวดที่มีต่อการนำไฟฟ้าสลับที่ใกล้ๆ จุดศูนย์กลางของลวดจะเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ ในบริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสความต้านทานจะสูงขึ้น

ดังนั้น ประจุจะเคลื่อนจากจุดศูนย์กลางของลวดตรงไปยังขอบๆ ของลวด เป็นผลทำให้ความหนาแน่นที่จุดศูนย์กลางของลวดลดลงและเพิ่มขึ้นที่บริเวณใกล้กับขอบของลวด นี้คือ 'skin effect' ลึกเข้าไปในตัวนำ ความหนาแน่นของกระแสตกลงเป็น $1/e$ หรือ 37% (= 0.3679) ของค่าที่พื้นผิว เป็นที่รู้กันว่าเป็นลักษณะของ skin depth และ คือปัจจัยของความถี่และค่าความซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นและค่าความนำของตัวกลาง ผลต่างๆ ของ skin effect ทั้งหมดทั้งปวงเพิ่มขึ้นในความต้านทานกระแสสลับของลวด

ค่า skin depth คำนวณได้จากสมการที่ 2.10.4a

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.10.4a)$$

โดยที่

f = ความถี่

μ = ค่าความซึมซับ

μ_0 = ค่าความซึมซับของอากาศ

$\mu_r = 1$ สำหรับ ทองแดง, อะลูมิเนียม, ทอง และอื่นๆ

= 4000 สำหรับ เหล็กบริสุทธิ์

σ = ค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ

= 5.8×10^7 (Ω/m) สำหรับ ทองแดง

= 3.82×10^7 (Ω/m) สำหรับ อะลูมิเนียม

= 4.1×10^7 (Ω/m) สำหรับ ทอง

= 6.1×10^7 (Ω/m) สำหรับ เงิน

ค่า skin depth ทองแดง ที่ความถี่ 13.56 MHz จะได้

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi(13.56 \times 10^6)(4\pi \times 10^{-7})(5.8 \times 10^7)}} = 17.9 \times 10^{-6} \text{ m}$$

63 % ของการไหลกระแส RF ในทองแดงจะไหลอยู่ที่ระยะที่ห่างจากขอบนอกสุด $17.9 \times 10^{-6} \text{ m}$ สำหรับความถี่ 13.56 MHz

ความต้านทานลวดเพิ่มขึ้นตามความถี่ และ ความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับ skin depth ถูกเรียกว่า ความต้านทานกระแสสลับ สูตรโดยประมาณของความต้านทานกระแสสลับ เป็นไปตามสมการที่ 2.10.4b

$$R_{ac} = \frac{1}{\sigma A_{active}} \approx \frac{1}{2\pi a \delta \sigma} \quad (\Omega) \quad (2.10.4b)$$

$$= \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{f \mu}{\pi \sigma}} \quad (\Omega)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= (R_{dc}) \frac{a}{2\delta} \quad (\Omega)$$

โดยที่ พื้นที่ skin depth บนลวดตัวนำคือ

$$A_{active} = 2\pi a\delta$$

ความต้านทานกระแสสลับเพิ่มขึ้นด้วยรากที่สองของความถี่ที่ใช้

Wire Size (AWG)	Dia. in Mils (bare)	Dia. in Mils (coated)	Ohms/1000 ft.	Cross Section (mils)
1	289.3	—	0.126	83690
2	287.6	—	0.156	66360
3	229.4	—	0.197	52620
4	204.3	—	0.249	41740
5	181.9	—	0.313	33090
6	162.0	—	0.395	26240
7	166.3	—	0.498	20820
8	128.5	131.6	0.628	16510
9	114.4	116.3	0.793	13090
10	101.9	106.2	0.999	10380
11	90.7	93.5	1.26	8230
12	80.8	83.3	1.59	6530
13	72.0	74.1	2.00	5180
14	64.1	66.7	2.52	4110
15	57.1	59.5	3.18	3260
16	50.8	52.9	4.02	2580
17	45.3	47.2	5.05	2060
18	40.3	42.4	6.39	1620
19	35.9	37.9	8.05	1290
20	32.0	34.0	10.1	1020
21	28.5	30.2	12.8	812
22	25.3	28.0	16.2	640
23	22.6	24.2	20.3	511
24	20.1	21.6	25.7	404
25	17.9	19.3	32.4	320

Note: 1 mil = 2.54×10^{-3} cm

Wire Size (AWG)	Dia. in Mils (bare)	Dia. in Mils (coated)	Ohms/1000 ft.	Cross Section (mils)
26	15.9	17.2	41.0	253
27	14.2	15.4	51.4	202
28	12.6	13.8	65.3	159
29	11.3	12.3	81.2	123
30	10.0	11.0	106.0	100
31	8.9	9.9	131	79.2
32	8.0	8.8	162	64.0
33	7.1	7.9	206	50.4
34	6.3	7.0	261	39.7
35	5.6	6.3	331	31.4
36	5.0	5.7	415	25.0
37	4.5	5.1	512	20.2
38	4.0	4.5	648	16.0
39	3.5	4.0	847	12.2
40	3.1	3.5	1080	9.61
41	2.8	3.1	1320	7.84
42	2.5	2.8	1660	6.25
43	2.2	2.5	2140	4.84
44	2.0	2.3	2590	4.00
45	1.76	1.9	3350	3.10
46	1.57	1.7	4210	2.46
47	1.40	1.6	5290	1.96
48	1.24	1.4	6750	1.54
49	1.11	1.3	8420	1.23
50	0.99	1.1	10600	0.98

Note: 1 mil = 2.54×10^{-3} cm

ตารางที่ 2.2 AWG WIRE CHART

2.10.5 ความต้านทานของตัวนำด้วยการประมาณที่ความถี่ต่ำ

เมื่อ skin depth ส่วนใหญ่จะเปรียบเทียบกับรัศมีของตัวนำ ความต้านทานสามารถได้รับการประมาณด้วยความถี่ต่ำได้

$$R_{low\ freq} \approx \frac{1}{\sigma\pi a^2} \left[1 + \frac{1}{48} \left(\frac{a}{\delta} \right)^2 \right] \quad (2.10.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พจน์แรกของสมการที่ 2.10.5 คือ ความต้านทานกระแสตรง ส่วนพจน์ที่สองคือความต้านทานกระแสสลับ

2.10.6 ตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบด้วยขดลวดสี่เหลี่ยมหลายชั้น

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสี่เหลี่ยมหลายชั้นคำนวณจากสมการที่ 2.10.6

$$L = \frac{0.0276(CN)^2}{1.908C + 9b + 10h} \quad \mu H \quad (2.10.6)$$

โดยที่

N = จำนวนรอบ

$C = x+y+2h$

X = ความกว้างของขดลวด

Y = ความยาวของขดลวด

b = ความกว้างของภาคตัดขวาง

h = ความสูงของภาคตัดขวาง

หมายเหตุ อยู่ในหน่วย เซนติเมตร



รูปที่ 26 ขดลวดลูปสี่เหลี่ยมหลายชั้น

2.11 ค่าเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

ค่าความเหนี่ยวนำร่วม คือ ความสามารถของขดลวดหนึ่งที่ทำให้เหนี่ยวนำแรงดันให้เกิดขึ้นที่ขดลวดข้างเคียง โดยมีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

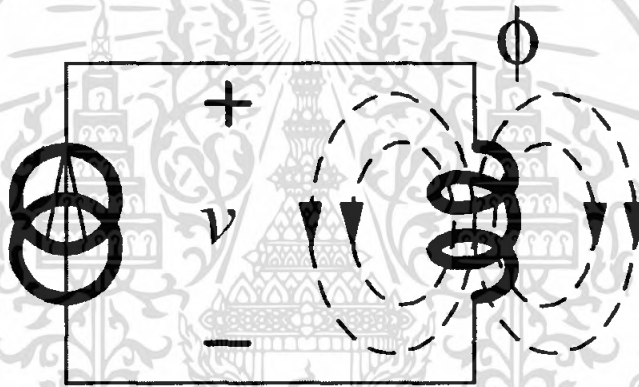
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรทางไฟฟ้าสามารถแบ่งการเชื่อมโยงได้ 2 แบบคือ

- การเชื่อมโยงทางตัวนำ (Conductively Coupled) หมายถึง ลูปหนึ่งในวงจรไปมีผลต่ออีก ลูปหนึ่งในวงจรผ่านกระแส

- การเชื่อมโยงทางสนามแม่เหล็ก (Magnetically Coupled) หมายถึง ลูปหนึ่งในวงจรไปมี ผลต่ออีกลูปหนึ่งในวงจรที่ไม่ได้เชื่อมต่ อกันผ่านทางสนามแม่เหล็กหม้อแปลง (Transformer) เป็น อีกตัวอย่าง

หนึ่งที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะถูกมองในรูปพลังงานที่ถ่ายเทจากวงจรหนึ่ง ไปยังอีกวงจรหนึ่ง



รูปที่ 27 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 26 ขดลวดพัน N รอบจะมี กระแสไหล, $i(t)$ ผ่านทำให้เกิดฟลักซ์สนามแม่เหล็ก ϕ ที่เกิดขึ้น

รอบๆขดลวด จากกฎของฟาราเดย์กล่าวไว้ว่า

$$v = N \frac{d\phi}{dt}$$

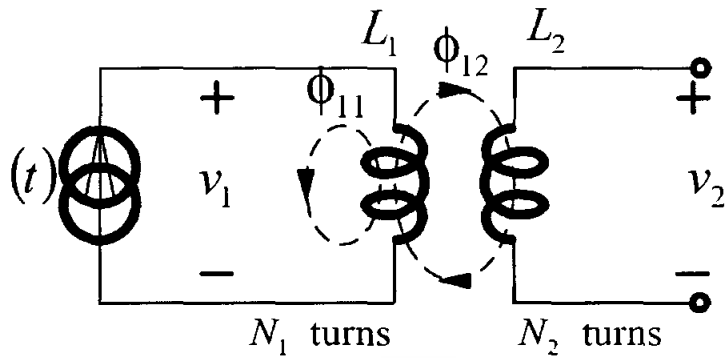
ฟลักซ์, ϕ ก็เกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลาดังนั้น

$$v = N \frac{d\phi}{di} \frac{di}{dt} \tag{2.11}$$

หรือ $v = L \frac{di}{dt}$ โดยที่ $L = N \frac{d\phi}{di}$

โดยที่ L จะถูกเรียกว่า Self-Inductance เนื่องจาก ผลของแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงกระแส ต่อเวลาในขดลวดเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 28 ขดลวดที่ค่า Self-Inductance เท่ากับ L_1 และ L_2

ขดลวด 2 ขดที่ค่า Self-Inductance เท่ากับ L_1 และ L_2 มาวางใกล้กันดังรูปที่ 27 ขดลวด L_1 และ L_2 พัน N_1 และ N_2 รอบตามลำดับ เนื่องจากขดลวด L_2 ไม่มีกระแสไหล ฟลักซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 1 คือ $\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$

$$\text{แรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่ 1: } v_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi_1}{di_1} \frac{di_1}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$\text{แรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่ 2: } v_2 = N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = N_2 \frac{d\phi_{12}}{di_1} \frac{di_1}{dt} = M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

โดยที่ M_{21} : mutual-Inductance ของขดลวด

ในทางตรงกันข้าม ถ้าให้ขดลวด L_1 ไม่มีกระแสไหลทำนองเดียวกัน ฟลักซ์ทั้งหมด ที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 2 คือ: $\phi_2 = \phi_{21} + \phi_{22}$

$$\text{แรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 2: } v_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = N_2 \frac{d\phi_2}{di_2} \frac{di_2}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt}$$

$$\text{ซึ่งทำให้ } v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt}$$

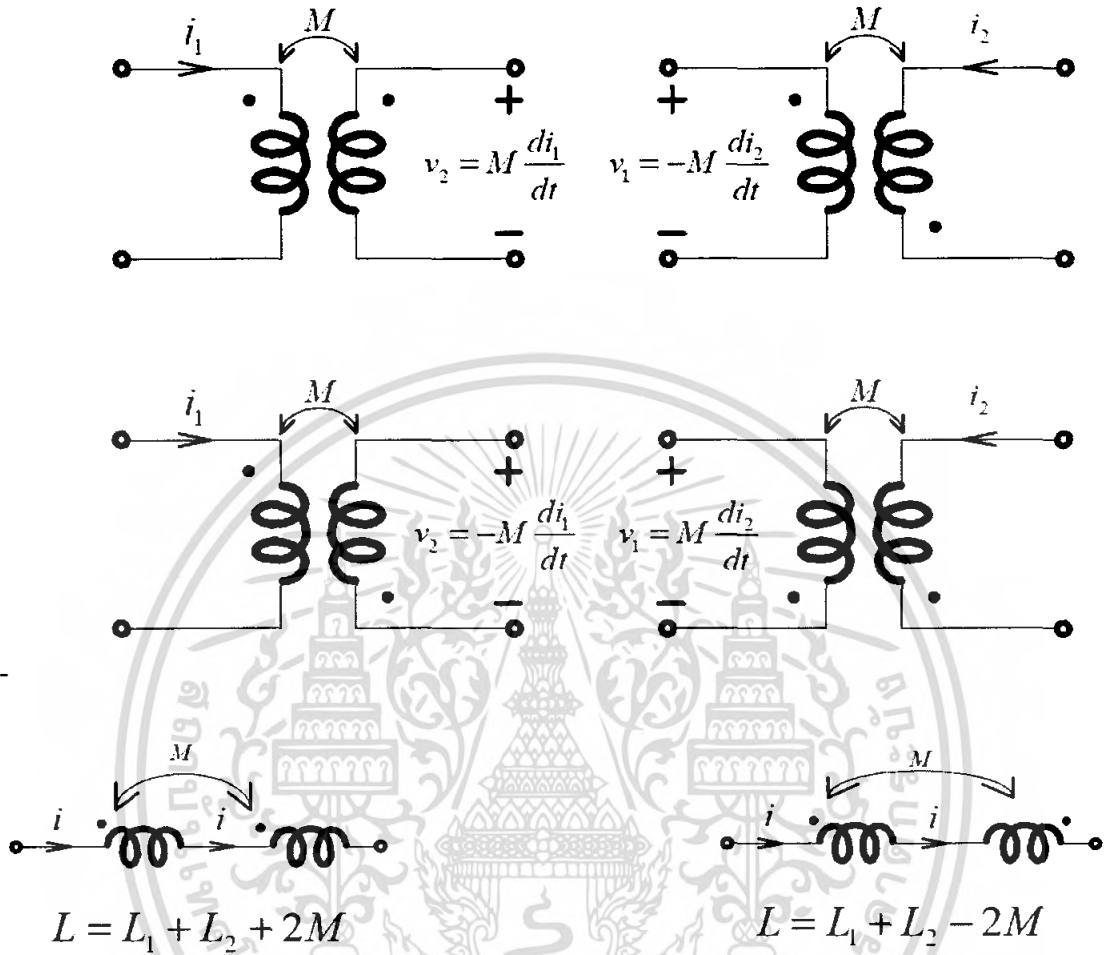
$$\text{แรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 1: } v_1 = N_1 \frac{d\phi_{21}}{dt} = N_1 \frac{d\phi_{21}}{di_2} \frac{di_2}{dt} = M_{12} \frac{di_2}{dt}$$

จะพบว่า $M_{21} = M_{12} = M$ โดยที่ M คือค่า Mutual Inductance ระหว่างขดลวด 2 ขด

ความยุ่งยากในการกำหนดแรงดัน ความเหนี่ยวนำร่วม สามารถพิจารณาได้โดยใช้ Dot Convention ดังนี้

- ถ้ากระแสไหลเข้าจุดของขดลวดอันแรก แรงดันเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดที่สองที่ขั้วของจุดจะเป็นบวก
- ถ้ากระแสไหลออกจากจุดของขดลวดอันแรก แรงดันเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดที่ขั้วของจุดจะเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 29 ทิศทางของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวด

2.11.1 พลังงานในวงจรที่เชื่อมโยงกัน (Energy in a Coupled Circuit)

พลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ $\left(w = \frac{1}{2} Li^2 \right)$

พลังงานสะสมในขดลวดเหนี่ยวนำ $\left(w = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \pm M i_1 i_2 \right)$

พลังงานที่เกิดขึ้นจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0 ดังนั้น $\frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2 > 0$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M และค่า L คือ $\sqrt{L_1 L_2} - M$ หรือ $M \sqrt{L_1 L_2}$

อัตราส่วนของค่าความเหนี่ยวนำร่วม ต่อค่าเฉลี่ยของค่าความเหนี่ยวนำส่วนตัวคือค่า

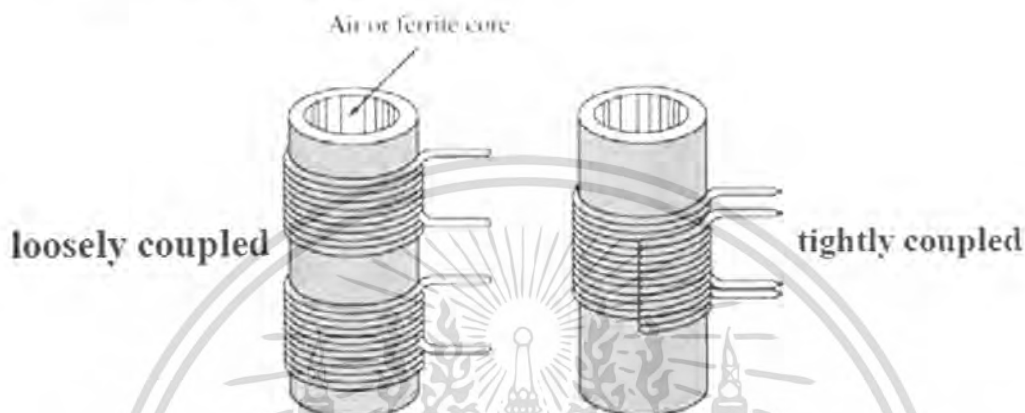
สัมประสิทธิ์การคัปปลิง(Coefficient of coupling),k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}; 0 < k < 1 \quad (2.11.1)$$

สำหรับ $k < 0.5$ จะเรียกว่า Loosely Coupled

สำหรับ $k > 0.5$ จะเรียกว่า Tightly Coupled



รูปที่ 30 สัมประสิทธิ์การคัปปลิง

2.11.2 หม้อแปลงแบบเชิงเส้น (Linear Transformers)

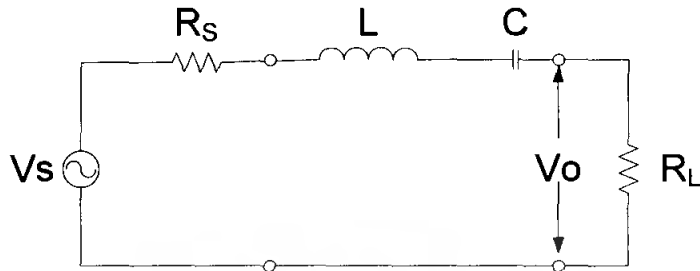
- ขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) เป็นขดลวดที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่าย
- ขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) เป็นขดลวดที่เชื่อมต่อกับ โหลด
- แกน (core) เป็นส่วนแกนที่ขดลวดพันรอบ โดยหม้อแปลงจะเป็นแบบเชิงเส้นก็ต่อเมื่อแกนเป็นวัสดุซึมซาบทางแม่เหล็ก (permeability) คงที่ อาทิเช่น อากาศพลาสติก เบคไลท์ และไม้

2.12 วงจรเรโซแนนซ์

ธรรมชาติของวงจรเรโซแนนซ์จะยอมให้ความถี่หนึ่งผ่านได้ดี เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อป้อนความถี่เรโซแนนซ์แก่วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม กระแสจะผ่านได้มากที่สุด โดยมีแรงดันตกคร่อมวงจรต่ำที่สุด ถ้าป้อนความถี่เรโซแนนซ์แก่วงจรเรโซแนนซ์ขนาน กระแสจะผ่านได้น้อยที่สุด โดยมีแรงดันตกคร่อมวงจรสูงที่สุด โดยปกติวงจรเรโซแนนซ์จะต้องมีแบนด์วิดท์ที่ยอมรับให้ความถี่ข้างเคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ทั้งด้านสูงและด้านต่ำผ่านไปได้ช่วงหนึ่ง ความถี่เรโซแนนซ์จึงหมายถึงความถี่ที่ผ่านวงจรตลอดแบนด์วิดท์ ซึ่งอาจจะกว้างหรือแคบขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์นั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม(Series Resonance)



รูปที่ 31 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

จากวงจรในรูปที่ 30 ได้

$$\begin{aligned}
 \frac{V_0(s)}{V_s(s)} &= H(s) = \frac{R_L}{R_s + sL + \frac{1}{sC} + R_L} \\
 &= \frac{sCR_L}{s^2LC + sc(R_s + R_L) + 1} \left[\frac{1}{LC} \right] \left[\frac{1}{LC} \right] \\
 &= \frac{sR_L \left[\frac{R_s + R_L}{R_s + R_L} \right]}{L \left[\frac{R_s + R_L}{R_s + R_L} \right]} \\
 &= \frac{R_L}{R_s + R_L} s \left(\frac{R_s + R_L}{L} \right) + \frac{1}{LC} \\
 \frac{V_0(s)}{V_s(s)} &= \frac{R_L}{R_s + R_L} s \left(\frac{R_s + R_L}{L} \right) + \frac{1}{LC} \tag{2.12.1a}
 \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ Passband gain : } K = \frac{R_L}{R_s + R_L} \tag{2.12.1b}$$

