

เครื่องวัดคลื่นหัวใจแสดงผลบนหน้าจอเกมบอย

ECG ON GAMEBOY'S DISPLAY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

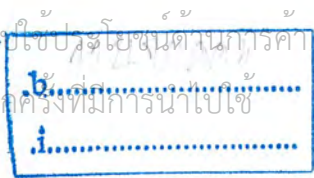
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแก้ไข กรุณาแจ้งให้ทราบเพื่อตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 55802
วัน,เดือน,ปี 25 พ.ค. 2548



เครื่องวัดคลื่นหัวใจแสดงผลบนหน้าจอเกมบอย

ECG ON GAMEBOY'S DISPLAY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดคลื่นหัวใจแสดงผลบนหน้าจอเกมบอย

ECG ON GAMEBOY'S DISPLAY

ผู้จัดทำ

1. นาย ปุณรัตน์ ภิญโญพันธ์ เลขประจำตัว 43010273

2. นาย พรศักดิ์ สมทิพย์ เลขประจำตัว 43010293



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แสดงผลบน เกมบอย

นาย บุญรัตน์ ภิญโญพันธ์ 43010273

นาย พรศักดิ์ สมทิพย์ 43010293

ดร. กิตติพล ชิตสกุล

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และ สร้างเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ โดยเพื่อ
 ใช้การแสดงผลบนหน้าจอเกมบอย โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้
 จากร่างกายซึ่งเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็กและมีความถี่ต่ำมาแสดงผลบนจอภาพของเครื่องเล่นเกมบอย
 โดยโครงการนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญสามส่วนคือส่วนวัดและขยายสัญญาณ ส่วนแปลงสัญญาณ
 อนุภาคเป็นดิจิทัล 8 บิต และส่วนอินเทอร์เฟซควบคุมการทำงานของภาคแสดงผลบนเกมบอยโดย
 ใช้การ์ดอินเทอร์เฟซที่สร้างขึ้นและเก็บโปรแกรมไว้ใน EEPROM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ECG ON GAMEBOY'S DISPLAY

Mr. Punnarat Pinyophan 43010273

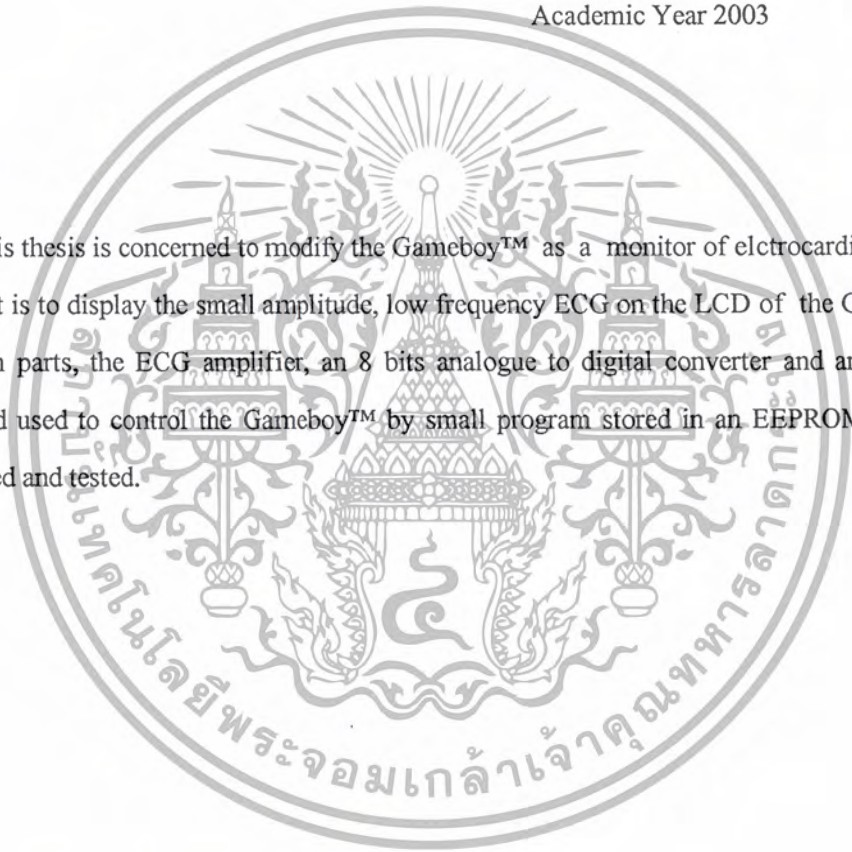
Mr. Pornsak Somthip 4301093

Dr. Kitiphol Chitsakol (Advisor)