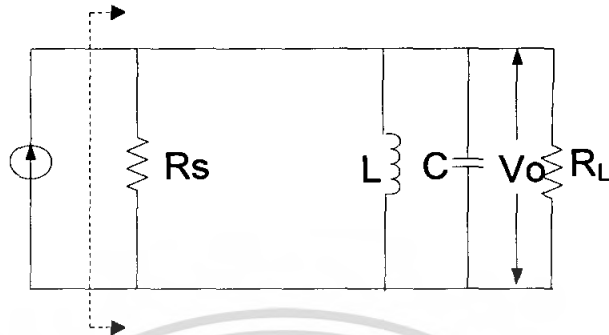
$$\text{ความถี่ศูนย์กลาง : } \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{R/S} \tag{2.12.1c}$$

$$\text{-3 dB Bandwidth : } BW = \frac{R_s + R_L}{L} \quad \text{R/S}$$

$$\text{และ } Q_p = \frac{\sqrt{b}}{a} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \frac{L}{R_s + R_L} = \frac{1}{R_s + R_L} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.12.1d}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน หรือ วงจรแทงค์ (Parallel Resonance or Tank circuit)



รูปที่ 32 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน หรือ วงจรแทงค์

จากวงจรในรูปที่ 31 R_s จะขนานอยู่กับ R_L ดังนั้น

$$R_{Total} = R_s // R_L$$

อิมพีแดนซ์ของวงจรแทงค์ : Z_{tank} จะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} (Z_{tank})^{-1} &= \frac{1}{R_T} + \frac{1}{sL} + sC \\ &= \frac{sL + R_T + s^2 L R_T C}{sL R_T} \end{aligned}$$

จะได้

$$Z_{tank} = \frac{sL R_T}{sL + R_T + s^2 L R_T C} \left[\frac{1}{LCR_T} \right] \left[\frac{1}{LCR_T} \right]$$

$$Z_{tank} = \frac{s \frac{1}{C} \left[\frac{R_T}{R_T} \right]}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_T C} \right) + \frac{1}{LC}}$$

$$Z_{tank} = \frac{R_T \cdot s \left[\frac{1}{R_T C} \right]}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_T C} \right) + \frac{1}{LC}} \quad (2.12.2a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการของสมการ Band pass filter ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรขนาน RLC จะมีค่าสูงสุด

ความถี่ $\omega_p : \omega_p \approx 1/\sqrt{b}$

$$\omega |_{Z_{\tan \delta \text{MAX}}} = \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

และค่าของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ $1/\sqrt{b} = 1/\sqrt{LC}$ จะมีค่าเท่ากับ $K : K = R_T$ หรือ

$$Z_{\text{MAX}} = R_T$$

ในขณะที่ Z_{tank} มีค่าสูงสุด ค่าของแรงดัน V_o ที่คร่อม Tank ก็จะมีค่าสูงสุด เช่นเดียวกันและค่า -3 dB Bandwidth จะมีค่าเป็น $\frac{1}{R_T C}$

หมายเหตุ รูปทั่วไปของฟังก์ชัน Band pass filter ที่มีอัตราขยาย K เท่า จะเป็น

$$\text{Gain}_{\text{BPF}} = \frac{Kas}{s^2 + as + b} = \frac{K \frac{\omega_p}{Q_p} s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (2.12.2b)$$

โดยที่

$K = \text{Passband gain}$

$\omega_p = \text{ความถี่ศูนย์กลางของ BPF}$

2.13 การแมทซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching)

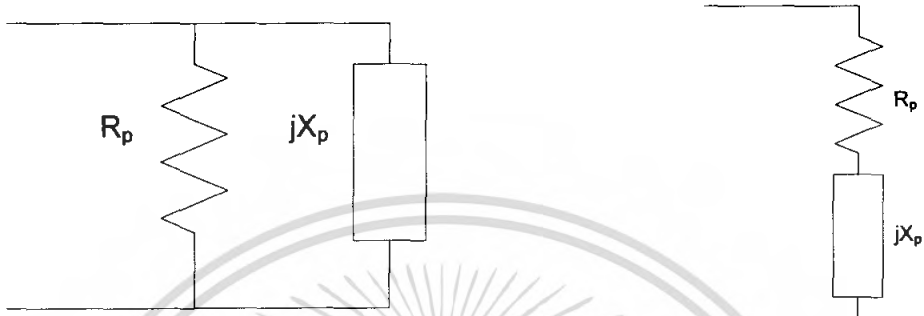
วงจรแมทซ์ซิ่ง (Matching circuit) เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร หรือ โครงข่ายเพื่อให้วงจร หรือ โครงข่าย มีค่า Z_s' และ / หรือ Z_L' ตามที่เราต้องการ เพื่อให้วงจร หรือ โครงข่ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ/หรือ ให้เกิดการถ่ายทอดกำลังสูงสุด

วงจรที่ใช้ในการแมทซ์ซิ่งอาจใช้เพียง ตัวความต้านทาน หรือ หม้อแปลง หรือวงจร L-C

2.13.1 วงจรเสมือน การแปลงระหว่าง อิมพีแดนซ์อนุกรม และอิมพีแดนซ์ขนาน

หลักการที่สำคัญของการออกแบบวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ คือการแปลงอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในรูป

$$Z_p = R_p // jX_p \Leftrightarrow R_{se} + jX_{se} = Z_{se}$$



(ก) อิมพีแดนซ์ขนาน

(ข) อิมพีแดนซ์อนุกรม

รูปที่ 33 วงจรเสมือนอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 22(ก)จะได้ $Z_p = R_p // jX_p$

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{R_p \cdot jX_p}{R_p + jX_p} \cdot \frac{R_p - jX_p}{R_p - jX_p} \\ &= \frac{R_p^2 jX_p + X_p^2 R_p}{R_p^2 + X_p^2} \end{aligned}$$

$$\therefore Z_p = \frac{X_p^2 R_p}{R_p^2 + X_p^2} + j \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (2.13.1a)$$

จากรูปที่ 22(ข)จะได้ $Z_{se} = R_{se} + jX_{se}$

$$Z_p \equiv Z_{se} \quad (2.13.1b)$$

$$\text{จะได้ } \frac{X_p^2 R_p}{R_p^2 + X_p^2} + j \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \equiv R_{se} + jX_{se}$$

$$\text{Real part; } R_{se} = \frac{X_p^2 R_p}{R_p^2 + X_p^2}$$

$$\text{Re}\{Z_{se}\} = R_{se} = \frac{R_p}{1 + (R_p/X_p)^2}$$

$$\text{Imaginary part; } X_{se} = \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (2.13.1c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.13.1c $R_p^2 + X_p^2 = \frac{X_p^2 \cdot R_p}{R_{se}}$

แทนลงในสมการที่ 2.13.1e จะได้ $X_{se} = R_p^2 X_p \cdot \frac{R_{se}}{X_p^2 R_p}$

$$\text{Im}\{Z_{se}\} = X_{se} = R_{se} \left(\frac{R_p}{X_p} \right) \quad (2.13.1d)$$

และจากสมการที่ 2.13.1b

$$R_p = R_{se} \left(1 + \frac{R_p^2}{X_p^2} \right) \quad (2.13.1e)$$

จากสมการที่ 2.13.1d: $\frac{R_p}{X_p} = Q_p = \frac{X_{se}}{R_{se}} = Q_{se}$ (2.13.1f)

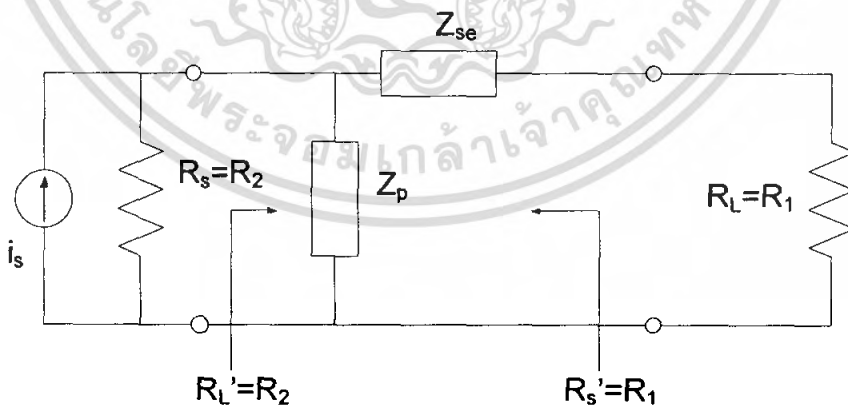
จากสมการที่ 2.13.1b: $\text{Im}\{Z_p\} = X_p = \frac{R_p}{X_p / R_{se}}$ (2.13.1g)

แทนค่า $\frac{R_p}{X_p}$ ในสมการที่ 2.13.1e ด้วย $\frac{X_{se}}{R_{se}}$ จะได้

$$\text{Re}\{Z_p\} = R_p = R_{se} \left(1 + \left(\frac{X_{se}}{R_{se}} \right)^2 \right) \quad (2.13.1h)$$

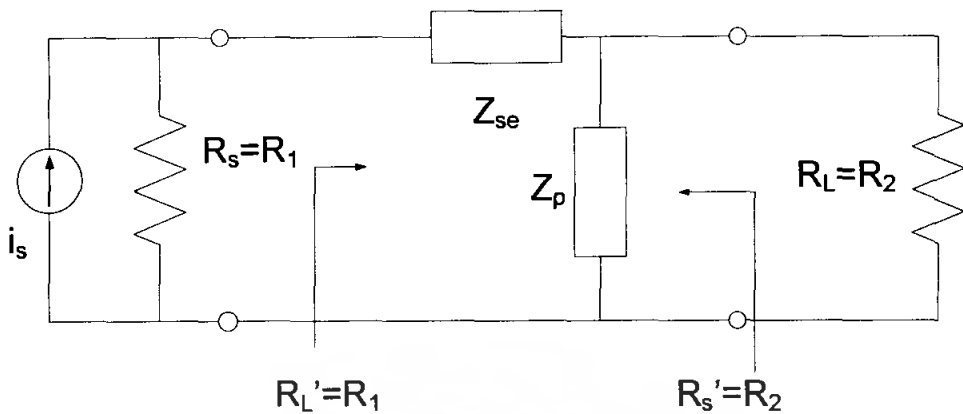
ค่าอัตราส่วน $\frac{R_p}{X_p}$ หรือ $\frac{X_{se}}{R_{se}}$ อาจถูกเรียกว่าค่า Q ของอิมพีแดนซ์

2.13.2 วงจรเมทซ์หึ่งอิมพีแดนซ์อย่างง่าย



(ก) กรณี $R_s > R_L$: $R_2 \equiv R_s$ และ $R_1 \equiv R_L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กรณี $R_s < R_L$: $R_1 \equiv R_s$ และ $R_2 \equiv R_L$

รูปที่ 34 วงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์อย่างง่ายที่สุด

จากรูปที่ 33 แหล่งกำเนิดสัญญาณ i_s ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ R_s จะต้องแมทซ์กับ R_L เพื่อให้ได้การถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าจาก i_s ไปยัง R_L ให้มากที่สุด

- แหล่งกำเนิด i_s ควรต่อกับโหลดที่มีค่า $R_L' = R_s$
- R_L ควรต่อกับแหล่งกำเนิดที่มีค่า $R_s' = R_L$ การถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าใน รูปที่ 33 อาจหมายถึง
 - การถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าในจากแหล่งกำเนิดไปสู่วงจรขยาย ในกรณีนี้อิมพีแดนซ์ที่ทางเข้าของวงจรขยาย จะเสมือนเป็น R_L หรือ $R_L = R_{IN}$
 - การถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าจากวงจรขยายไปยัง R_L ในกรณีนี้อิมพีแดนซ์ที่ทางออกของวงจรขยาย จะเสมือนเป็น R_s หรือ $R_{out} = R_s$ และ $R_{IN(n+1)} = R_L$

จากรูปที่ 34 R_2 หมายถึง ด้านที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า ในกรณีที่

- $R_s > R_L$ $R_2 \equiv R_s$ และ $R_1 \equiv R_L$ ดังในรูปที่ 34 (ก)
- $R_s < R_L$ $R_2 \equiv R_L$ และ $R_1 \equiv R_s$ ดังในรูปที่ 34(ข)

โดยการนำอิมพีแดนซ์ Z_p ไปต่อขนานกับฝั่งที่มีความต้านทานสูงกว่า หรือ R_2 เลือกค่าของ Z_p เพื่อให้

$$R_2 // \pm jX_p = R_1 \pm jX_{se1}$$

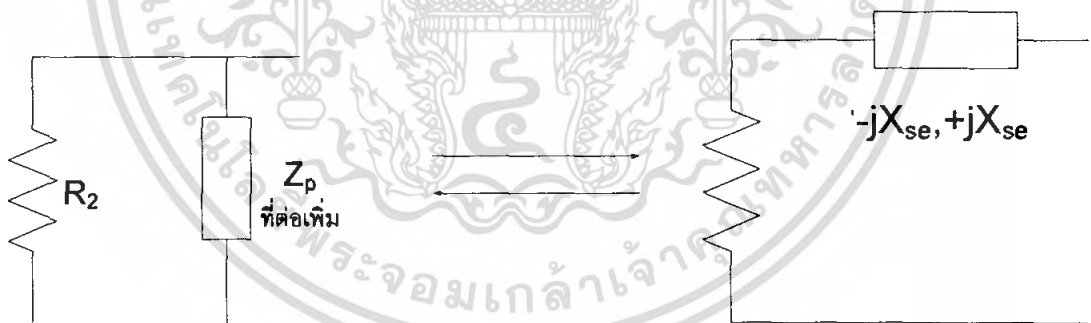
นั่นคือ R_2 จะถูกทำให้มีค่าความต้านทานเสมือนเป็น R_1 จากสมการที่ 2.13.1b

$$R_{se} = \frac{R_p}{1 + \left(\frac{R_p}{X_p}\right)^2}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{1 + \left(\frac{R_2}{X_p}\right)^2}$$

$$\text{จะได้ } X_p = \frac{R_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{R_1}\right) - 1}} \quad (2.13.2a)$$

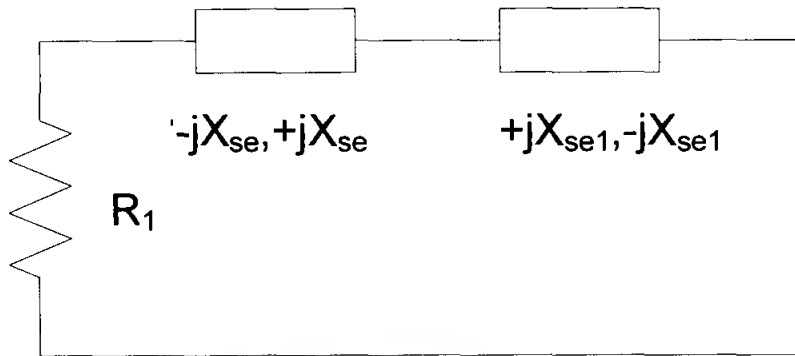
$$\text{ซึ่ง } Z_p = \pm jX_p = \frac{\pm jR_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{R_1}\right) - 1}} \quad (2.13.2b)$$



R_2 ถูกแปลงเป็น R_1 โดยต่อ Z_p

(ก) R_2 ถูกแปลงเป็น $R_1 \pm jX_{se1}$ โดยการนำ $Z_p = \pm jX_p$ ไปต่อขนานกับ R_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$Z_{se} = \mp jX_{se1}$ ถูกต่อเพิ่ม

(ข) $\pm jX_{se1}$ ที่เกิดจากการนำ Z_p ไปต่อขนานกับ R_2 ถูกกำจัดโดยการนำ $Z_{se} = \mp jX_{se1}$ ไปต่ออนุกรมเพิ่ม

รูปที่ 35 การแมทช์อิมพีแดนซ์ ระหว่าง R_2 และ R_1

โดยการนำ $Z_p = \pm jX_p = \frac{\pm jR_2}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}}$ ไปต่อขนานกับ R_2 ทำให้ R_2 ถูกแปลงเป็น R_1 ต่ออนุกรมกับ

$\pm jX_{se1}$ ดังรูปที่ 34 (ก) จากสมการ ที่ 2.13.1f ค่าของ X_{se1} จะมีค่าเป็น $X_{se} = R_{se} \cdot \frac{R_p}{X_p}$

$$X_{se1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2 \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}} = R_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}$$

$$\text{หรือ } Z_{se1} = \pm jR_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1} \quad (2.13.2c)$$

$$\text{นั่นคือ } R_2 // \frac{\pm jR_2}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}} = R_1 \pm jR_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}$$

โดยการนำอิมพีแดนซ์ $Z_{se} = \mp Z_{se1}$ ไปต่ออนุกรมกับ R_1 ดังรูปที่ 34(ข) จะได้ค่าของอิมพีแดนซ์ Z_{se} ที่นำไปต่ออนุกรมกับ R_1 เป็น

$$Z_{se} = \mp jR_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1} \quad (2.13.2d)$$

โดยการเลือกให้ Z_p และ Z_{se} เป็นอิมพีแดนซ์ที่มีเฟสตรงกันข้าม อิมพีแดนซ์ R_2 จะถูกแมทช์กับ R_1 ค่าของ Z_p และ Z_{se} สามารถเขียนเป็นรูปทั่วไปได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

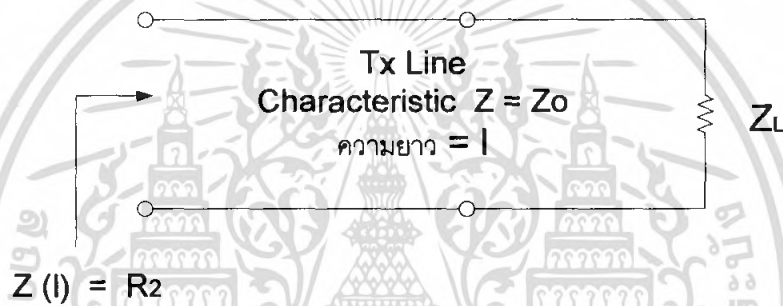
$$|Z_p|_{\text{ขนานกับ } R_2} = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1}} \quad (2.13.2e)$$

$$\text{และ } |Z_{se}|_{\text{อนุกรมกับ } R_1} = R_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1} \quad (2.13.2f)$$

โดยที่ $R_2 > R_1$

2.13.3 Reader Coil Matching Using Quarter Wave Transformer

Transmission Line Theory



รูปที่ 36 วงจรเสมือนของสายส่ง

Transmission Line (Tx) ซึ่งมี Characteristic Impedance เท่ากับ Z_0 มีความยาว l เมตร ต่ออยู่กับ Load ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ Z_L ค่าอิมพีแดนซ์รวมจะขึ้นอยู่กับความยาว l ค่า Z_0 และ Z_L : $Z(l)$ จะมีค่า

$$Z_L = Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \right]$$

โดยที่ $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ Rad}$

กรณีที่ 1 ถ้า $Z_L = Z_0$ จะได้ว่า $Z_L = Z_0 = Z(l)$ โดยไม่ขึ้นกับความยาว

จาก $\beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l = 2\pi \frac{l}{\lambda}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้
$$\frac{l}{\lambda} = \frac{L}{\lambda}$$

จะได้ว่า
$$\beta l = 2\pi \frac{L}{\lambda}$$

ดังนั้น
$$Z_L = Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \tan 2\pi \frac{L}{\lambda}}{Z_0 + jZ_L \tan 2\pi \frac{L}{\lambda}} \right] \quad (2.13.3a)$$

กรณีที่ 2 ถ้า $L = \frac{\lambda}{2}$ จะได้ว่า $Z(l) = Z_L$ โดยที่ไม่ขึ้นกับค่าของ Z_0

กรณีที่ 3 ถ้า $L = \frac{\lambda}{4}$ จะได้ว่า $Z(l) = Z_2 = \frac{Z_0^2}{Z_1}$ หรือ $Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2}$

λ ในสมการ Tx Line เป็นความยาวคลื่นของ Tx Line มีค่า λ_0 ของ Free Space เนื่องจากความเร็วของคลื่นใน Tx Line ไม่เท่ากับความเร็วแสง ซึ่ง λ_0 มีค่าดังสมการ

$$\lambda_0 = \frac{C}{f} \quad (2.13.3b)$$

เมื่อ C คือค่าความเร็วแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

และจาก
$$\lambda = \frac{V_p}{f} \quad (2.13.3c)$$

โดยที่ V_p คือ Phase Velocity

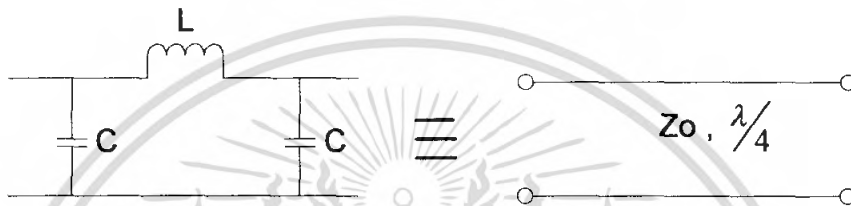
จะกำหนดได้ว่า $\frac{V_p}{C} = U = \text{Velocity Coefficient}$ ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ของ Tx Line ชนิดต่างๆ เช่น สาย RG 58 มีค่า $U \approx 0.66$ ดังนั้นค่าความยาวคลื่นของ Tx Line จะเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{Tx} = \frac{3 \times 10^8 U}{f}$$

Quarter Wave Transformer

$\lambda/4$ T_x Line ที่มีค่า Characteristic Impedance เท่ากับ Z_0 สามารถสร้างด้วยวงจร LC ดังรูป

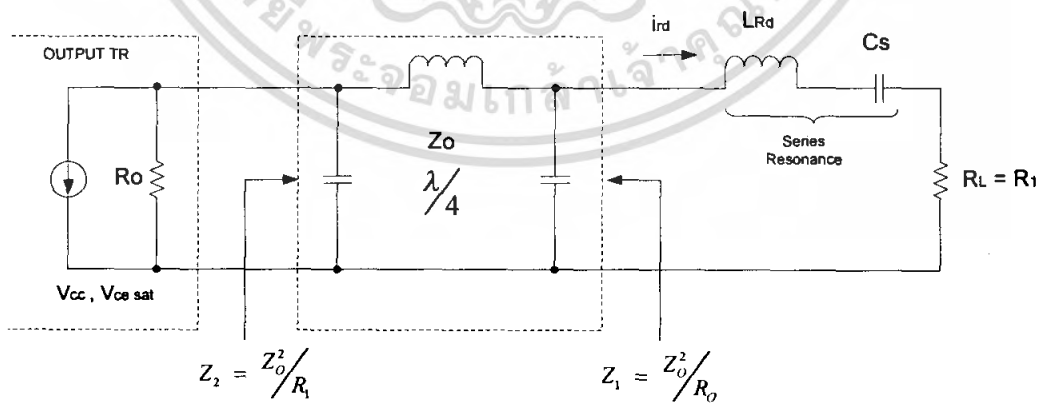


รูปที่ 37 การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์แมทซ์เมทซึ่งของสายส่งด้วยวงจร LC

โดยที่

$$L = \frac{Z_0}{2\pi f} \tag{2.13.3d}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f Z_0} \tag{2.13.3e}$$



รูปที่ 38 การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์แมทซ์เมทซึ่งของสายส่งด้วยวงจร LC (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า P_o ของ Class C Power Amp. ที่อยู่ในสถานะ Overdrive เพื่อรองรับ ASK Modulation จะมีค่าประมาณ 1.6 เท่าของ P_o ที่คำนวณจากสมการ $P_o = \frac{(V_{CC} - V_{SAT})^2}{2R_2}$ ดังนั้นจึงควรเพิ่มค่า R_2 ขึ้นไป 1.6 เท่าของ R_2 ที่คำนวณจาก $R_2 = \frac{(V_{CC} - V_{SAT})^2}{2P_o}$ ดังนั้นจะ
ได้ว่า

$$R_2 \approx \frac{(V_{CC} - V_{CE(SAT)})^2}{1.25I_{rd}^2 R_L} \approx \frac{(V_{CC} - V_{CE(SAT)})^2}{1.25P_o} \quad (2.13.3f)$$

2.14 Class C Power Amplifier

$$P_{O(MAX)} = \frac{(V_{CC} - V_{CE(SAT)})^2}{2\text{Re}\{Z_{CP}\}} \quad (2.14a)$$

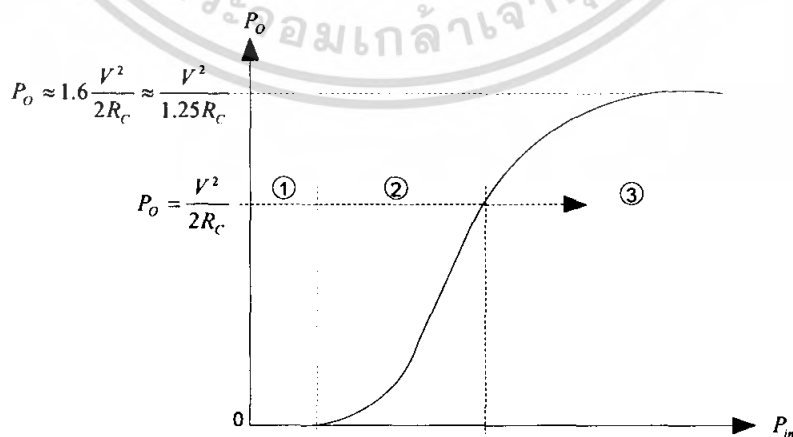
จะได้

$$R_C = \text{Re}\{Z_{CP}\} = \frac{(V_{CC} - V_{CE(SAT)})^2}{2P_{O(MAX)}} \quad (2.14b)$$

เพื่อให้สามารถ Mod เป็น ASK ได้จาก Reader \rightarrow Tag Base Drive ของ Power Amplifier: PA

จะต้องมากพอที่จะทำให้ $i_C = \frac{(V_{CC} + V_{MOD(PK)} - V_{CE(SAT)})}{\text{Re}\{Z_{CP}\}}$

ในสถานะ Unmod หรือ $V_{MOD} = 0$ ทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสถานะ overdrive คุณสมบัติของ Class C PA โดยทั่วไปจะเป็นดังรูป



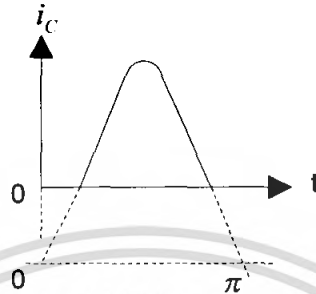
รูปที่ 39 กราฟแสดงวงจรรขยายคลาส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟวงจรรขยายคลาส C แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

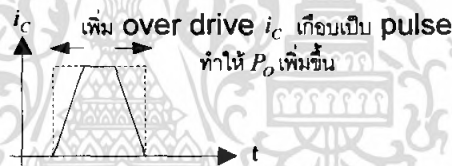
ช่วงที่ 1: P_{in} มีค่าต่ำๆ $V_{in} \leq V_{Threshold}$, $P_O \approx 0$

ช่วงที่ 2: $i_C(t)$ เป็นบางส่วนของ sine wave $\theta_{ON} < 180^\circ$



รูปที่ 40 กราฟแสดงการ drive กระแสของวงจรรขยายคลาส C

ช่วงที่ 3: เริ่ม over drive $i_C(t)$ จะมีรูปคลื่นเป็น Rectangular pulse มากขึ้น ดังรูปที่

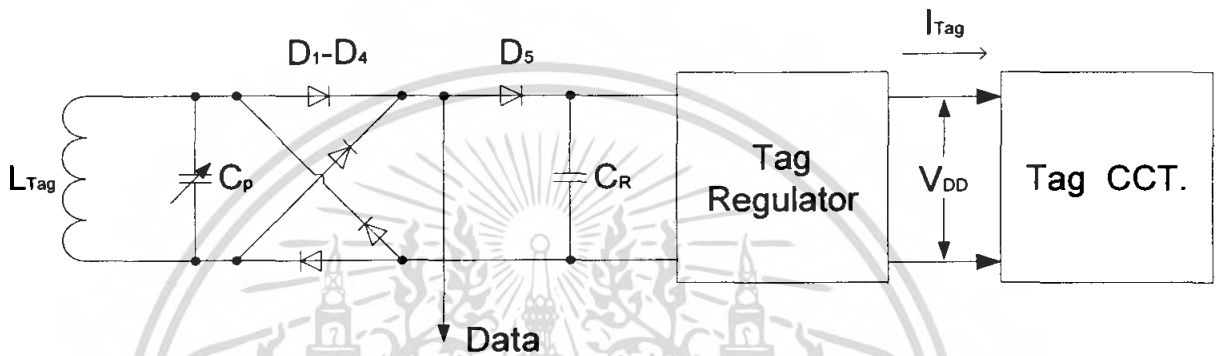


รูปที่ 41 กราฟแสดงการ drive กระแสของวงจรรขยายคลาส C ขณะเกิด overdrive

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบวงจร

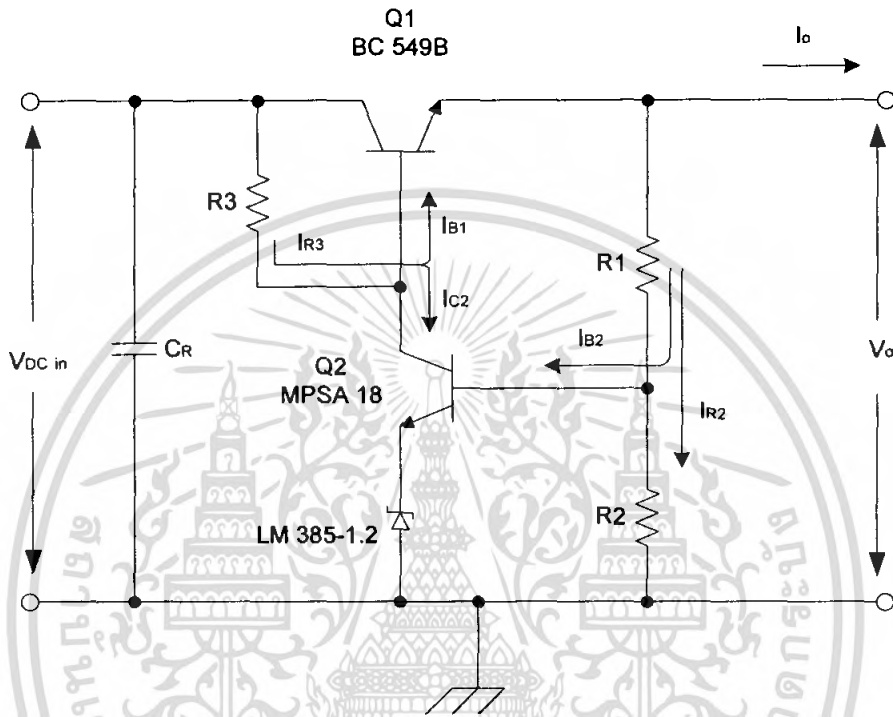
3.1 วงจร Tag



รูปที่ 42 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Tag

จากรูปแสดงให้เห็นส่วนประกอบหลักของวงจรฝั่ง Tag โดย L_{Tag} เป็นขดลวดซึ่งทำหน้าที่เป็นเสาอากาศรับ-ส่งสัญญาณระหว่าง Reader และ Tag ส่วน C_p ทำหน้าที่เป็นวงจรรีโซแนนซ์ร่วมกับ L_{Tag} ที่ความถี่ 13.56 MHz และเนื่องจาก Tag ที่ใช้เป็นชนิด Passive ไม่มีแหล่งจ่ายพลังงานอยู่ภายใน แต่จะใช้การเหนี่ยวนำพลังงาน (อยู่ในรูปของกระแสสลับ) จาก Reader ผ่านเข้ามาทาง L_{Tag} จึงจำเป็นที่จะต้องมียังวงจรเรกติไฟร์ (D_1 - D_4) เพื่อทำหน้าที่แปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรง จากนั้นจึงนำแรงดันที่ได้ไปผ่านวงจรเรกกูเลเตอร์เพื่อควบคุมแรงดันให้คงที่มากยิ่งขึ้น สำหรับ C_R เป็นตัวเก็บประจุซึ่งทำหน้าที่ลดแรงดันรีปเปิ้ลที่เกิดหลังจากการเรกติไฟร์ รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บพลังงานให้กับ Tag เนื่องจากวงจร RFID ที่ใช้เป็นแบบ Sequential Excitation ดังนั้นในขณะที่ Tag ส่งข้อมูลกลับไปยัง Reader จะไม่มีการส่งพลังงานมาจากฝั่ง Reader ดังนั้นจึงต้องใช้ C_R ทำหน้าที่เก็บพลังงานให้พอต่อการทำงานของ Tag ทั้งในขณะที่รับและส่งข้อมูลนั่นเอง

3.1.1 การออกแบบวงจร Tag Regulator



รูปที่ 43 วงจร Tag Regulator

จากรูปเป็นวงจรจ่ายแรงดันคงที่ (Regulator) ให้กับวงจรส่วนต่างๆ ของ Tag โดยใช้ทรานซิสเตอร์ Q_1 เป็นวงจรขยายกระแส และ Q_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรป้อนกลับ (Feedback) ร่วมกับ R_1 และ R_2 ซึ่งวงจรป้อนกลับจะช่วยควบคุมแรงดันและกระแสเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ ส่วน LM 385-1.2 ต่อเพื่อเพิ่มแรงดันอ้างอิงภายในรูปป้อนกลับให้มีค่ามากขึ้น และ C_2 ทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับ Tag ในขณะที่ Reader Coil OFF สำหรับขั้นตอนการออกแบบวงจรมี ดังนี้

1.) กำหนดค่า V_o

เนื่องจาก Brown Out Detect ของ PIC มีค่าประมาณ 4 V ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรกกูเลเตอร์จึงควรมีค่ามากกว่า 4 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $V_o \approx 4.3 V + \Delta V_o$ (3.1.1-1)

เมื่อ ΔV_o เป็นแรงดันริบเบิลที่เกิดจากการ discharge ของ C_2 ในขณะที่ Reader Coil OFF

ถ้ากำหนดให้ ΔV_o มีค่าประมาณ $0.5 V_{pp}$

จะได้ $V_o \approx 4.3 + 0.5 \approx 4.8 V$ (3.1.1-2)

2.) การหาค่า R_3

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน R_3 มีค่า ดังสมการ

$$I_{R3} = I_{C2 \min} + I_{B1 \max} \quad (3.1.1-3)$$

โดยที่ $I_{C2 \min}$ เป็นกระแสที่ใช้ไบอัส LM 385-1.2 ให้เกิดการเบรกควานี่ ซึ่งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า $20 \mu A$ ดังนั้นจึงกำหนดให้ $I_{C2 \min}$ มีค่าเท่ากับ $40 \mu A$ (Double for margin จากการปัดค่า R_3)

ส่วน $I_{B1 \max}$ เป็นกระแสเบสที่นำไปไบอัส Q_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$I_{B1 \max} \approx \frac{I_{O \max}}{\beta_1} \quad (3.1.1-4)$$

แต่เนื่องจากการส่งข้อมูลระหว่าง Reader กับ Tag เป็นแบบ Sequential Mode ซึ่งช่วงที่ Tag ส่งข้อมูลให้แก่ Reader Power Amp. ที่ขับ Reader Coil จะไม่ทำงาน ทำให้ไม่มีพลังงานจ่ายให้กับ Tag ดังนั้นจึงต้องเผื่อพลังงานโดยการ Charge C_2 ด้วยกระแส $I_{O \max}$ เป็น 2 เท่า เพราะฉะนั้น $I_{B1 \max}$ จึงควรมีค่าเท่ากับ

$$I_{B1 \max} \approx \frac{2I_{O \max}}{\beta_1} \quad (3.1.1-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $I_{O\ MAX}$ ที่ต้องการมีค่าประมาณ 11.5 mA และจาก Datasheet ของ BC 549B พบว่ามีค่า β ประมาณ 200 ดังนั้นจะได้ค่าของ $I_{B1\ max}$ จึงเท่ากับ

$$I_{B1\ MAX} \approx \frac{2 \times 11.5 \times 10^{-3}}{200} \approx 115\ \mu A \quad (3.1.16)$$

เพราะฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่าน R_3' จึงมีค่าเท่ากับ

$$I_{R3} = 40\ \mu A + 115\ \mu A = 155\ \mu A \quad (3.1.1-7)$$

ถ้ากำหนดให้แรงดันตกคร่อม R_3' มีค่าประมาณ 1 V ดังนั้นค่าของ R_3' จะมีค่าดังสมการ

$$R_3' \approx \frac{1V}{I_{R3}} \approx \frac{1V}{155\ \mu A} \quad (3.1.1-8)$$

จะได้ $R_3' \approx 6.45\ k\Omega$ (3.1.1-9)

แต่เนื่องจากตัวต้านทานค่าดังกล่าวไม่มี ดังนั้นจึงเลือกใช้

$$R_3 = 6.8\ k\Omega \quad (3.1.1-10)$$

3.) คำนวณค่า I_{C2} ใหม่จากค่า R_3 โดยถือว่าแรงดันตกคร่อม R_3 มีค่าเท่ากับ 1 V

จาก
$$I_{R3} = \frac{1V}{R_3} = I_{C2\ min} + I_{B1\ max} \quad (3.1.1-11)$$

จะได้
$$I_{C2\ min} = \frac{1}{6.8 \times 10^3} - I_{B1\ max} \quad (3.1.1-12)$$

แทนค่า R_3 จากสมการ 1-10 และค่า $I_{B1\ max}$ จากสมการ 1-6 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{C2 \min} = \frac{1}{6.8 \times 10^3} - 115 \mu A \quad (3.1.1-13)$$

$$I_{C2 \min} = 32 \mu A \quad (3.1.1-14)$$

จะเห็นได้ว่าค่า $I_{C2 \min}$ มีค่ามากกว่ากระแสที่ LM 385-1.2 ใช้ในการเบรกคาวน์ คือ $20 \mu A$ เนื่องจากในขั้นตอนการหาค่า R_3' ได้มีการกำหนดค่าของ $I_{C2 \min}$ ไว้ถึง $40 \mu A$ (2 เท่าของ $20 \mu A$) ดังนั้นกระแส $I_{C2 \min}$ ที่เกิดจาก R_3 จึงเพียงพอต่อการเบรกคาวน์ของ LM 385-1.2 นั่นเอง

4.) การหาค่า R_1 และ R_2

เนื่องจาก Q_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรป้อนกลับ (Feedback) ร่วมกับ R_1 , R_2 และถ้าเรา กำหนดให้ $I_{R2} \geq 20I_{B2 \max}$ ก็จะสามารถประมาณได้ว่า $I_{B2 \max}$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้น

$$1.25 + V_{BE2} = V_O \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (3.1.1-15)$$

หรือ

$$V_O \approx (1.25 + V_{BE2}) \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3.1.1-16)$$

และยังสามารถหาค่าของ R_2 ได้จาก

$$R_2' = \frac{V_Z + V_{BE2}}{I_{R2}} = \frac{1.25 + V_{BE2}}{20I_{B2 \max}} \quad (3.1.11-17)$$

โดยที่

$$V_{BE2} \approx V_T \ln \left(\frac{I_{C2 \min}}{I_S(Q_2)} \right) \quad (3.1.11-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $V_T = 26 \text{ mV}$

$I_S(Q_2)$ จาก SPICE Model ของ MPSA 18 พบว่ามีค่าประมาณ $5.911 \times 10^{-15} \text{ A}$

และค่าของ $I_{C2 \text{ min}}$ จากสมการที่ 1-14 มีค่าเท่ากับ $32 \mu\text{A}$ ดังนั้น

$$\text{จะได้ } V_{BE2} \approx 26 \times 10^{-3} \ln \left(\frac{32 \times 10^{-6}}{5.911 \times 10^{-15}} \right) \approx 0.58 \text{ V} \quad (3.1.1-19)$$

$$\text{และจาก } I_{B2 \text{ max}} = \frac{I_{C2 \text{ max}}}{\beta_2} \approx \frac{I_{R3}}{\beta_2} \quad (I_{B1} \ll I_{C2 \text{ max}}) \quad (3.1.1-20)$$

เมื่อค่า β ต่ำสุดของ MPSA 18 จาก Datasheet เท่ากับ 400

$$\text{จะได้ } I_{B2 \text{ max}} \approx \frac{155 \times 10^{-6}}{400} \approx 387.5 \text{ nA} \quad (3.1.1-21)$$

จากนั้นจึงแทนค่า V_{BE2} และ $I_{B2 \text{ max}}$ ลงในสมการที่ 1-17 ก็จะได้ค่าของ R_2' เท่ากับ

$$R_2' = \frac{1.25 + 0.58}{20 \times 387.5 \times 10^{-9}} = 236.48 \text{ k}\Omega \quad (3.1.1-22)$$

แต่เนื่องจากความต้านทานค่าดังกล่าวไม่มี ดังนั้นจึงปัดค่า R_2 ลงเพื่อให้ได้ V_O มากกว่าที่ต้องการ คือ

$$R_2 = 220 \text{ k}\Omega \quad (3.1.1-23)$$

และจากสมการที่ 1-16 ก็จะได้อัตราส่วนของ R_1/R_2 เท่ากับ

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_O}{V_{BE2} + 1.25} - 1 \quad (3.1.1-24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า V_o จากสมการ 1-2 และ V_{BE} จากสมการ 1-19 จะได้

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{4.8}{0.58+1.25} - 1 = 1.62 \quad (3.1.1-25)$$

แทนค่า R_2 จากสมการ 1-23 จะได้

$$R_1' = 220 \times 10^3 \times 1.62 = 357.05 \text{ k}\Omega \quad (3.1.1-25)$$

แต่เนื่องจากความต้านทานค่าดังกล่าวไม่มี คังนั้นจึงปิดค่า R_1 ขึ้นเพื่อให้ได้ V_o มากกว่าที่ต้องการ คือ

$$R_1 = 390 \text{ k}\Omega \quad (3.1.1-26)$$

5.) การหาค่า C_R

จากคุณสมบัติของ C $i_c = C \frac{dV}{dt}$ (3.1.1-27)

จะได้ $C_R = \frac{i_c}{dV/dt}$ (3.1.1-28)

โดยที่ i_c คือ กระแสที่ C_R discharge ด้วยอัตรา dV/dt
และถ้าสมมุติให้การ discharge ของ C_R เป็นกระแสคงที่มีค่าเท่ากับ I_o

จะได้ว่า $\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V_r(p-p)}{\Delta t_{off}}$ (3.1.1-29)

เนื่องจากช่วงเวลาที่วงจรฝั่ง Reader หยุดจ่ายพลังงาน (Δt_{off}) C_R จะต้องเก็บพลังงานเพื่อจ่ายให้กับ Tag จึงทำให้เกิดแรงดันรีปเปิ้ล (ΔV_r) ขึ้น ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นค่ามาตรฐานของการส่งข้อมูลแบบ SEQ Mode โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 3 ms

ถ้ากำหนดให้ $\Delta V_r = 1 \text{ V}$ (3.1.1-30)