Academic Year 2003

Abstract

This thesis is concerned to modify the Gameboy™ as a monitor of electrocardiogram. The main object is to display the small amplitude, low frequency ECG on the LCD of the Gameboy™. Three main parts, the ECG amplifier, an 8 bits analogue to digital converter and an interfacing control card used to control the Gameboy™ by small program stored in an EEPROM have been implemented and tested.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้จะสำเร็จลงไม่ได้เลย ถ้าไม่ได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา
 คร. กิตติพล ชิตสกุล จึงขอขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ โอกาสนี้ด้วยรวมไปถึงท่านอาจารย์ทุกท่าน
 ที่สั่งสอน และให้ความรู้จนมีความสามารถในการทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีขอขอบคุณ
 เพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือและแนะนำเกี่ยวกับข้อผิดพลาดต่างๆที่อาจมองข้ามไปไว้ ณ ที่นี้ด้วย



ปญณรัตน์ ภิญญพันธ์

นาย ปญณรัตน์ ภิญญพันธ์

พรศักดิ์ สมทิพย์

นาย พรศักดิ์ สมทิพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	
สารบัญรูป	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมาของเกมบอยคัลเลอร์ (Gameboy Color)	1
1.2 ความเป็นมา	1
1.3 ลักษณะของโครงการ	1
1.4 โครงสร้างของรายงาน	2
บทที่ 2	
ทฤษฎีเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ	3
2.1 คุณสมบัติการทำงานของหัวใจ	3
2.2 ลักษณะการทำงานของหัวใจ	5
2.3 สัญญาณไฟฟ้าจากหัวใจ	7
2.4 การศึกษาความหมายและรูปร่างของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	9
2.5 การตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ	10
2.5.1 แบบไบโพลาร์ ลิมบ์ลีด (Bipolar Limb Lead)	10
2.5.2 แบบยูนิโพลาร์ ลิมบ์ลีด (Unipolar Limb Lead)	10
2.6 อิเล็กโทรด	11
2.6.1 อิเล็กโทรดที่ปลาไรซ์และอิเล็กโทรดที่ไม่มีปลาไรซ์	12
2.6.2 คุณสมบัติอิเล็กโทรด	13
2.6.3 อิเล็กโทรดแบบแผ่นที่ทำด้วยโลหะ	14
2.6.4 ข้อเสนอแนะในการใช้อิเล็กโทรดในทางปฏิบัติ	15
2.7 ความต้องการโดยเฉพาะของเครื่อง อี ซี จี	15
2.8 ปัญหาที่พบบ่อยในการออกแบบและใช้เครื่อง อี ซี จี	16
2.8.1 ความผิดเพี้ยนทางด้านความถี่	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	2.8.2 การอิมตัวหรือความผิดพลาดที่ตัดการทำงาน	18
	2.8.3 วงจรสายดิน	18
	2.8.4 สายต่อที่ขาด	20
	2.8.5 สิ่งที่รบกวนเกิดจากศักย์แรงสูงระยะสั้น	20
	2.8.6 การรบกวนจากเครื่องไฟฟ้า	21
	2.8.7 การรบกวนทางไฟฟ้าจากคันต้อื่น ๆ	23
	2.9 การป้องกันคลื่นไฟฟ้าช่วงสั้นที่มารบกวน	24
	2.10 การลด common-mode และการรบกวนอย่างอื่น	25
	2.10.1 การรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	25
	2.10.2 การกำจัดวงจรสายดิน	25
	2.10.3 ระบบป้องกันศักย์ไฟฟ้าให้แก่ช่างขวา	26
บทที่ 3	การออกแบบและการทำงานของเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	27
	3.1 ภาควงจรขยาย	27
	3.2 วงจรไดโอดแคดมบิ่ง	29
	3.3 วงจรยกระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	29
	3.4 วงจรปรับศูนย์อัตโนมัติ	30
	3.5 วงจรรองความถี่แบบไม่ให้อ่านเฉพาะความถี่	31
	3.6 วงจรแยกสัญญาณ	33
บทที่ 4	โครงสร้างและข้อมูลของเกมบอย	36
	4.1 บทนำ	36
	4.2 รูปแบบและสเปคเครื่องเล่นเกมบอยโดยทั่วไป	36
	4.3 ส่วนแสดงผล	38
	4.4 ระบบเสียง	39
	4.5 I/O Ports	39
	4.6 การแบ่งพื้นที่หน่วยความจำของเครื่องเกมบอย	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	4.7 การ์ดอินเตอร์เฟส	43
	4.7.1 การทำงานของเกมบอย	43
	4.7.2 การสร้างการ์ดอินเตอร์เฟส	44
	4.8 วงจร ADC (Analog to Digital Converter)	45
	4.9 การพัฒนาโปรแกรมบนเกมบอย	46
	4.9.1 ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมบนตัวเกมส่าย	46
	4.9.2 คำสั่งในการคอมไพล์ โดยใช้ GBDK	46
	4.9.3 Option ในการคอมไพล์	47
	4.10 การพัฒนาโปรแกรม ที่ใช้งานด้วย GBDK	47
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง	48
	5.1 การทดสอบวงจรขยายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	48
	5.2 การแสดงผลสัญญาณบนหน้าจอบอย	53
บทที่ 6	สรุปผลการทดลอง	55
ภาคผนวก		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2-1	แสดงการกระจายกระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ	3
รูปที่ 2-2	แสดงระบบสื่อทำให้เกิดคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ	4
รูปที่ 2-3	แสดงภาพตัดขวางของส่วนประกอบที่สำคัญของหัวใจ	5
รูปที่ 2-4	แสดงความสัมพันธ์ของการทำงานของหัวใจกับการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	7
รูปที่ 2-5	แสดงผลอิเล็กทรอนิกส์คาร์ดิโอแกรมของคนปกติ	9
รูปที่ 2-6	แสดงวิธีวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจทั้ง 2 แบบ	10
รูปที่ 2-7	แสดงโครงสร้างผิวหนังและวงจรสมมูลของผิวหนังที่อิเล็กทรอนิกส์โทรด	12
รูปที่ 2-8	แสดงคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์โทรดที่เป็นเหล็กไร้สนิมที่อินพีเดนซ์ขึ้นกับค่าความเก็บประจุและความชื้นของกระแสไฟฟ้า	13
รูปที่ 2-9	ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่	14
รูปที่ 2-10	อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำด้วยแผ่นโฟม (ชนิดใช้แล้วทิ้งเลย) สำหรับเครื่อง อี ซี จี ใช้ปิดผิวหนังที่แขน-ขา	14
รูปที่ 2-11	แสดงความคิดพลาดของรูปคลื่น อี ซี จี ซึ่งมีผลมาจากความผิดเพี้ยนของความถี่	17
รูปที่ 2-12	แสดงความคิดพลาดของคลื่น อี ซี จี ซึ่งมีผลจากการผิดเพี้ยนที่เกิดจากแอมพลิไฟเออร์	18