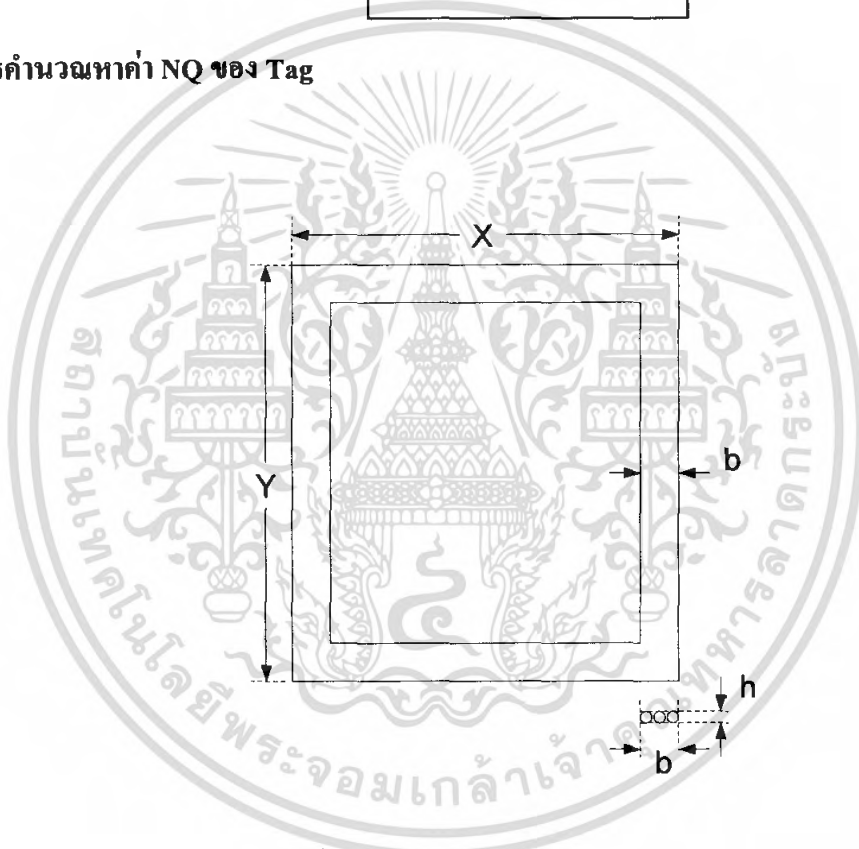
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น
$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{3ms} = 333.3 \text{ V/Sec} \quad (3.1.1-31)$$

จะได้ว่า
$$C_R \geq \frac{I_o}{333.3} \geq \frac{11.5 \times 10^{-3}}{333.3} \quad (3.1.1-32)$$

ดังนั้น
$$C_R \geq 34.50 \mu F \quad (3.1.1-33)$$

3.1.2 การคำนวณหาค่า NQ ของ Tag



รูปที่ 44 Tag Coil ชนิด Rectangular loop

Tag Coil เป็น Rectangular loop ขนาด $\approx (5 \times 8) \text{ cm}^2$ จำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ ใช้ลวด No.36 ซึ่งมีค่า Bare die (d_T) $\approx 0.36 \text{ mm}$, Total die $\approx 0.4 \text{ mm}$ ใช้งาน ณ ความถี่ใช้งาน 13.56 MHz กำหนดให้ $V_{DC IN} = 4.8 \text{ V}$ และ $I_{DC IN} = 6.75 \text{ mA}$ คำนวณหาค่า $(NI)_{rms}$ ของวงจรขับ Reader coil ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step1 หาค่าของ L_{TAG}

X : Average width of coil ≈ 5 cm

Y : Average Length of coil ≈ 8 cm

H : coil height ≈ 0.015 cm

C = $x+y+2h = 5+8+(2 \times 0.015) = 13.03$ cm

$d_T = 0.36$ mm ≈ 0.4 mm

b : width of cross section $\approx Nd_T + (N-1)0.1$ mm

N(รอบ)	1	2	3	4	5
b(cm)	0.04	0.09	0.14	0.19	0.24

จาก
$$L_{sN} = \frac{0.0276(CN)^2}{1.908C + 9b + 10h} \mu\text{H}$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวด ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 – 5 รอบ

จะได้ว่า

$$L_{s1} = \frac{0.0276(13.03 \times 1)^2}{(1.908 \times 13.03) + (9 \times 0.04) + (10 \times 0.015)} = 0.185 \mu\text{H}$$

$$L_{s2} = \frac{0.0276(13.03 \times 2)^2}{(1.908 \times 13.03) + (9 \times 0.09) + (10 \times 0.015)} = 0.726 \mu\text{H}$$

$$L_{s3} = \frac{0.0276(13.03 \times 3)^2}{(1.908 \times 13.03) + (9 \times 0.14) + (10 \times 0.015)} = 1.605 \mu\text{H}$$

$$L_{s4} = \frac{0.0276(13.03 \times 4)^2}{(1.908 \times 13.03) + (9 \times 0.19) + (10 \times 0.015)} = 2.806 \mu\text{H}$$

$$L_{s5} = \frac{0.0276(13.03 \times 5)^2}{(1.908 \times 13.03) + (9 \times 0.24) + (10 \times 0.015)} = 4.312 \mu\text{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step2 หาค่า $R_{S(AC)}$ และ $R_{P(AC)}$ ของ Tag coil

จาก
$$R_{S(AC)} \approx \frac{\rho \ell_T}{A_{AC}}$$

และ
$$R_{P(AC)} \approx R_{S(AC)}(1 + Q_u^2)$$

โดยที่ ρ : Copper Resistivity $\approx 1.7 \times 10^{-8} \Omega - m$

σ : Copper Conductivity $= \frac{1}{\rho} \approx 5.8 \times 10^7 (\Omega - m)^{-1}$

จากผลของ Skin effect :
$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{f \pi \mu \sigma}}$$

จะได้
$$\delta_{\text{copper}} \approx \frac{1}{\sqrt{13.56 \times 10^6 \times \pi \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.8 \times 10^7}} \approx 17.9 \times 10^{-6} \text{ m}$$

จาก
$$A_{AC \text{ ของวง } i} \approx \frac{\pi}{4} [d_T^2 - (d_T - 2\delta)^2]$$

$$\approx \frac{\pi}{4} [(0.36 \times 10^{-3})^2 - (0.36 \times 10^{-3} - 0.0358 \times 10^{-3})^2]$$

$$\approx \frac{\pi}{4} [(1.296 \times 10^{-7}) - (1.051 \times 10^{-7})]$$

$$\approx 1.924 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

จาก ℓ_{TN} : ความยาวของลวดทั้งหมด $\approx 2N(x + y)$

$$\ell_{T1} = (2 \times 1)(5 + 8) = 0.26 \text{ m}$$

$$\ell_{T2} = (2 \times 2)(5 + 8) = 0.52 \text{ m}$$

$$\ell_{T3} = (2 \times 3)(5 + 8) = 0.78 \text{ m}$$

$$\ell_{T4} = (2 \times 4)(5 + 8) = 1.04 \text{ m}$$

$$\ell_{T5} = (2 \times 5)(5 + 8) = 1.30 \text{ m}$$

ดังนั้น
$$R_{S(AC)} \approx \frac{\rho \ell_T}{A_{AC}} \approx \frac{1.7 \times 10^{-8} \times \ell_{TN}}{1.924 \times 10^{-8}} \approx 0.88 \times \ell_{TN}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$R_{S1(AC)} = 0.88 \times 0.26 = 0.228 \ \Omega$$

$$R_{S2(AC)} = 0.88 \times 0.52 = 0.457 \ \Omega$$

$$R_{S3(AC)} = 0.88 \times 0.78 = 0.686 \ \Omega$$

$$R_{S4(AC)} = 0.88 \times 1.04 = 0.915 \ \Omega$$

$$R_{S5(AC)} = 0.88 \times 1.30 = 1.144 \ \Omega$$

และจาก

$$Q_{uN} \approx \frac{2\pi f L_s}{R_{S(AC)}} \approx \frac{2\pi \times 13.56 \times 10^6 \times L_{SN}}{R_{SN(AC)}} \approx 8.52 \times 10^7 \times \frac{L_s}{R_{S(AC)}}$$

จะได้

$$Q_{u1} \approx 8.52 \times 10^7 \times \frac{0.185 \times 10^{-6}}{0.228} = 69.132$$

$$Q_{u2} \approx 8.52 \times 10^7 \times \frac{0.726 \times 10^{-6}}{0.457} = 135.351$$

$$Q_{u3} \approx 8.52 \times 10^7 \times \frac{1.605 \times 10^{-6}}{0.686} = 199.338$$

$$Q_{u4} \approx 8.52 \times 10^7 \times \frac{2.806 \times 10^{-6}}{0.915} = 261.28$$

$$Q_{u5} \approx 8.52 \times 10^7 \times \frac{4.312 \times 10^{-6}}{1.144} = 321.138$$

ดังนั้น

$$R_{P(AC)} \approx R_{SN(AC)} (1 + Q_{uN}^2)$$

จะได้ว่า

$$R_{p1(AC)} \approx 0.228(1 + 69.132^2) = 1089 \ \Omega$$

$$R_{p2(AC)} \approx 0.457(1 + 135.351^2) = 8372 \ \Omega$$

$$R_{p3(AC)} \approx 0.686(1 + 199.338^2) = 27.26 \ \text{k}\Omega$$

$$R_{p4(AC)} \approx 0.915(1 + 261.28^2) = 62.47 \ \text{k}\Omega$$

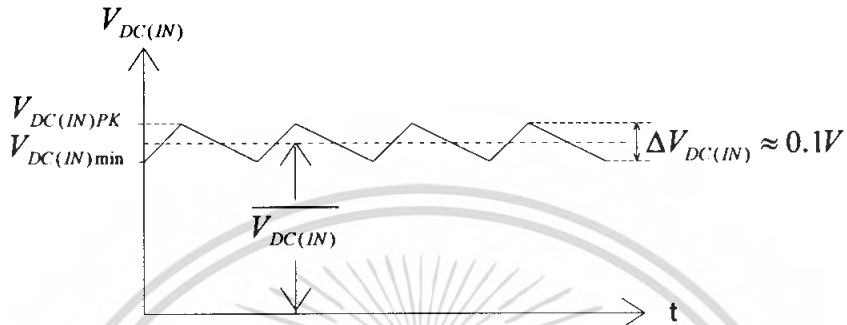
$$R_{p5(AC)} \approx 1.144(1 + 321.138^2) = 117.98 \ \text{k}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step3 หาค่า $C_{p(\text{resonance})}$, $R_{L(AC)}$, R_{TOT} , Q_L , NQ_L

$$\text{จาก } R_{TOT} \approx R_p // R_{L(AC)}$$

- หาค่า $R_{L(AC)}$



รูปที่ 45 กราฟแสดง ripple filter เพื่อใช้สำหรับการคำนวณ $R_{L(AC)}$

$$V_{DC(IN)min} = V_O + 1.7$$

โดยที่ V_O คือ แรงดันเอาต์พุตที่วงจร Tag ต้องการซึ่งมีค่าประมาณ 4.8 V
ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_{DC(IN)} &= V_{DC(IN)min} + 0.5\Delta V_{DC(IN)} \\ &= 4.8 + 1.7 + 0.1 = 6.55 \text{ V} \end{aligned}$$

จาก $P_{AC} \approx P_{DC(IN)}$,

$$\frac{V_{AC(rms)}^2}{R_{(AC)}} = V_{DC(IN)} \times I_{TAG}$$

$$V_{ACPK} \approx V_{DC(in)min} + \Delta V_{DC(IN)} + 1.5 = 8.1 \text{ V}$$

$$V_{AC(rms)} = \frac{V_{AC(PK)}}{\sqrt{2}} = 5.727 \text{ V}$$

$$R_{L(AC)} = \frac{V_{AC(rms)}^2}{P_{DC(IN)}} \approx 430 \text{ } \Omega$$

ดังนั้น

$R_{TOT1} \approx 430\Omega // 1k\Omega$	$\approx 300\Omega$
$R_{TOT2} \approx 430\Omega // 8.4k\Omega$	$\approx 400\Omega$
$R_{TOT3} \approx 430\Omega // 27.26k\Omega$	$\approx 423\Omega$
$R_{TOT4} \approx 430\Omega // 62.47k\Omega$	$\approx 427\Omega$
$R_{TOT5} \approx 430\Omega // 117.98k\Omega$	$\approx 428\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$C_p \approx \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_{sN}} \approx \frac{1}{4\pi^2 \times (13.56 \times 10^6)^2 \times L_{sN}}$$

จะได้ว่า

$$C_{p1} \approx \frac{1}{7.26 \times 10^{15} \times 0.185 \times 10^{-6}} = 744.5 \text{ pF}$$

$$C_{p2} \approx \frac{1}{7.26 \times 10^{15} \times 0.726 \times 10^{-6}} = 189.7 \text{ pF}$$

$$C_{p3} \approx \frac{1}{7.26 \times 10^{15} \times 1.605 \times 10^{-6}} = 85.82 \text{ pF}$$

$$C_{p4} \approx \frac{1}{7.26 \times 10^{15} \times 2.806 \times 10^{-6}} = 49.09 \text{ pF}$$

$$C_{p5} \approx \frac{1}{7.26 \times 10^{15} \times 4.312 \times 10^{-6}} = 31.94 \text{ pF}$$

จาก

$$BW \approx \frac{1}{2\pi C_p R_{TOT}} \approx \frac{1}{2\pi \times C_{p(\text{vary})} \times R_{TOT}} \text{ Hz}$$

จะได้

$$BW_1 \approx \frac{1}{2\pi \times 7.445 \times 10^{-10} \times 308.275} \approx 0.693 \text{ MHz}$$

$$BW_2 \approx \frac{1}{2\pi \times 1.897 \times 10^{-10} \times 408.993} \approx 2.051 \text{ MHz}$$

$$BW_3 \approx \frac{1}{2\pi \times 8.582 \times 10^{-11} \times 423.322} \approx 4.380 \text{ MHz}$$

$$BW_4 \approx \frac{1}{2\pi \times 4.909 \times 10^{-11} \times 427.060} \approx 7.591 \text{ MHz}$$

$$BW_5 \approx \frac{1}{2\pi \times 3.194 \times 10^{-11} \times 428.438} \approx 11.630 \text{ MHz}$$

จาก

$$Q_L = \frac{f_{pk}}{BW} = \frac{13.56 \times 10^6}{BW}$$

จะได้

$$Q_{L1} = \frac{13.56 \times 10^6}{0.693 \times 10^6} = 19.567$$

$$Q_{L2} = \frac{13.56 \times 10^6}{2.051 \times 10^6} = 6.611$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{L3} = \frac{13.56 \times 10^6}{4.380 \times 10^6} = 3.096$$

$$Q_{L4} = \frac{13.56 \times 10^6}{7.591 \times 10^6} = 1.786$$

$$Q_{L5} = \frac{13.56 \times 10^6}{11.630 \times 10^6} = 1.165$$

จาก $L_p = L_s \left(1 + \frac{1}{Q_U^2}\right)$

$$L_{p1} = 0.185 \times 10^{-6} \left(1 + \frac{1}{(69.132)^2}\right) = 0.185 \text{ } \mu\text{H}$$

$$L_{p2} = 0.726 \times 10^{-6} \left(1 + \frac{1}{(35.351)^2}\right) = 0.726 \text{ } \mu\text{H}$$

$$L_{p3} = 1.605 \times 10^{-6} \left(1 + \frac{1}{(199.338)^2}\right) = 1.605 \text{ } \mu\text{H}$$

$$L_{p4} = 2.806 \times 10^{-6} \left(1 + \frac{1}{(261.28)^2}\right) = 2.806 \text{ } \mu\text{H}$$

$$L_{p5} = 4.312 \times 10^{-6} \left(1 + \frac{1}{(321.138)^2}\right) = 4.312 \text{ } \mu\text{H}$$

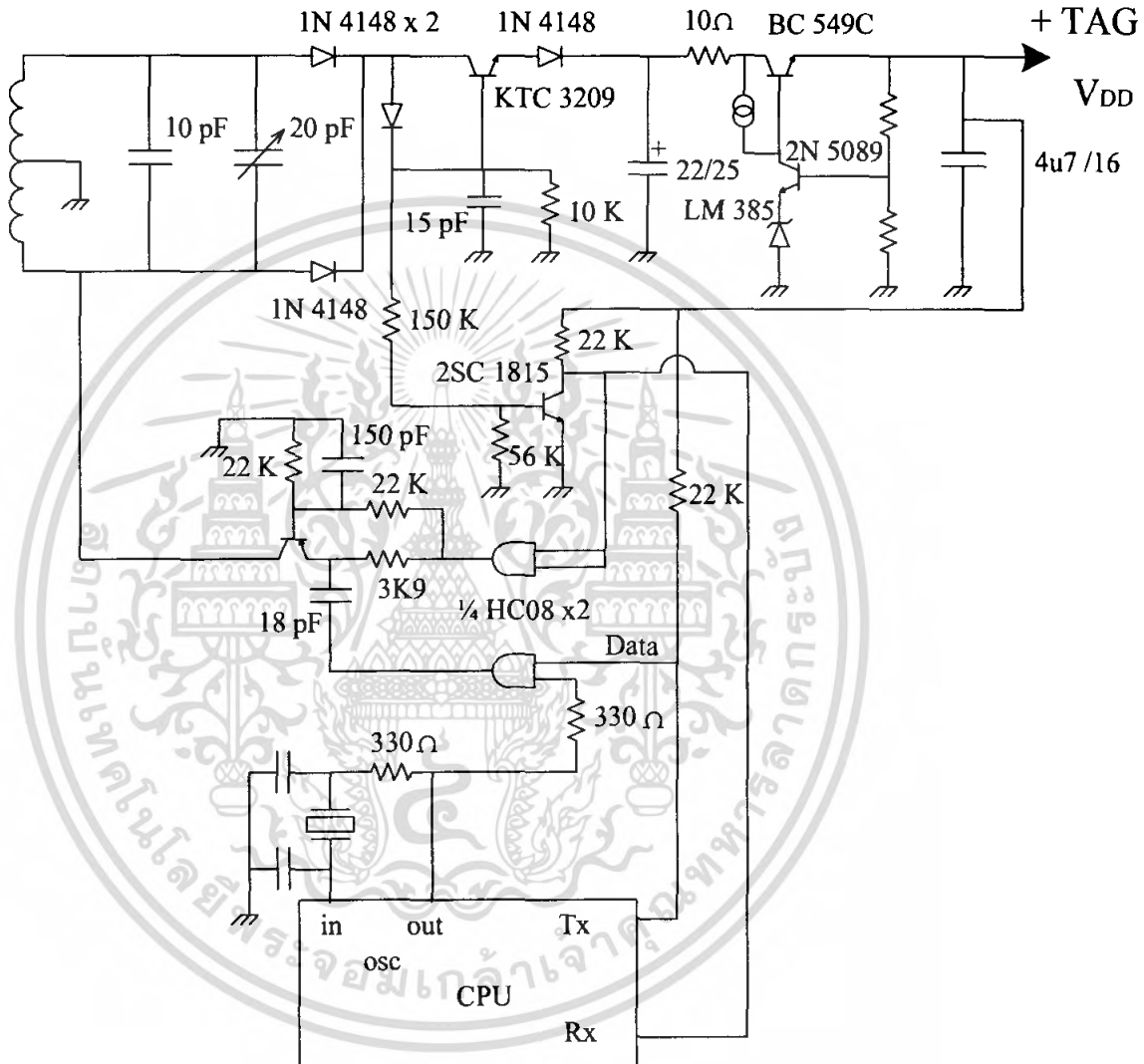
สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการหาค่า NQ ของวงจรฝั่ง Tag ได้ดังตาราง

N(turn)	b(cm)	L_s (μH)	l_T (m)	$R_{S(AC)}$ (Ω)	Q_U	L_p (μH)	C_p (pF)	$R_{P(AC)}$ (Ω)	NQ_L
1	0.04	0.185	0.26	0.228	69.132	0.185	744.5	1089	19.567
2	0.09	0.726	0.52	0.457	135.351	0.726	189.7	8372	13.222
3	0.14	1.305	0.78	0.686	199.338	1.605	85.82	27.26 k	9.288
4	0.19	2.806	1.04	0.915	261.28	2.806	49.09	62.47 k	7.144
5	0.24	4.312	1.30	1.144	321.138	4.312	31.94	117.98 k	5.825

ตารางที่ 3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของวงจร tag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วงจร Sequential Tag

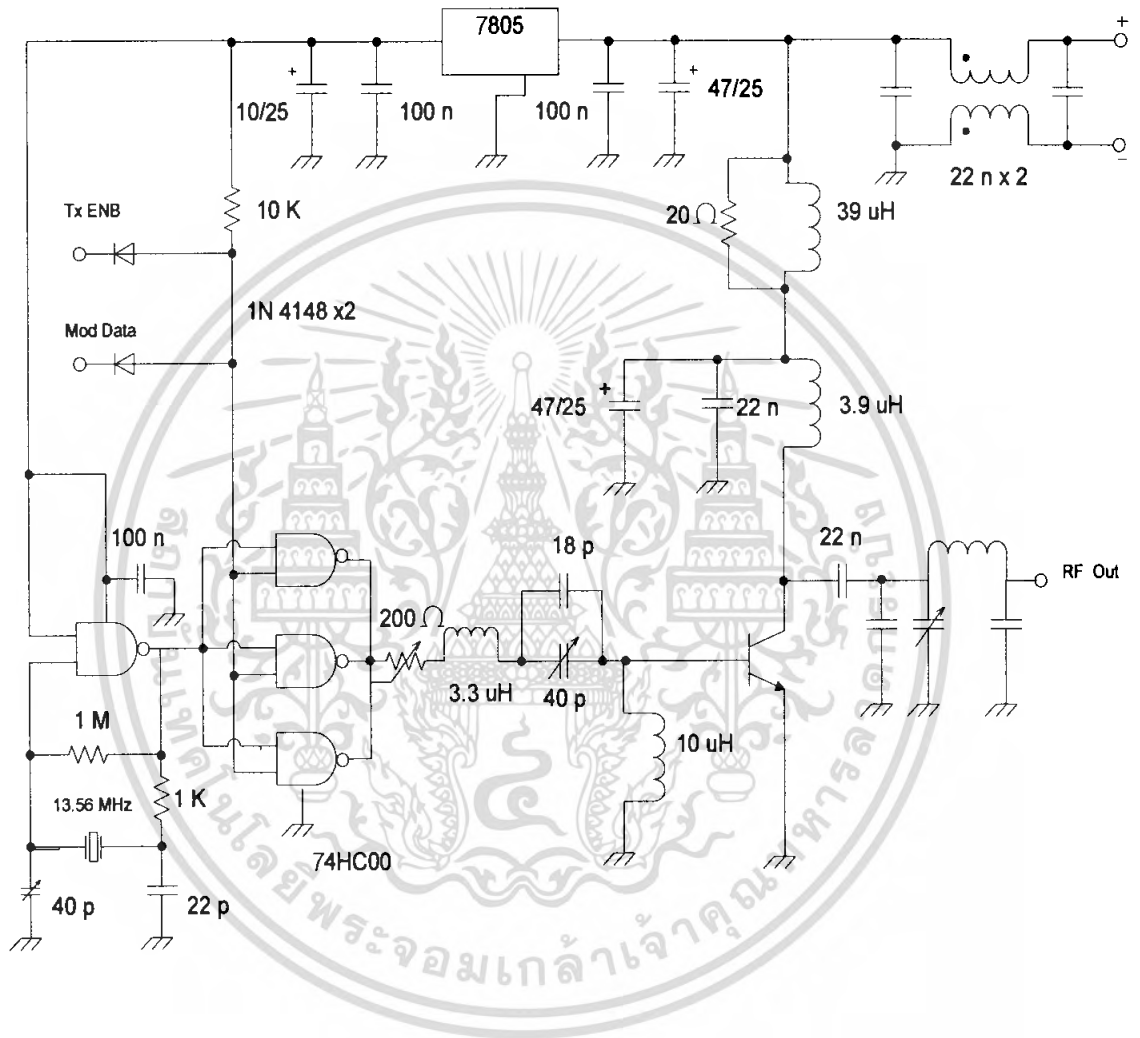


รูปที่ 46 วงจร Sequential Tag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 วงจร Reader

- Power amplifier : PA drive with modulate



รูปที่ 47 วงจรขยายกำลังด้วยการใช้ SEQ Modulate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการออกแบบ reader coil

1.) หาค่าของ $(NQ_L)_{TAG}$ เพื่อใช้ในการคำนวณค่า $(NI)_{READ}$ ในการหาค่า $(NQ)_{TAG}$ ให้ใช้ค่ากำหนด ดังนี้

$$\text{จากการคำนวณพบว่า} \quad NQ_{L TAG @ N=2} > NQ_{L TAG @ N=3}$$

เนื่องจากระบบที่ใช้เป็นแบบ Sequential Excitation ซึ่งไม่ต้องการผลของ Load Modulation จึงควรเลือกค่า $(NQ_L)_{TAG}$ ที่สูงกว่า

ดังนั้นจึงเลือก

$$N_{TAG} = 2 \text{ รอบ}$$

2.) คำนวณหาค่า $(NI)_{Reader}$ จากค่า $(NQ_L)_{TAG}$ จากข้อ 1

$$(NI)_{Rd} rms = \frac{2V_{Tag} rms (a^2 + r^2)^{1.5}}{2\pi fs \cos \alpha \mu_0 a^2 (NQ_L)_{Tag} A_{rms}} \quad (3.2.2-1)$$

กำหนดให้

$$a : \text{Read Radius} \approx 38 \times 10^{-3} m$$

$$r : \text{Read Range} \approx 0 \rightarrow 3 cm$$

$$s : \text{Read Surface} \approx (5 \times 8) cm^2 \approx 4 \times 10^{-3} m^2$$

$$V_{Tag} \approx 6 V_{rms}$$

$$NQ_L \approx 13.222$$

$$\cos \alpha = 0.9 \quad (\pm 25.8^\circ)$$

ดังนั้น

$$(NI)_{Rd} rms = \frac{2 \times 6 \times [(38 \times 10^{-3})^2 + 0.03^2]^{1.5}}{2\pi \times 13.56 \times 10^6 \times 4 \times 10^{-3} \times 0.9 \times 4\pi \times 10^{-7} \times (38 \times 10^{-3})^2 \times 13.222} \\ \approx 0.2 A_{rms}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) พัน Reader Coil โดยใช้ (3x6) นิ้ว² Loop

เนื่องจากระบบ Sequential Excitation ไม่ต้องการผลของ Load Modulation ดังนั้น จาก TAG ซึ่ง $N_{Rd} > N_{TAG}$ จึงมีความเป็นไปได้ แต่ที่ความถี่ 13.56 MHz ค่า parasitic ของ Reader Coil จะมีผลมากขึ้นเมื่อจำนวนมากขึ้น

ดังนั้นจึงเลือก

$$N_{Reader} = 2.833 \text{ รอบ}$$

ที่ 13.56 MHz ค่า L_{Rd} หาได้จาก

3.1 วัดค่า L ของ Reader Coil (L_{Rd}') ที่ความถี่ต่ำ ได้ 3.37 uH

3.2 วัดค่า Self Resonant ของ Reader Coil (f_{sp}) 37.3 MHz

3.3 หาค่า parasitic Cp

$$\text{จาก } Cp = \frac{1}{4\pi^2 f_{sp}^2 L_{Rd}'} \quad (3.2.2-2)$$

$$\text{จะได้ } Cp = 5.402 \text{ pF}$$

3.4 หาอิมพีแดนซ์ของ Reader Coil (Z_{LRd}) ที่ 13.56 MHz

$$\begin{aligned} \text{จาก } Z_{LRd} &= -j2172k // j287.1 \\ &= j392.83 \Omega \end{aligned} \quad (3.2.2-3)$$

3.5 จากค่า Z_{LRd} จะหาค่า L_{Rd} ได้จาก

$$\begin{aligned} L_{Rd} &= \frac{|Z_{LRd}(f)|}{2\pi f} \\ &= 3.87 \text{ uH} \end{aligned} \quad (3.2.2-4)$$

4.) กำหนด BW = 1.5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) จากค่า $(NI)_{\text{Read}}$ และจำนวนรอบของ Reader Coil จะได้

$$i_{\text{drive}} = i_{\text{Rd}} = \frac{(NI)_{\text{Read}}}{N_{\text{Rd}}}$$

$$= \frac{0.2}{2.833} = 0.065 \text{ A}_{\text{rms}}$$

6.) การออกแบบวงจร MATCHING

หาค่า R_L โดยสมมติ Perfect MATCH : $R_L = \pi BWL_{\text{Rd}}$

คำนวณครั้งที่ 1; $R_{L1} = \pi \times 1.5 \times 10^6 \times 3.87 \times 10^{-6} = 18.24 \Omega$

$$P_o = i_{\text{Rd}}^2 R_L = 0.065^2 \times 18.24 = 0.077 \text{ W}$$

$$R_c = \frac{[V_{\text{CC}} - V_{\text{CE SAT}}]^2}{1.25 \times P_o} = \frac{5.85^2}{1.25 \times 0.077} = 355.56 \Omega$$

Z_o ที่ MATCH ระหว่าง $355.56 \leftrightarrow 18.24$

$$Z_o = \sqrt{355.56 \times 18.24} = 80.53 \Omega$$

$$R'_{L1} = \frac{80.53^2}{2 \times 355.56} = 9.12 \Omega$$

คำนวณครั้งที่ 2; $R_{L2} = 9.12 + 18.24 = 27.36 \Omega$

$$P_o = i_{\text{Rd}}^2 R_L = 0.065^2 \times 27.36 = 0.115 \text{ W}$$

$$R_c = \frac{[V_{\text{CC}} - V_{\text{CE SAT}}]^2}{1.25 \times P_o} = \frac{5.85^2}{1.25 \times 0.115} = 238.07 \Omega$$

Z_o ที่ MATCH ระหว่าง $238.07 \leftrightarrow 27.36$

$$Z_o = \sqrt{238.07 \times 27.36} = 80.07 \Omega$$

$$R'_{L2} = \frac{80.07^2}{2 \times 238.07} = 13.68 \Omega$$

คำนวณครั้งที่ 3; $R_{L3} = (18.24 \times 2) - 13.68 = 22.8 \Omega$

$$P_o = i_{\text{Rd}}^2 R_L = 0.065^2 \times 22.8 = 0.096 \text{ W}$$

$$R_c = \frac{[V_{\text{CC}} - V_{\text{CE SAT}}]^2}{1.25 \times P_o} = \frac{5.85^2}{1.25 \times 0.096} = 285.187 \Omega$$

Z_o ที่ MATCH ระหว่าง $285.187 \leftrightarrow 22.8$

$$Z_o = \sqrt{285.187 \times 22.8} = 80.637 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R'_{L3} = \frac{80.637^2}{2 \times 285.187} = 11.40 \Omega$$

คำนวณครั้งที่4; $R_{L4} = (18.24 \times 2) - 11.40 = 25.08 \Omega$

$$P_o = i_{rd}^2 R_L = 0.065^2 \times 25.08 = .106 \text{ W}$$

$$R_c = \frac{[V_{CC} - V_{CE SAT}]^2}{1.25 \times P_o} = \frac{5.85^2}{1.25 \times 0.106} = 258.283 \Omega$$

Z_o ที่ MATCH ระหว่าง 258.283 \leftrightarrow 25.08

$$Z_o = \sqrt{258.283 \times 25.08} = 80.484 \Omega$$

$$R'_{L4} = \frac{80.484^2}{2 \times 258.283} = 12.54 \Omega$$

คำนวณครั้งที่5; $R_{L5} = (18.24 \times 2) - 12.54 = 23.94 \Omega$

$$P_o = i_{rd}^2 R_L = 0.065^2 \times 23.94 = 0.101 \text{ W}$$

$$R_c = \frac{[V_{CC} - V_{CE SAT}]^2}{1.25 \times P_o} = \frac{5.85^2}{1.25 \times 0.101} = 271.069 \Omega$$

Z_o ที่ MATCH ระหว่าง 271.069 \leftrightarrow 23.94

$$Z_o = \sqrt{271.069 \times 23.94} = 80.556 \Omega$$

$$R'_{L5} = \frac{80.556^2}{2 \times 271.069} = 11.97 \Omega$$

คำนวณครั้งที่6; $R_{L6} = (18.24 \times 2) - 11.97 = 24.51 \Omega$

$$P_o = i_{rd}^2 R_L = 0.065^2 \times 24.51 = 0.103 \text{ W}$$

$$R_c = \frac{[V_{CC} - V_{CE SAT}]^2}{1.25 \times P_o} = \frac{5.85^2}{1.25 \times 0.103} = 265.806 \Omega$$

Z_o ที่ MATCH ระหว่าง 265.806 \leftrightarrow 24.51

$$Z_o = \sqrt{265.806 \times 24.51} = 80.715 \Omega$$

$$R'_{L6} = \frac{80.715^2}{2 \times 265.806} = 12.255 \Omega$$

คำนวณครั้งที่7; $R_{L7} = (18.24 \times 2) - 12.255 = 24.225 \Omega$

$$P_o = i_{rd}^2 R_L = 0.065^2 \times 24.225 = 0.102 \text{ W}$$

$$R_c = \frac{[V_{CC} - V_{CE SAT}]^2}{1.25 \times P_o} = \frac{5.85^2}{1.25 \times 0.102} = 268.412 \Omega$$

Z_o ที่ MATCH ระหว่าง 268.412 \leftrightarrow 24.225

$$Z_o = \sqrt{268.412 \times 24.225} = 80.686 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R'_{L7} = \frac{80.686^2}{2 \times 268.412} = 12.127 \Omega$$

จะได้ $R_L \approx 12 \Omega$, $P_o \approx 102 \text{ mW}$, $Z_o \approx 80.686 \Omega$

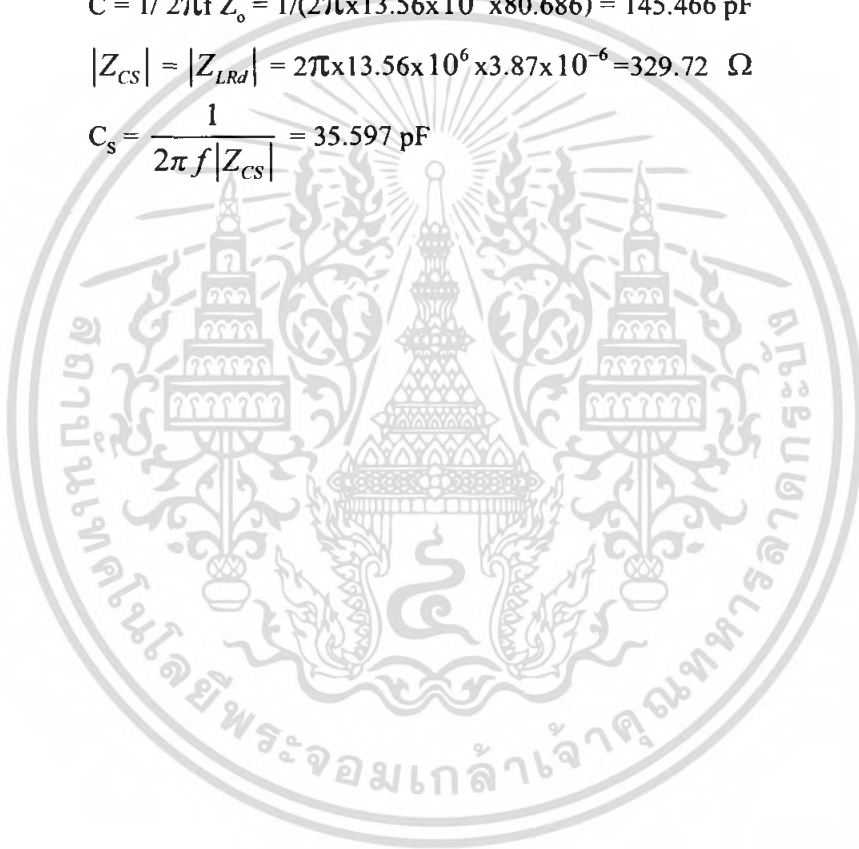
L-C $\frac{\lambda}{4}$ section ;

$$L = Z_o / 2\pi f = 80.686 / (2\pi \times 13.56 \times 10^6) = 0.947 \text{ uH}$$

$$C = 1 / 2\pi f Z_o = 1 / (2\pi \times 13.56 \times 10^6 \times 80.686) = 145.466 \text{ pF}$$

$$|Z_{CS}| = |Z_{LRd}| = 2\pi \times 13.56 \times 10^6 \times 3.87 \times 10^{-6} = 329.72 \Omega$$

$$C_s = \frac{1}{2\pi f |Z_{CS}|} = 35.597 \text{ pF}$$

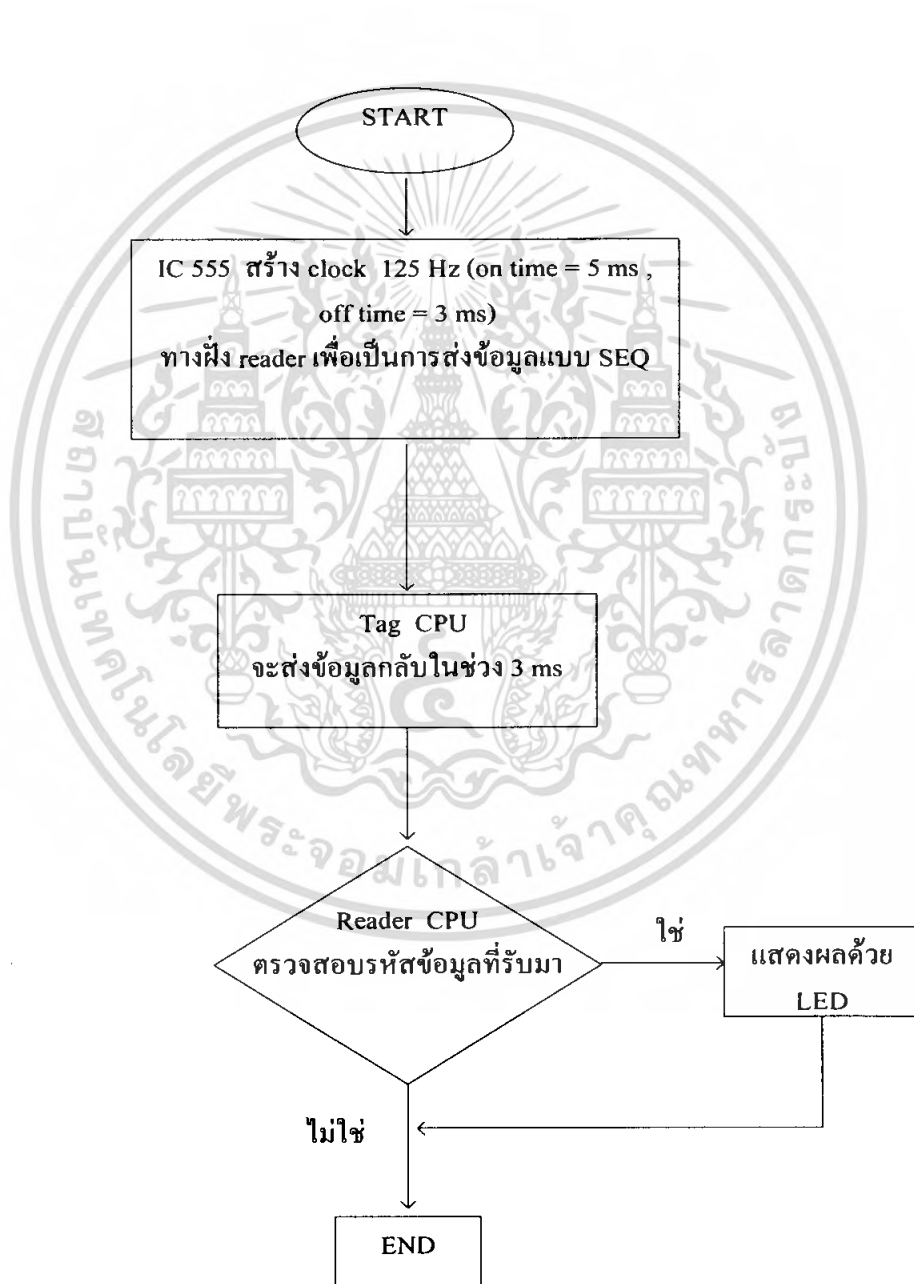


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

โปรแกรมการติดต่อสื่อสารข้อมูล

Flowchart แสดงการทำงานของโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 โปรแกรมการทำงานของ Tag CPU

```

#define _PIC16F628_
#include <16F628.h>
#define TxD PIN_B2
#define RxD PIN_B1
#define clock_sp 13550000
#define MAX_DATA_EEPROM 128
#fuses HS,NOLVP,NOWDT,NOPROTECT,NOBROWNOUT
#use delay(clock=clock_sp)
#use rs232(baud=9600,xmit=TxD,rcv=RxD)

void main()
{
int bird;
set_tris_a(0b00000010);
write_eeprom(0x01,0xCC);
bird=read_eeprom(0x01);

while (true) {
    if(input(PIN_A1))
    {
delay_ms(100);
    putc(bird);}

}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โปรแกรมการทำงานของ Reader

```

#define _PIC16F628_
#include <16F628.h>
#define TxD PIN_B2
#define RxD PIN_B1
#define clock_sp 13550000
#fuses HS,NOLVP,NOWDT,NOPROTECT,NOBROWNOUT
#use delay(clock=clock_sp)
#use rs232(baud=9600,xmit=TxD,rcv=RxD)

int password,start;
#int_rda
void int_serial() {
    password = getc();
    start = true;}
void main() {
    enable_interrupts(global);
    enable_interrupts(int_rda);
while (TRUE) {
    if (start == true)
        { start=false;
        if(password==0xCC){
            output_high(PIN_A0);
            output_high(PIN_A1);
            output_high(PIN_A2);
            output_high(PIN_A3);
            delay_ms(500);
            output_low(PIN_A0);
            output_low(PIN_A1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_low(PIN_A2);
output_low(PIN_A3);
delay_ms(500);
output_high(PIN_B4);
output_high(PIN_B5);
output_high(PIN_B6);
output_high(PIN_B7);
delay_ms(500);
output_low(PIN_B4);
output_low(PIN_B5);
output_low(PIN_B6);
output_low(PIN_B7);
delay_ms(1000);
}
}
}
}
}

```

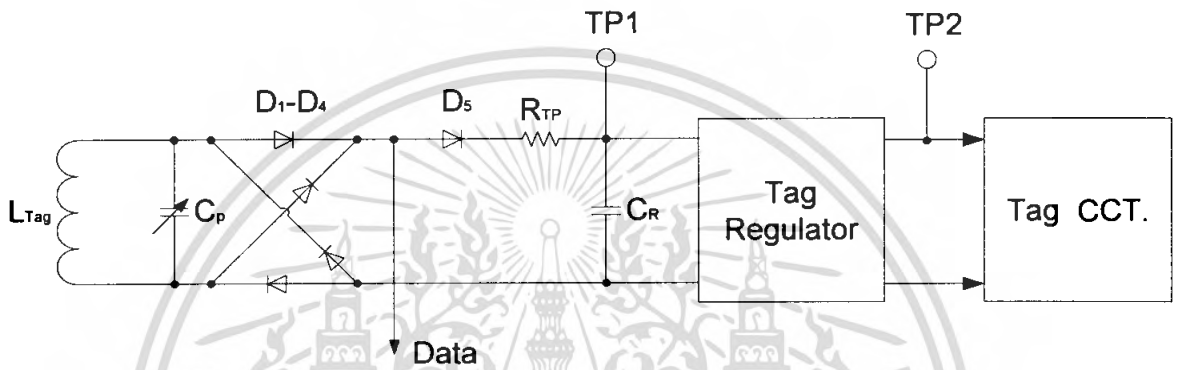


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลอง และบันทึกผล

วิธีการทดลอง



รูปที่ 49 วงจร Tag ที่ใช้ในการทดลองเหนี่ยวนำแรงดัน

ทำการทดลอง จ่ายแรงดัน 12 โวลต์ ให้กับวงจรฝั่ง Reader coil แล้ววัดค่าแรงดันของวงจร Tag Coil ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำแรงดันได้จาก Reader Coil ที่ระยะทาง 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 cm

โดยที่ ทำการวัดค่าแรงดัน 2 ตำแหน่ง คือ 1.จุด Test Point (TP1) 2. หลังจุด Voltage Regulate (TP2) ใช้ค่า $R_L = 707, 1.42 \text{ k}, 2.8 \text{ k}\Omega$ และ No Load ($R_L = \infty$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกผลการทดลอง

วงจรรักษาระดับแรงดัน

ตารางที่ 5.1 $R_L = 470 \Omega$

V_{in} (V)	I_{in} (mA)	V_{Reg} (V)	I_{out} (mA)
4.8	7.29	3.39	7.21
5.0	7.94	3.69	7.85
6.0	10.00	4.64	9.87
7.0	10.81	4.99	10.62
9.0	10.81	4.99	10.62
12.0	10.81	4.99	10.62
15.0	10.81	4.99	10.62
18.0	10.81	4.99	10.62

ตารางที่ 5.2 $R_L = 1 k\Omega$

V_{in} (V)	I_{in} (mA)	V_{Reg} (V)	I_{out} (mA)
4.8	3.51	3.50	3.50
5.0	3.74	3.73	3.73
6.0	4.77	4.75	4.75
7.0	5.11	5.02	5.02
9.0	5.11	5.02	5.02
12.0	5.11	5.02	5.02
15.0	5.11	5.02	5.02
18.0	5.11	5.02	5.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

V_{in} (V)	I_{in} (mA)	V_{Reg} (V)	I_{out} (mA)
4.8	1.81	3.61	1.81
5.0	1.90	3.79	1.90
6.0	2.38	4.73	3.37
7.0	2.60	5.02	2.51
9.0	2.60	5.02	2.51
12.0	2.60	5.02	2.51
15.0	2.60	5.02	2.51
18.0	2.60	5.02	2.51

ตารางที่ 5.4 $R_L = \infty$ (No Load)

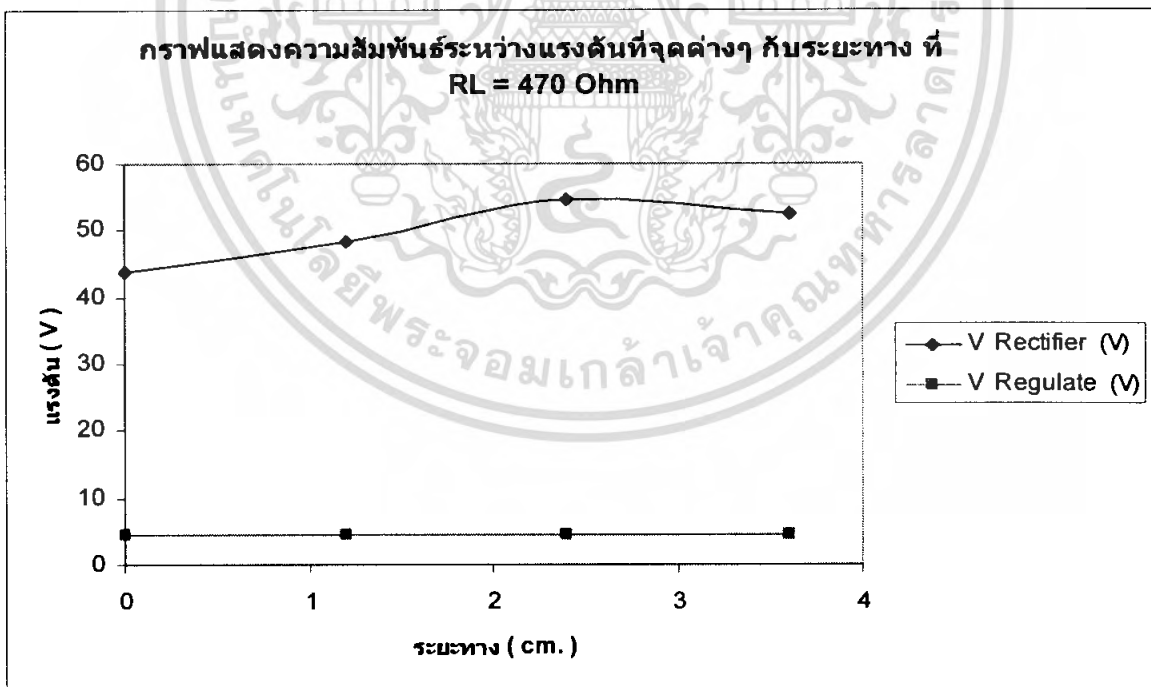
V_{in} (V)	I_{in} (mA)	V_{Reg} (V)	I_{out} (mA)
4.8	0.00	3.75	0.00
5.0	0.00	3.95	0.00
6.0	0.02	4.88	0.00
7.0	0.08	5.04	0.00
9.0	0.08	5.04	0.00
12.0	0.08	5.04	0.00
15.0	0.08	5.04	0.00
18.0	0.08	5.04	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ระยะต่างๆ

ตารางที่ 5.5 : $P_{O(Reader)} = 3 \text{ W}$, $R_L = 470 \Omega$

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	43.80	4.49
1.2	48.30	4.44
2.4	54.50	4.40
3.6	52.50	4.40

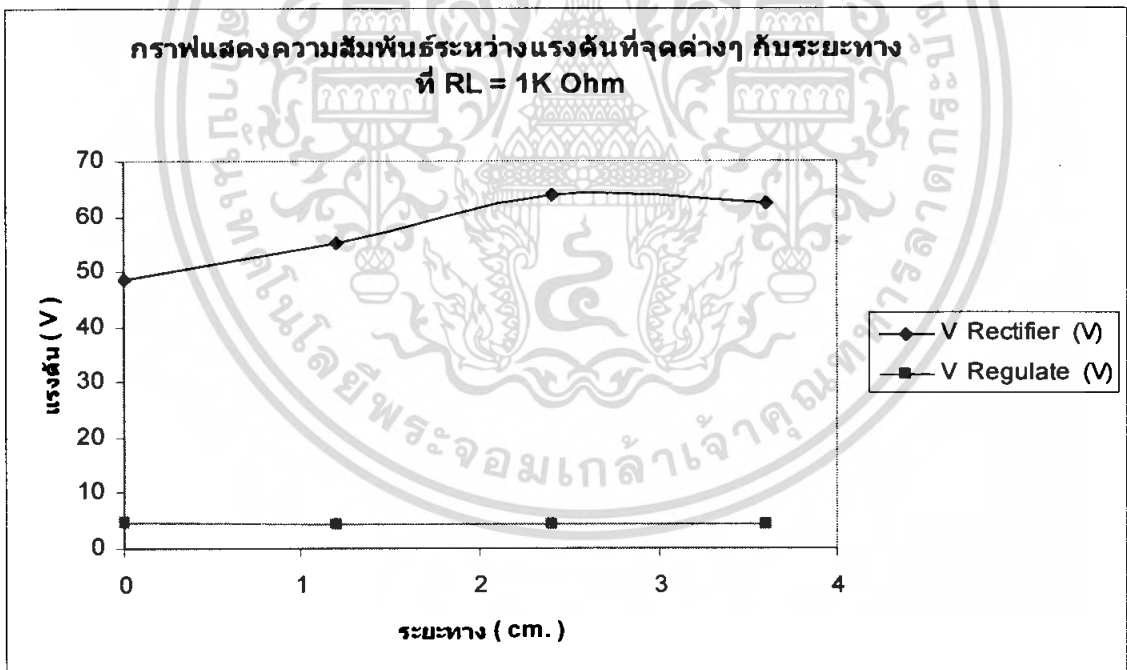


รูปที่ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 470 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 : $P_{O(Reader)} = 3 \text{ W}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	48.70	4.56
1.2	55.10	4.52
2.4	63.70	4.40
3.6	62.40	4.39

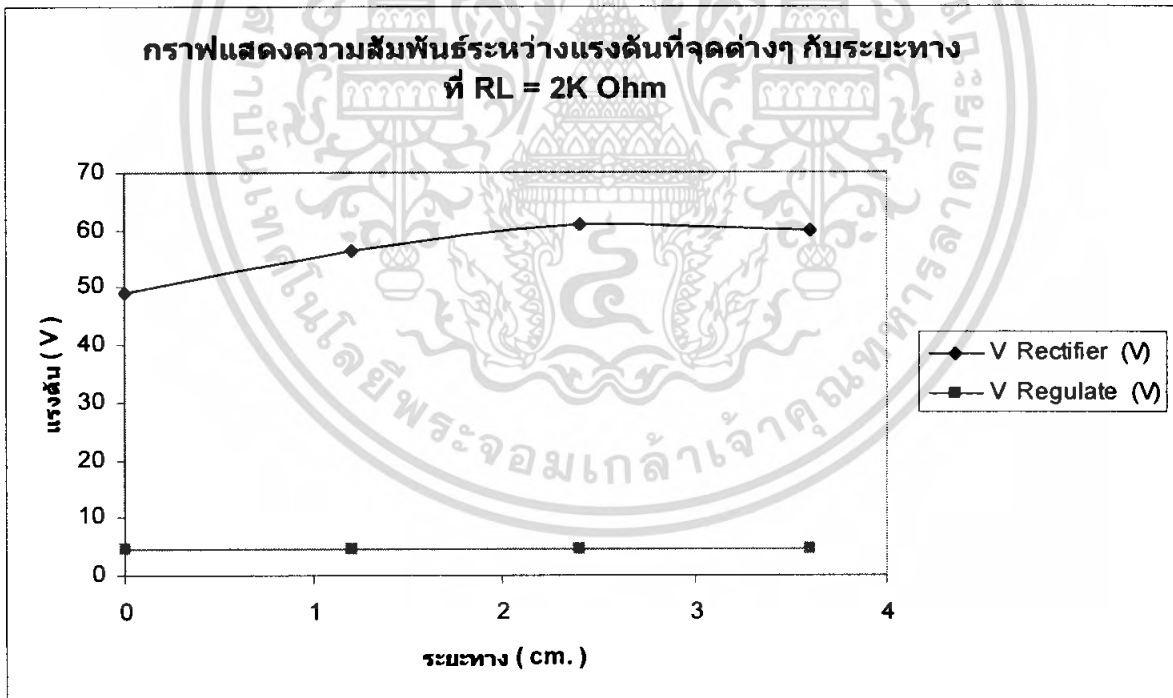


รูปที่ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 1 \text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 : $P_{O(Reader)} = 3 \text{ W}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	49.00	4.57
1.2	56.30	4.56
2.4	61.00	4.50
3.6	60.00	4.40

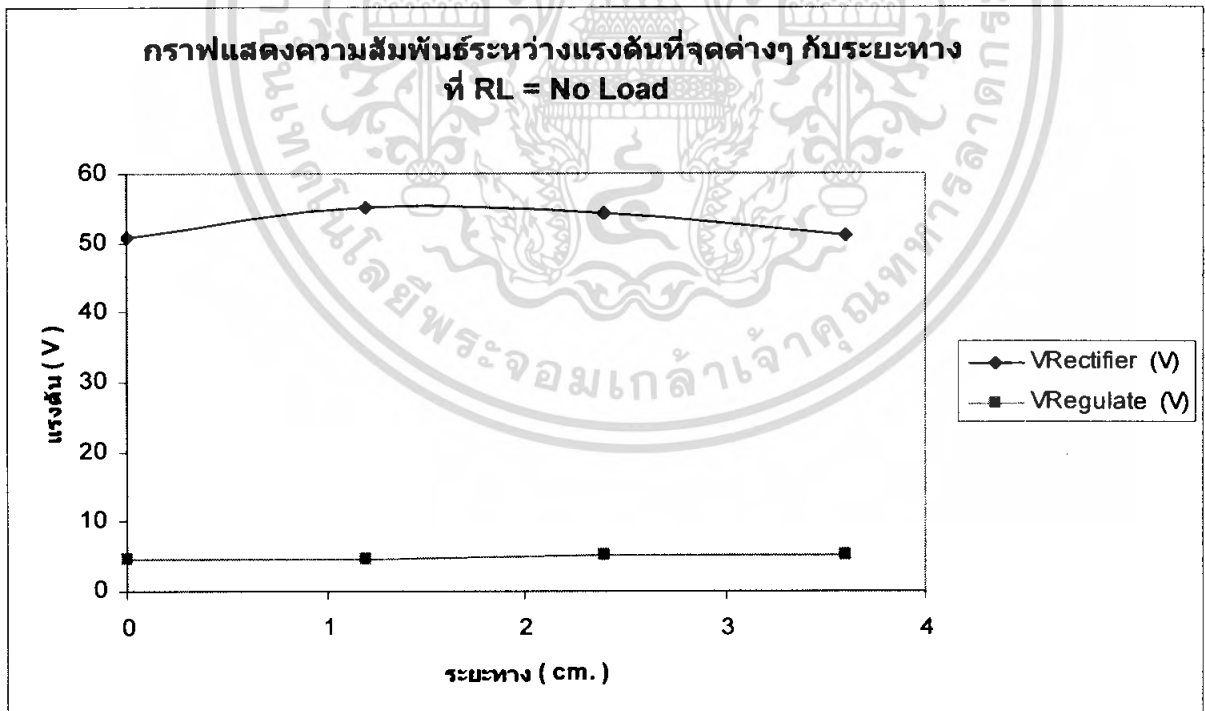


รูปที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 : $P_{O(Reader)} = 3 \text{ W}$, $R_L = \infty$ (No Load)

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	50.80	4.68
1.2	55.00	4.57
2.4	54.10	5.05
3.6	51.20	5.05

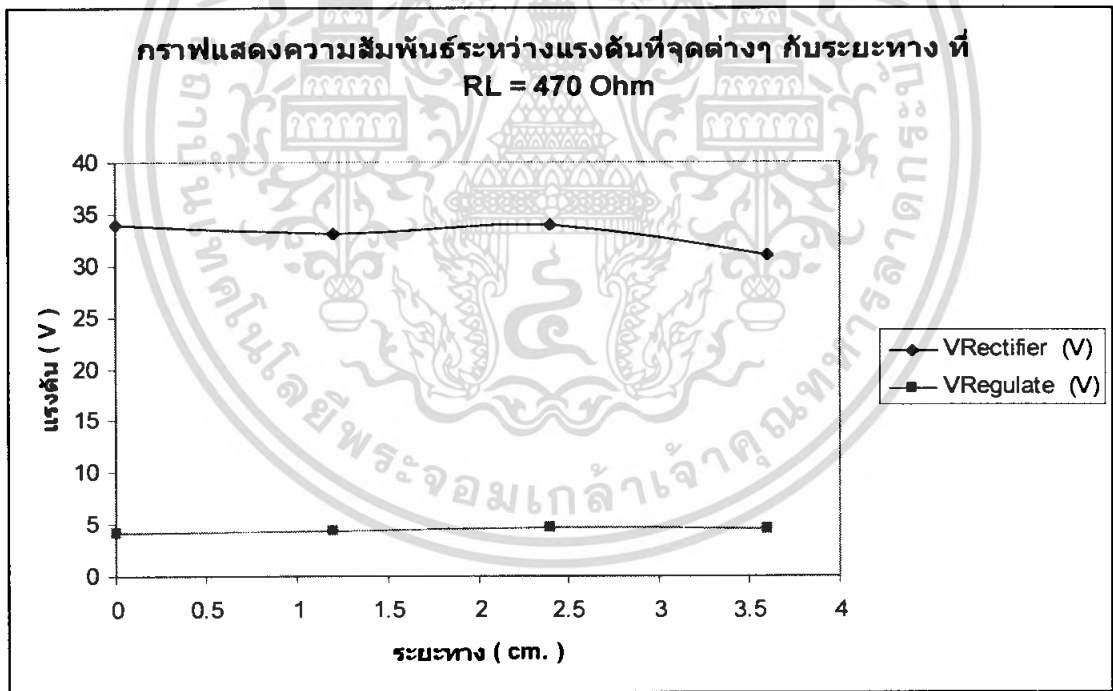


รูปที่ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = \infty$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 : $P_{O(Reader)} = 750 \text{ mW}$, $R_L = 470 \Omega$

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	34	4.20
1.2	33	4.34
2.4	34	4.65
3.6	31	4.57

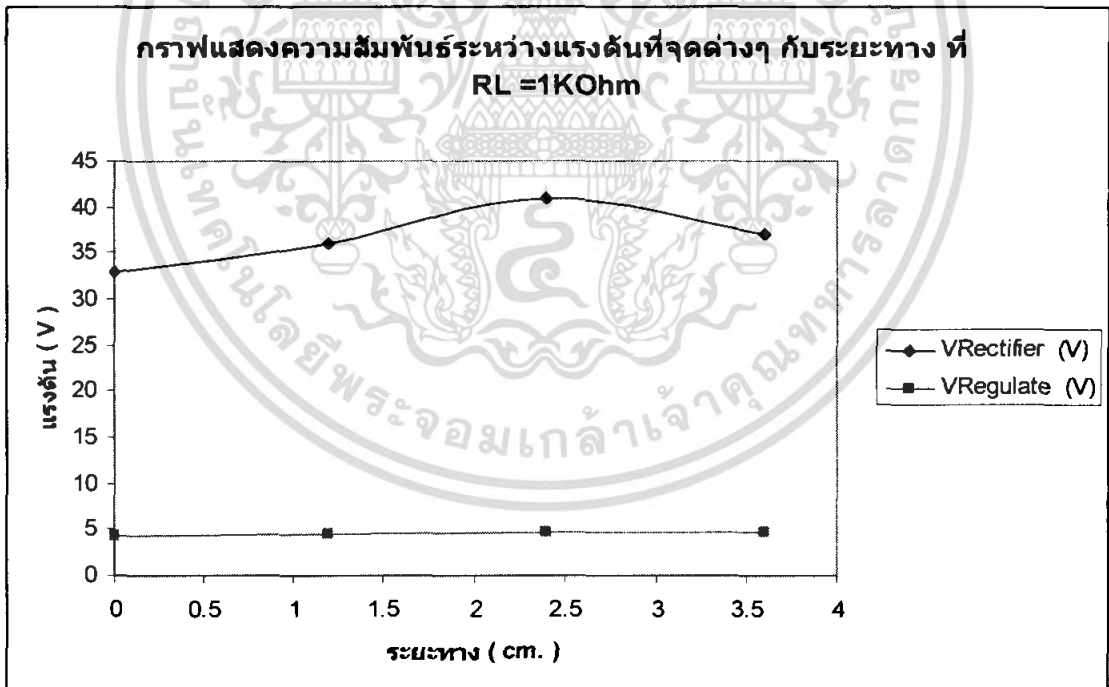


รูปที่ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 470 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 : $P_{O(Reader)} = 750 \text{ mW}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	33	4.34
1.2	36	4.42
2.4	41	4.66
3.6	37	4.60

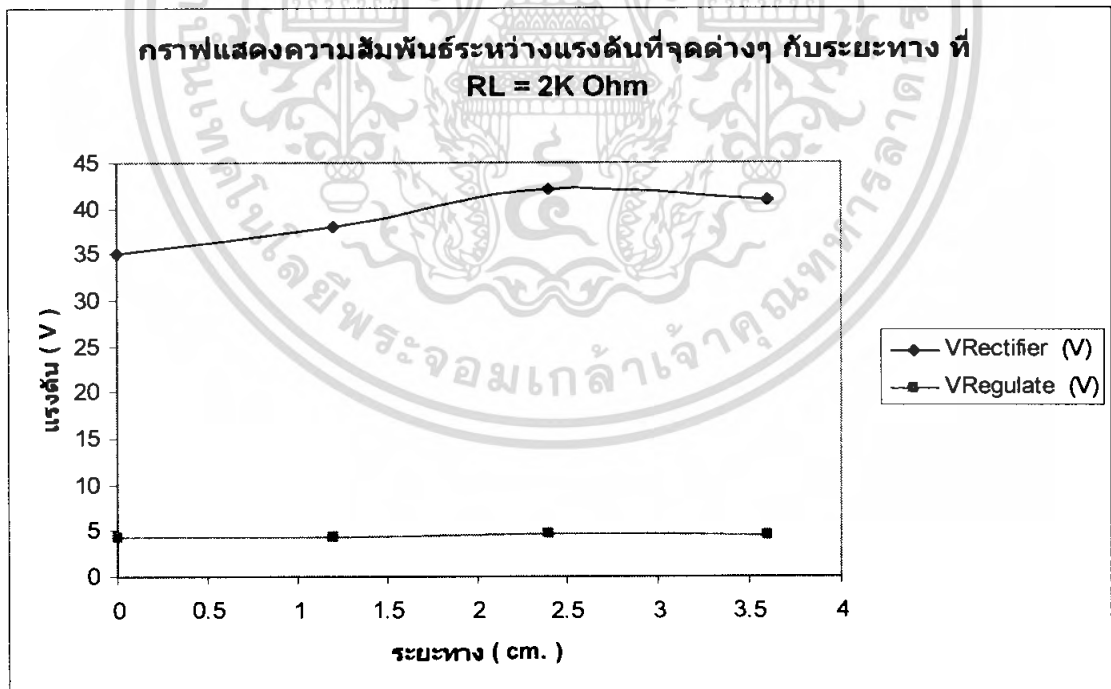


รูปที่ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 1 \text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 : $P_{O(Reader)} = 750 \text{ mW}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	35	4.20
1.2	38	4.34
2.4	42	4.65
3.6	41	4.57

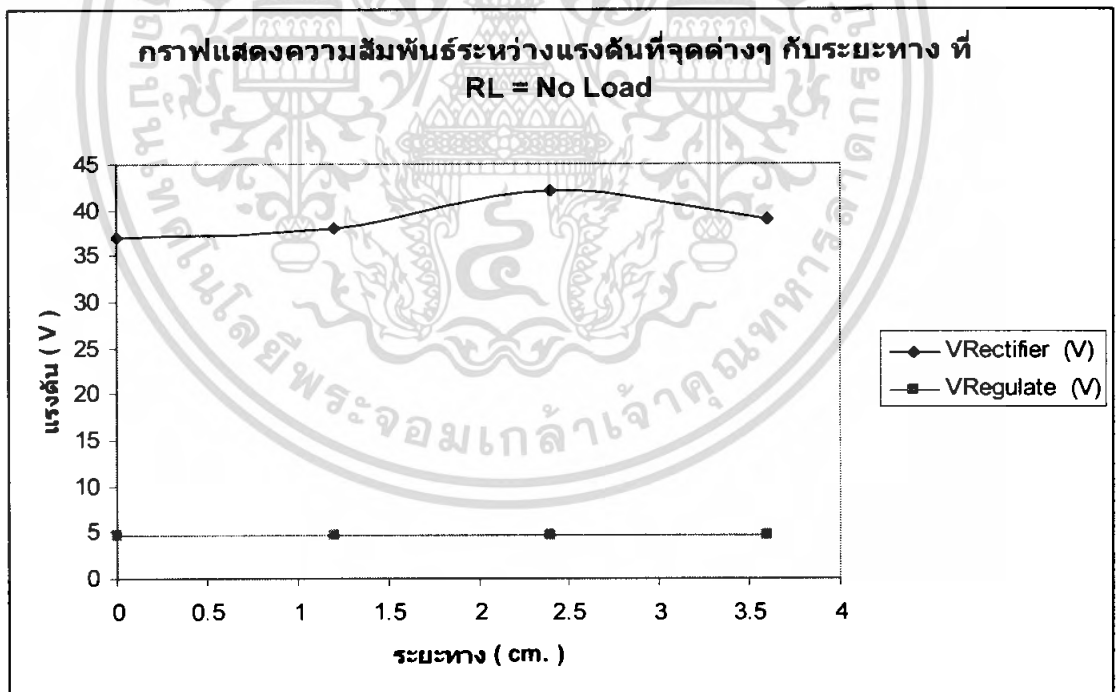


รูปที่ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 : $P_{O(Reader)} = 750 \text{ mW}$, $R_L = \text{No Load}$

ระยะ (cm.)	$V_{\text{Rectifier}}$ (V)	V_{Regulate} (V)
0	37	4.60
1.2	38	4.67
2.4	42	4.70
3.6	39	4.68



รูปที่ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จุดต่างๆ กับระยะทางที่ $R_L = \infty$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ

- สัญญาณที่เหนี่ยวนำจาก Reader Coil จากการทำงานเป็น Sequential โดยมี on time = 3ms และ off time = 5 ms



รูปที่ 58 สัญญาณที่วัดได้จาก reader coil จากการทำงานแบบ Sequential

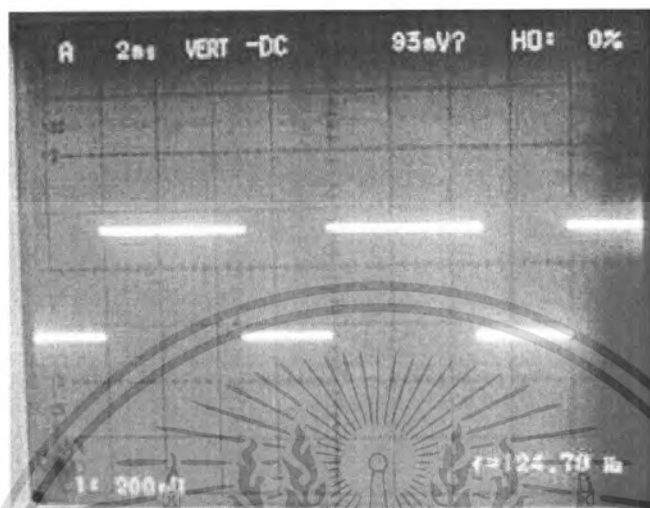
- สัญญาณที่ออกจาก comparator



รูปที่ 59 สัญญาณที่ออกจากขาคอมพารเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ Tx ซึ่งสร้างจาก IC 555 เพื่อใช้สำหรับควบคุมการ on/off ของ Power Amplifier



รูปที่ 60 สัญญาณ Tx

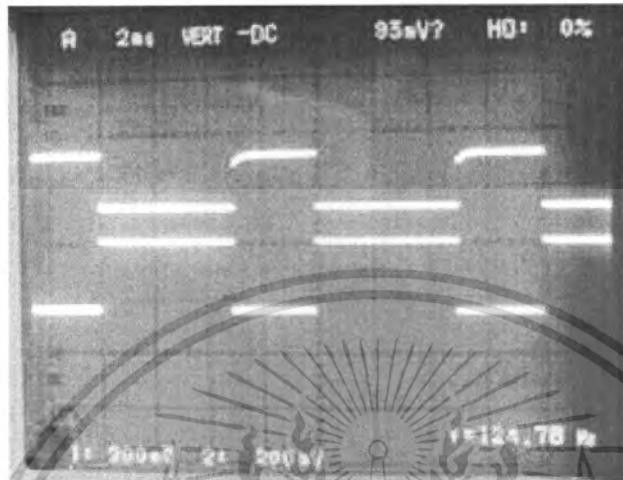
- สัญญาณ Tx ใช้สำหรับการควบคุมช่วงเวลาการดีมอดูเลท



รูปที่ 61 สัญญาณ Tx

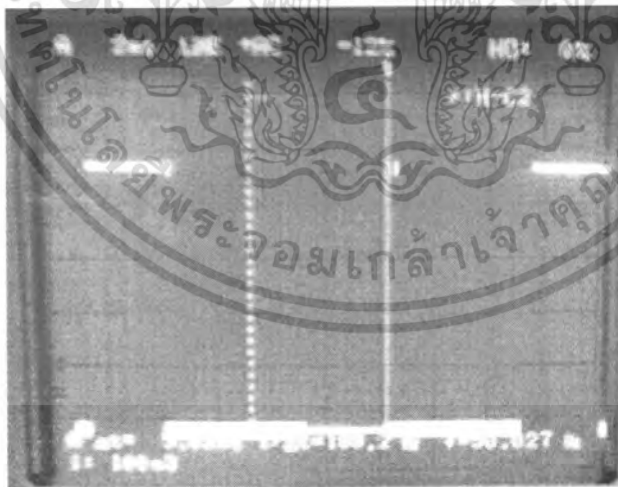
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ Tx และ $\overline{\text{Tx}}$ กลับเฟสกันเพื่อใช้ควบคุมวงจรถ่ายให้ทำงานสัมพันธ์กัน



รูปที่ 62 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง Tx กับ $\overline{\text{Tx}}$

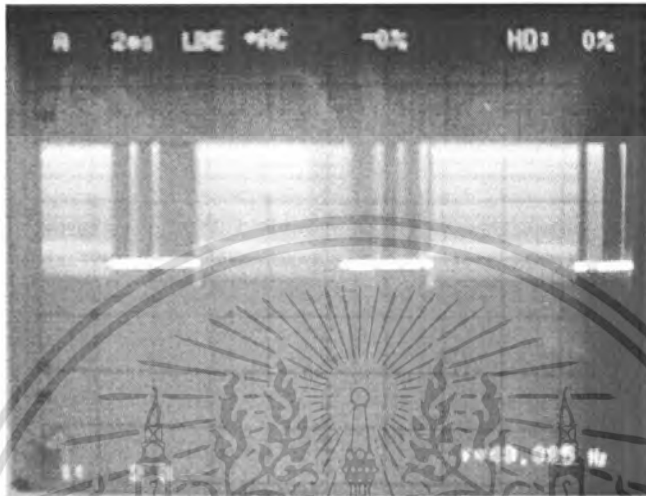
- สัญญาณ input ของ MCU ฝั่ง Reader ขณะที่ยังไม่มี Data จาก Tag



รูปที่ 63 สัญญาณ input ของ MCU ฝั่ง Reader ขณะที่ยังไม่มี Data จาก Tag

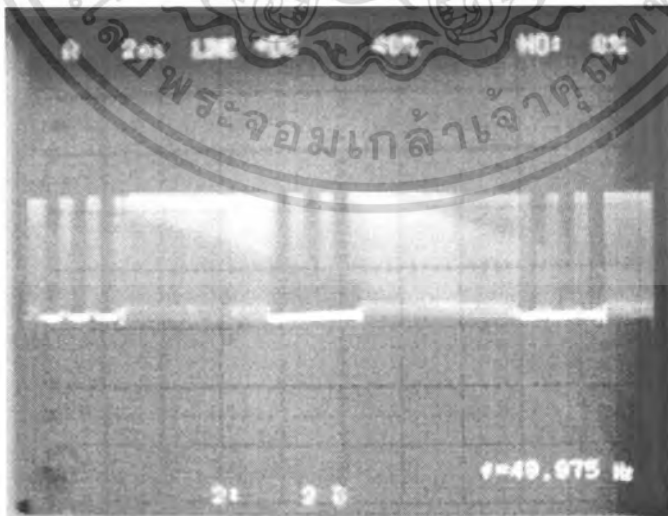
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ input ของ MCU ฟัง Reader ขณะที่มี Data จาก Tag โดยระยะห่างของ Reader กับ Tag คือ 0 cm. (ระยะไกลที่สุดที่สามารถเห็นขบวนนำได้)



รูปที่ 64 ระยะไกลที่สุดระหว่าง reader กับ tag ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้

- สัญญาณ input ของ MCU ฟัง Reader ขณะที่มี Data จาก Tag โดยระยะห่างของ Reader กับ Tag คือ 4.0 cm. (ระยะไกลที่สุดที่สามารถเห็นขบวนนำได้)



รูปที่ 65 ระยะไกลที่สุดระหว่าง reader และ tag ที่สามารถส่งข้อมูลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิเคราะห์และ สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการ drive power ที่ฝั่ง Reader coil ทั้ง 2 ค่า คือที่ 750 mW และ 3W นั้นวงจรรักษาระดับแรงดันยังสามารถรักษาระดับแรงดันได้เพียงพอกับความต้องการของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรอื่นๆ (4.3V - 4.8 V) แต่ถ้า drive power ลดลงก็จะมีผลกระทบต่อระยะทางการสื่อสารลดลงด้วย เนื่องจาก กำลังงานที่ Tag หนึ่งขวนำได้นั้นลดลง ซึ่งทำให้วงจรรักษาระดับแรงดันไม่สามารถรักษาระดับแรงดันได้ จากกราฟแสดงผลการทดลอง Read range ระหว่าง Reader – Tag มีค่าได้สูงสุดประมาณ 3.5 – 4 cm

การวัดคุณสมบัติของวงจรรักษาระดับแรงดัน จากค่า % Load Regulation และ % Line Regulation โดยพิจารณาเทียบกับ R full load = 417 ohm (ใช้ค่า 470 ohm) ได้ค่าเท่ากับ 0.992 % และ 32% ตามลำดับ แสดงถึงว่า วงจรรักษาระดับแรงดันนี้สามารถรักษาระดับแรงดันได้ดี ถึงแม้โหลดเปลี่ยนแปลง แต่ทว่าประสิทธิภาพในการรักษาระดับแรงดันจะลดลง ถ้าแรงดันที่ป้อนมานั้นเปลี่ยนแปลงไปมาก ซึ่งจะมีผลต่อแรงดันที่ได้จากการ regulate

เมื่อทำการติดต่อสื่อสารโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมจาก Reader ไปยัง Tag จะเห็นว่าพลังงานที่ถูกเหนี่ยวนำไปยัง Tag นั้นเป็นไปตามที่ต้องการคือ กำหนดช่วงการทำงานได้ 5 มิลลิวินาที และหยุดทำงาน 3 มิลลิวินาที ส่วนข้อมูลที่ Tag ส่งมายัง Reader นั้นสามารถคิ่มข้อมูลได้แต่ไม่สมบูรณ์มากนักจึงทำให้ไม่สามารถแสดงผลได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อนำสายโพรบมาทำการวัดสัญญาณมีผลทำให้สามารถแสดงผลได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าตัวเก็บประจุที่มีอยู่ในสายโพรบช่วยกำจัดสัญญาณรบกวนไปได้ และระยะไกลที่สุดที่สามารถส่งข้อมูลได้ คือ 4 cm

บรรณานุกรม

1. ดร.สิทธิชัย โกโคยอุดม . “วงจรป้อนกลับแบบลบและออสซิลเลเตอร์” . กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีมหานคร,2549
2. ลัญฉกร วุฒิสัทธาภักดิ์ . “หลักการไฟฟ้าสื่อสาร” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2546
3. ประจัน พลังสันติกุล “เรียนรู้และใช้งาน ccs complier” อินโนเวตีฟ เอ็ดจิวเทนเมนท์ จำกัด
4. Klaus Finkenzeller. “RFID Handbook”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NEC

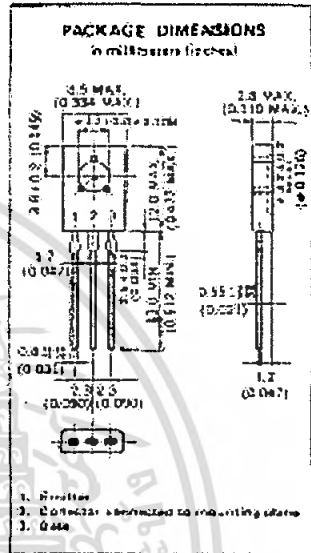
NPN SILICON POWER TRANSISTOR 2SD882

DESCRIPTION The 2SD882 is NPN silicon transistor suited for the output stage of 3 watts audio amplifier, voltage regulator, DC-DC converter and relay driver.

- FEATURES**
- Low saturation voltage, $V_{CE(sat)} \leq 0.5 \text{ V}$ ($I_C = 2 \text{ A}$, $I_B = 0.2 \text{ A}$)
 - Excellent h_{FE} linearity and high h_{FE}, $h_{FE} = 60 \text{ to } 400$ ($V_{CE} = 2 \text{ V}$, $I_C = 1 \text{ A}$)
 - Less clamping source required due to small and thin package and reducing the trouble for attachment to a radiator. No insulator bushing required.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

- Maximum Temperatures
 Storage Temperature -55 to +150 °C
 Junction Temperature 150 °C Maximum
- Maximum Power Dissipations
 Total Power Dissipation (T_a = 25 °C) 1.0 W
 Total Power Dissipation (T_c = 25 °C) 1.0 W
- Maximum Voltages and Currents (T_a = 25 °C)
 V_{CEO} Collector to Base Voltage 40 V
 V_{CSO} Collector to Emitter Voltage 30 V
 V_{EB0} Emitter to Base Voltage 5.0 V
 I_{C(PCM)} Collector Current (D.C.) 3.0 A
 I_{C(sat)} Collector Current (sat.) 7.0 A
- *Pulse Test: PW ≤ 350 μs, Duty Cycle ≤ 2 %



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_a = 25 °C)

SYMBOL	CHARACTERISTIC	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	TEST CONDITIONS
h _{FE1}	DC Current Gain	30	150			V _{CE} = 2.0 V, I _C = 20 mA**
h _{FE2}	DC Current Gain	60	150	400		V _{CE} = 2.0 V, I _C = 1.0 A**
f _T	Gain Bandwidth Product	20			MHz	V _{CE} = 5.0 V, I _C = 0.1 A
C _{ob}	Output Capacitance	45			pF	V _{CE} = 10 V, I _C = 0.1 = 10 MHz
I _{CSO}	Collector Cutoff Current		1.0		μA	V _{CE} = 30 V, I _E = 0
I _{ES0}	Emitter Cutoff Current		1.0		μA	V _{EB} = 3.0 V, I _C = 0
V _{CE(sat)}	Collector Saturation Voltage	0.3	0.5		V	I _C = 3.0 A, I _B = 0.2 A**
V _{BE(sat)}	Base Saturation Voltage	1.0	2.0		V	I _C = 2.0 A, I _B = 0.2 A**

**Pulse Test: PW ≤ 350 μs, Duty Cycle ≤ 2 %

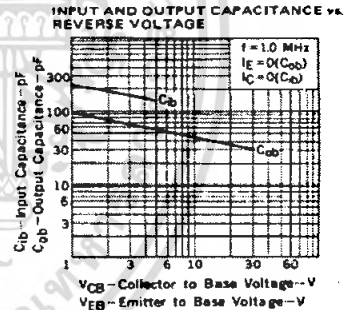
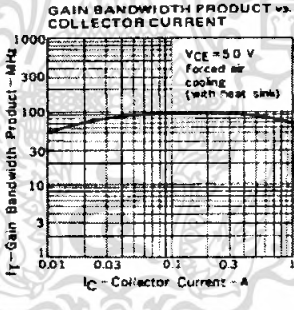
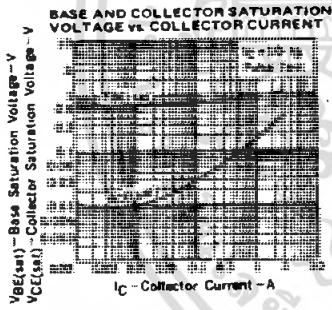
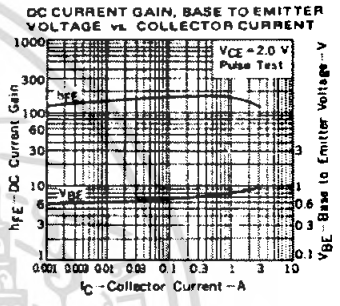
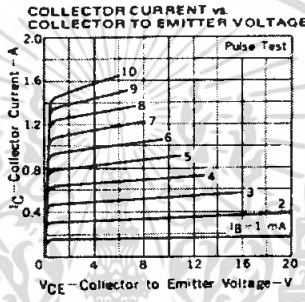
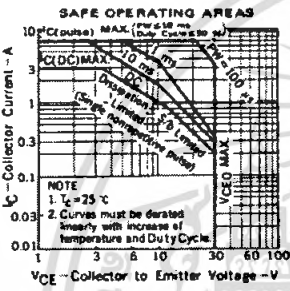
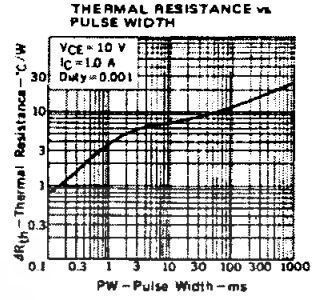
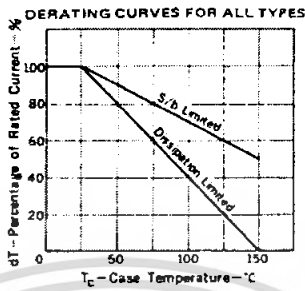
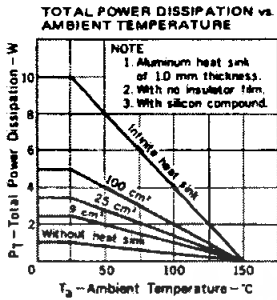
Classification of h_{FE}

Mark	A	D	F	G
Range	80 to 120	100 to 200	150 to 320	350 to 450

Test Conditions: V_{CE} = 2.0 V, I_C = 1.0 A


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS ($T_a = 25^\circ\text{C}$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATA SHEET



74AHC00; 74AHCT00 Quad 2-input NAND gate

Product specification
Supersedes data of 1998 Dec 09
File under Integrated Circuits, IC06

1999 Sep 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quad 2-input NAND gate

74AHC00; 74AHCT00

FEATURES

- ESD protection:
HBM EIAJESD22-A114-A
exceeds 2000 V
MM EIAJESD22-A115-A
exceeds 200 V
CDM EIAJESD22-C101
exceeds 1000 V
- Balanced propagation delays
- All inputs have Schmitt-trigger actions
- Inputs accept voltages higher than V_{CC}
- For AHC only:
operates with CMOS input levels
- For AHCT only:
operates with TTL input levels
- Specified from
-40 to +85 and +125 °C

DESCRIPTION

The 74AHC/AHCT00 are high-speed 2-input CMOS devices and are pin compatible with low power Schottky TTL (LS-TTL).

They are specified in compliance with JEDEC standard No. 7A.

The 74AHC/AHCT00 provides the 2-input NAND function.

FUNCTION TABLE

See note 1.

INPUT		OUTPUT
nA	nB	nY
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L

Note

- H = HIGH voltage level
L = LOW voltage level.

QUICK REFERENCE DATA

$V_{CC} = 0\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ °C}$; $t_p = 2 \pm 3.3\text{ ns}$

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	TYPICAL		UNIT
			AHC	AHCT	
t_{pd}	propagation delay nA, nB to nY	$C_L = 15\text{ pF}$ $V_{CC} = 5\text{ V}$	3.2	3.3	ns
C_i	input capacitance	$V_i = V_{CC}$ or GND	3.3	3.0	pF
C_o	output capacitance		4.3	4.0	pF
C_{pd}	power dissipation capacitance	$C_L = 50\text{ pF}$ $f = 1\text{ MHz}$ notes 1 and 2	7.3	7.0	pF

Notes

- C_{pd} is used to determine the dynamic power dissipation (P_D in μW):
 $P_D = C_{pd} \times V_{CC}^2 \times f_i + \sum (C_L \times V_{CC}^2 \times f_o)$ where:
 f_i = input frequency in MHz;
 f_o = output frequency in MHz;
 $\sum (C_L \times V_{CC}^2 \times f_o)$ = sum of outputs;
 C_L = output load capacitance in pF;
 V_{CC} = supply voltage in volts.
- The condition is $V_i = \text{GND to } V_{CC}$.

PINNING

PIN	SYMBOL	DESCRIPTION
1, 4, 9 and 12	1A to 4A	data inputs
2, 5, 10 and 13	1B to 4B	data inputs
3, 6, 8 and 11	1Y to 4Y	data outputs
7	GND	ground (0 V)
14	V_{CC}	DC supply voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quad 2-input NAND gate

74AHC00; 74AHCT00

ORDERING INFORMATION

OUTSIDE NORTH AMERICA	NORTH AMERICA	PACKAGES			
		PINS	PACKAGE	MATERIAL	CODE
74AHC00D	74AHC00D	14	SO	plastic	SOT108-1
74AHC00PW	74AHC00PW DH	14	TSSOP	plastic	SOT402-1
74AHCT00D	74AHCT00D	14	SO	plastic	SOT108-1
74AHCT00PW	74AHCT00PW DH	14	TSSOP	plastic	SOT402-1

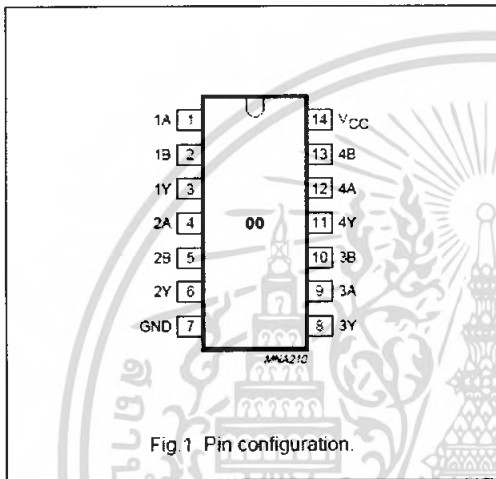


Fig 1 Pin configuration.

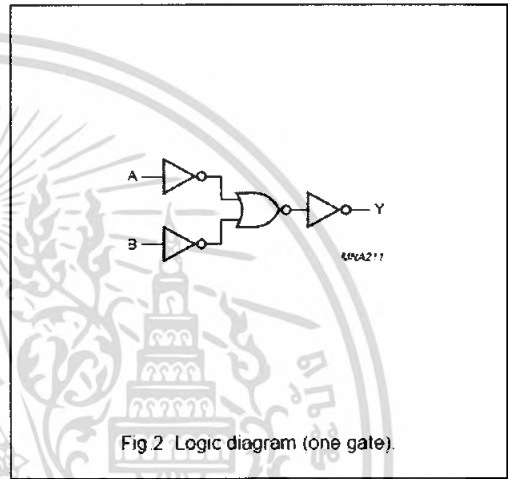


Fig 2 Logic diagram (one gate).

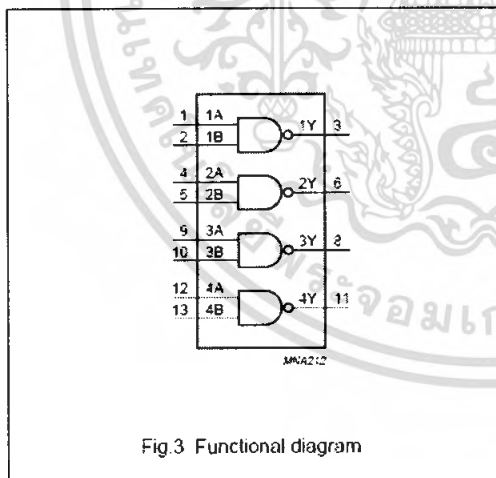


Fig.3 Functional diagram

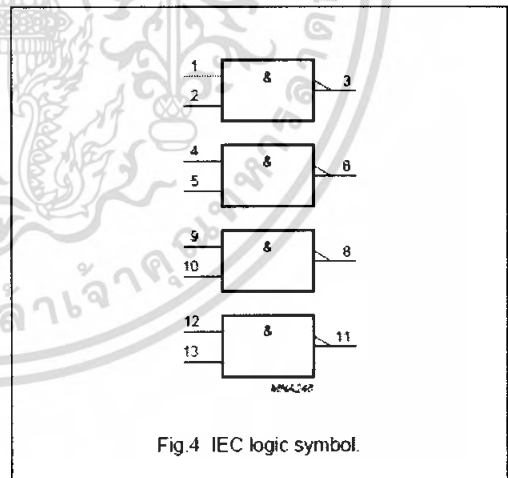


Fig.4 IEC logic symbol.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	74AHC			74AHCT			UNIT
			MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.	
V_{CC}	DC supply voltage		2.0	5.0	5.5	4.5	5.0	5.5	V
V_I	input voltage		0	–	5.5	0	–	5.5	V
V_O	output voltage		0	–	V_{CC}	0	–	V_{CC}	V
T_{amb}	operating ambient temperature range	see DC and AC characteristics per device	–40	+25	+85	–40	+25	+85	°C
			–40	+25	+125	–40	+25	+125	°C
t_r, t_f ($\Delta t/\Delta f$)	input rise and fall rates	$V_{CC} = 3.3\text{ V} \pm 0.3\text{ V}$	–	–	100	–	–	–	ns/V
		$V_{CC} = 5\text{ V} \pm 0.5\text{ V}$	–	–	20	–	–	20	

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134), voltages are referenced to GND (ground = 0 V).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CC}	DC supply voltage		–0.5	+7.0	V
V_I	input voltage range		–0.5	+7.0	V
I_{IK}	DC input diode current	$V_I < -0.5\text{ V}$, note 1	–	–20	mA
I_{OK}	DC output diode current	$V_O < -0.5\text{ V}$ or $V_O > V_{CC} + 0.5\text{ V}$, note 1	–	±20	mA
I_O	DC output source or sink current	$-0.5\text{ V} < V_O < V_{CC} + 0.5\text{ V}$	–	±25	mA
I_{CC}	DC V_{CC} or GND current		–	±75	mA
T_{stg}	storage temperature range		–65	+150	°C
P_D	power dissipation per package	for temperature range: –40 to +125 °C; note 2	–	500	mW

Notes

- The input and output voltage ratings may be exceeded if the input and output current ratings are observed.
- For SO packages: above 70 °C the value of P_D derates linearly with 8 mW/K.
For TSSOP packages: above 60 °C the value of P_D derates linearly with 5.5 mW/K.

DC CHARACTERISTICS

74AHC family

Over recommended operating conditions: voltage are referenced to GND (ground = 0 V).

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS		T _{amb} (°C)						UNIT	
		OTHER	V _{CC} (V)	25			-40 to +85		-40 to +125		
				MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.		MAX.
V _{IH}	HIGH-level input voltage		2.0	1.5	-	-	1.5	-	1.5	-	V
			3.0	2.1	-	-	2.1	-	2.1	-	
			5.5	3.85	-	-	3.85	-	3.85	-	
V _{IL}	LOW-level input voltage		2.0	-	-	0.5	-	0.5	-	0.5	V
			3.0	-	-	0.9	-	0.9	-	0.9	
			5.5	-	-	1.65	-	1.65	-	1.65	
V _{OCH}	HIGH-level output voltage; all outputs	V _I = V _{IH} or V _{IL} ; I _O = -50 μA	2.0	1.9	2.0	-	1.9	-	1.9	-	V
			3.0	2.9	3.0	-	2.9	-	2.9	-	
			4.5	4.4	4.5	-	4.4	-	4.4	-	
V _{OCH}	HIGH-level output voltage	V _I = V _{IH} or V _{IL} ; I _O = -4.0 mA	3.0	2.58	-	-	2.48	-	2.40	-	V
		V _I = V _{IH} or V _{IL} ; I _O = -8.0 mA	4.5	3.94	-	-	3.8	-	3.70	-	
V _{OL}	LOW-level output voltage; all outputs	V _I = V _{IH} or V _{IL} ; I _O = 50 μA	2.0	-	0	0.1	-	0.1	-	0.1	V
			3.0	-	0	0.1	-	0.1	-	0.1	
			4.5	-	0	0.1	-	0.1	-	0.1	
V _{OL}	LOW-level output voltage	V _I = V _{IH} or V _{IL} ; I _O = 4 mA	3.0	-	-	0.36	-	0.44	-	0.55	V
		V _I = V _{IH} or V _{IL} ; I _O = 8 mA	4.5	-	-	0.36	-	0.44	-	0.55	
I _I	input leakage current	V _I = V _{CC} or GND	5.5	-	-	0.1	-	1.0	-	2.0	μA
I _{OZ}	3-state output OFF current	V _I = V _{IH} or V _{IL} ; V _O = V _{CC} or GND	5.5	-	-	±0.25	-	±2.5	-	±10.0	μA
I _{CC}	quiescent supply current	V _I = V _{CC} or GND; I _O = 0	5.5	-	-	2.0	-	20	-	40	μA
C _I	input capacitance		-	-	3	10	-	10	-	10	pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quad 2-input NAND gate

74AHC00; 74AHCT00

AC CHARACTERISTICS

Type 74AHC00

GND = 0 V; $t_r = t_f \leq 3.0$ ns.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS		T _{amb} (°C)						UNIT	
				25			-40 to +85		-40 to +125		
		WAVEFORMS	C _L	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.		MAX.
V _{CC} = 3.0 to 3.6 V; note 1											
t _{PHL} /t _{PLH}	propagation delay nA, nB to nY	see Figs 5 and 6	15 pF	-	4.5	7.9	1.0	9.5	1.0	10.0	ns
			50 pF	-	6.0	11.4	1.0	13.0	1.0	14.5	ns
V _{CC} = 4.5 to 5.5 V; note 2											
t _{PHL} /t _{PLH}	propagation delay nA, nB to nY	see Figs 5 and 6	15 pF	-	3.2	5.5	1.0	6.5	1.0	7.0	ns
			50 pF	-	4.5	7.5	1.0	8.5	1.0	9.5	ns

Notes

1. Typical values at V_{CC} = 3.3 V.
2. Typical values at V_{CC} = 5.0 V.

Type 74AHCT00

GND = 0 V; $t_r = t_f \leq 3.0$ ns.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS		T _{amb} (°C)						UNIT	
				25			-40 to +85		-40 to +125		
		WAVEFORMS	C _L	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.		MAX.
V _{CC} = 4.5 to 5.5 V; note 1											
t _{PHL} /t _{PLH}	propagation delay nA, nB to nY	see Figs 5 and 6	15 pF	-	3.3	6.9	1.0	8.0	1.0	9.0	ns
			50 pF	-	4.5	7.9	1.0	9.0	1.0	10.0	ns

Note

1. Typical values at V_{CC} = 5.0 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PIC16F62X

FLASH-Based 8-Bit CMOS Microcontrollers

Devices included in this data sheet:

- PIC16F627 • PIC16F628

Referred to collectively as PIC16F62X .

High Performance RISC CPU:

- Only 35 instructions to learn
- All single-cycle instructions (200 ns), except for program branches which are two-cycle
- Operating speed:
 - DC - 20 MHz clock input
 - DC - 200 ns instruction cycle

Device	Memory		
	FLASH Program	RAM Data	EEPROM Data
PIC16F627	1024 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16F628	2048 x 14	224 x 8	128 x 8

- Interrupt capability
- 16 special function hardware registers
- 8-level deep hardware stack
- Direct, Indirect and Relative addressing modes

Peripheral Features:

- 15 I/O pins with individual direction control
- High current sink/source for direct LED drive
- Analog comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible
- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with external crystal/clock capability
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Capture, Compare, PWM (CCP) module
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter USART/SCI
- 16 Bytes of common RAM

Special Microcontroller Features:

- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Brown-out Detect (BOD)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Multiplexed MCLR-pin
- Programmable weak pull-ups on PORTB
- Programmable code protection
- Low voltage programming
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
 - FLASH configuration bits for oscillator options
 - ER (External Resistor) oscillator
 - Reduced part count
 - Dual speed INTRC
 - Lower current consumption
 - EC External Clock input
 - XT oscillator mode
 - HS oscillator mode
 - LP oscillator mode
- Serial in-circuit programming (via two pins)
- Four user programmable ID locations

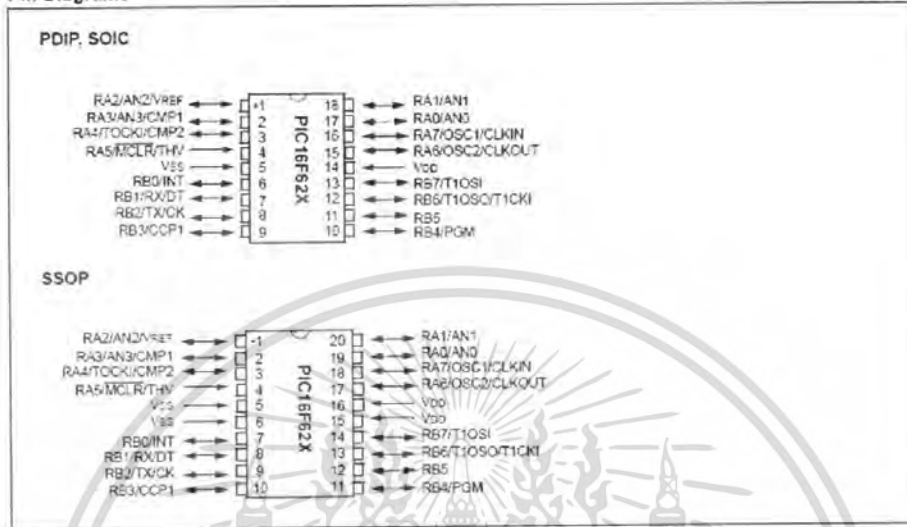
CMOS Technology:

- Low-power, high-speed CMOS FLASH technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range
 - PIC16F627 - 3.0V to 5.5V
 - PIC16F628 - 3.0V to 5.5V
 - PIC16LF627 - 2.0V to 5.5V
 - PIC16LF628 - 2.0V to 5.5V
- Commercial, industrial and extended temperature range
- Low power consumption
 - < 2.0 mA @ 5.0V, 4.0 MHz
 - 15 μ A typical @ 3.0V, 32 kHz
 - < 1.0 μ A typical standby current @ 3.0V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC16F62X

Pin Diagrams



Device Differences

Device	Voltage Range	Oscillator	Process Technology (Microns)
PIC16F627	3.0 - 5.5	See Note 1	0.7
PIC16F628	3.0 - 5.5	See Note 1	0.7
PIC16LF627	2.0 - 5.5	See Note 1	0.7
PIC16LF628	2.0 - 5.5	See Note 1	0.7

Note 1: If you change from this device to another device, please verify oscillator characteristics in your application.

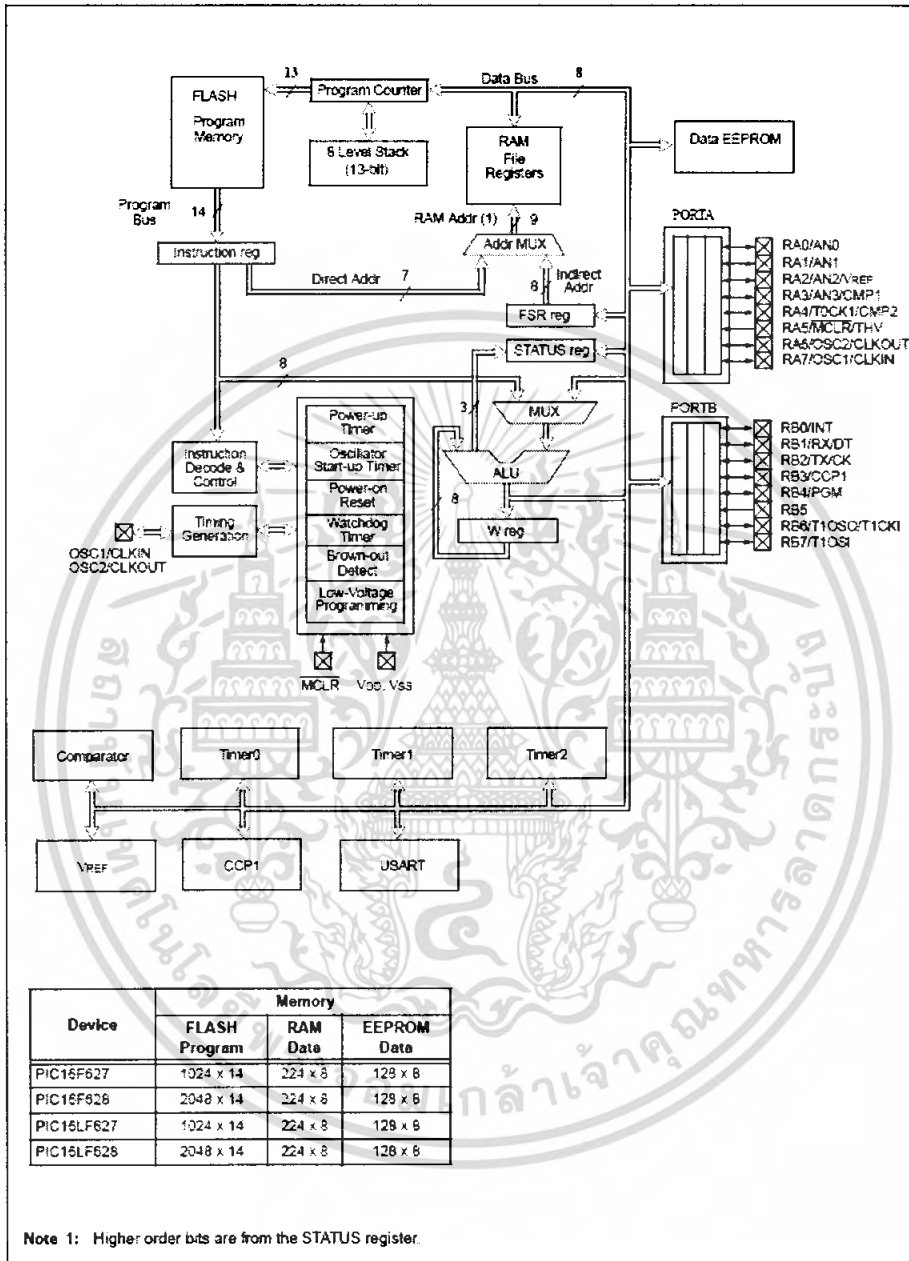
		PIC16F627	PIC16F628	PIC16LF627	PIC16LF628
Clock	Maximum Frequency of Operation (MHz)	20	20	20	20
	FLASH Program Memory (words)	1024	2048	1024	2048
Memory	RAM Data Memory (bytes)	224	224	224	224
	EEPROM Data Memory (bytes)	128	128	128	128
Peripherals	Timer Module(s)	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2
	Comparators(s)	2	2	2	2
	Capture/Compare/PWM modules	1	1	1	1
Features	Serial Communications	USART	USART	USART	USART
	Internal Voltage Reference	Yes	Yes	Yes	Yes
Features	Interrupt Sources	10	10	10	10
	I/O Pins	16	16	16	16
	Voltage Range (Volts)	3.0-5.5	3.0-5.5	2.0-5.5	2.0-5.5
	Brown-out Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
	Packages	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP

All PICmicro[®] Family devices have Power-on Reset, selectable Watchdog Timer, selectable code protect and high I/O current capability. All PIC16F62X Family devices use serial programming with clock pin RB6 and data pin RB7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC16F62X

FIGURE 3-1: BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 3-1: PIC16F62X PINOUT DESCRIPTION

Name	DIP/ SOIC Pin #	SSOP Pin #	I/O/P Type	Buffer Type	Description
RA0/AN0	17	19	I/O	ST	Bi-directional I/O port/Analog comparator input
RA1/AN1	18	20	I/O	ST	Bi-directional I/O port/Analog comparator input
RA2/AN2/VREF	1	1	I/O	ST	Bi-directional I/O port/Analog comparator input/VREF output
RA3/AN3/CMP1	2	2	I/O	ST	Bi-directional I/O port/Analog comparator input/comparator output
RA4/T0CKI/CMP2	3	3	I/O	ST	Bi-directional I/O port/Can be configured as T0CKI/comparator output
RA5/MCLR/THV	4	4	I	ST	Input port/master clear (reset input/programming voltage input. When configured as MCLR, this pin is an active low reset to the device. Voltage on MCLR/THV must not exceed VDD during normal device operation.
RA6/OSC2/CLKOUT	15	17	I/O	ST	Bi-directional I/O port/Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in crystal oscillator mode. In ER mode, OSC2 pin outputs CLKOUT which has 1/4 the frequency of OSC1, and denotes the instruction cycle rate.
RA7/OSC1/CLKIN	16	18	I/O	ST	Bi-directional I/O port/Oscillator crystal input/external clock source input. ER biasing pin.
RB0/INT	6	7	I/O	TTL/ST ⁽¹⁾	Bi-directional I/O port/external interrupt. Can be software programmed for internal weak pull-up.
RB1/RX/DT	7	8	I/O	TTL/ST ⁽³⁾	Bi-directional I/O port/ USART receive pin/synchronous data I/O. Can be software programmed for internal weak pull-up.
RB2/TX/CK	8	9	I/O	TTL/ST ⁽³⁾	Bi-directional I/O port/ USART transmit pin/synchronous clock I/O. Can be software programmed for internal weak pull-up.
RB3/CCP1	9	10	I/O	TTL/ST ⁽⁴⁾	Bi-directional I/O port/Capture/Compare/PWM I/O. Can be software programmed for internal weak pull-up.
RB4/PGM	10	11	I/O	TTL/ST ⁽⁵⁾	Bi-directional I/O port/Low voltage programming input pin. Wake-up from SLEEP on pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up. When low voltage programming is enabled, the interrupt on pin change and weak pull-up resistor are disabled.
RB5	11	12	I/O	TTL	Bi-directional I/O port/Wake-up from SLEEP on pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up.
RB6/T1OSO/T1CKI	12	13	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Bi-directional I/O port/Timer1 oscillator output/Timer1 clock input. Wake up from SLEEP on pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up.
RB7/T1OSI	13	14	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Bi-directional I/O port/Timer1 oscillator input. Wake up from SLEEP on pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up.
VSS	5	5,6	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	14	15,16	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: O = output I/O = input/output P = power
 — = Not used I = Input ST = Schmitt Trigger input
 TTL = TTL input I/OD = input/open drain output

- Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
- Note 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in serial programming mode.
- Note 3: This buffer is a Schmitt Trigger I/O when used in USART/Synchronous mode.
- Note 4: This buffer is a Schmitt Trigger I/O when used in CCP mode.
- Note 5: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in low voltage program mode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้