รูปที่ 2-13a	แสดงอันตรายที่เกิดจากวงจรสายดิน	19
รูปที่ 2-13b	แสดงอันตรายที่เกิดจากรอยต่อที่ขาด	20
รูปที่ 2-14	ผลของสิ่งรบกวนที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าแรงสูงระยะสั้น	21
รูปที่ 2-15	การลดสัญญาณรบกวนโดยการพันสายเป็นเกลียว	23
รูปที่ 3-1	วงจร Instrumentation Amp. วงจร RL Driver และวงจร Clamping	28
รูปที่ 3-2	วงจรยกระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	29
รูปที่ 3-3	วงจรปรับศูนย์อัตโนมัติ (Auto Zero Circuit)	31
รูปที่ 3-4	วงจรกรองความถี่แบบไม่ให้ผ่านเฉพาะความถี่ (Notch Filter)	32
รูปที่ 3-5	แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์แยกสัญญาณที่นิยมใช้กันทั่วไป	34
รูปที่ 3-6	แสดงลักษณะของทรานซิสเตอร์รับแสง (Photo transistor)	35
รูปที่ 4-1	แสดงรูปร่างลักษณะภายนอกของเครื่องเล่นเกมบอย	36
รูปที่ 4-2	แสดงวงจรภายในของเครื่องเล่นเกมบอย	37
รูปที่ 4-3	แสดงวงจรการเชื่อมต่อส่วนแสดงผล จอ LCD	39
รูปที่ 4-4	แสดงลักษณะขาของ พอร์ตสื่อสารอนุกรมและ connector	40
รูปที่ 4-5	การเชื่อมต่อ EEPROM กับ เกมบอย Connector	43
รูปที่ 4-6	ขนาดของ Gameboy Connector	44
รูปที่ 4-7	แผ่น PCB ที่ใช้ติดต่อกับเกมบอย	45
รูปที่ 4-8	แสดงวงจร ADC (Analog to Digital Converters)	45
รูปที่ 5-1	การป้อนสัญญาณแบบ Difference Mode	49
รูปที่ 5-2	กราฟแสดงอัตราขยายของวงจร	50
รูปที่ 5-3	กราฟแสดงอัตราขยาย dB ของวงจร ECG Amp.	51
รูปที่ 5-4	การป้อนสัญญาณอินพุทแบบ Common Mode	51
รูปที่ 5-5	แสดงสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 สเปคต่างๆ ของเครื่องเล่นเกมบอย	38
ตารางที่ 4.2 การแบ่งพื้นที่หน่วยความจำของเกมบอย	41
ตารางที่ 5.1 ผลการวัดการตอบสนองทางความถี่	49
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองหาค่า CMRR	52



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ประวัติความเป็นมาของเกมบอยคัลเลอร์ (Gameboy Color)

เครื่องเล่นเกมบอยเครื่องแรกถูกนำออกสู่ตลาดเมื่อปี 1989 โดยบริษัท นินเทนโด ของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเกมบอยรุ่นแรกนั้นมีรูปทรงที่ธรรมดา มีขนาดใหญ่ยังไม่สวยงามเหมือนในปัจจุบันนี้แต่ก็เป็นที่รู้จักของนักเล่นเกมทั่วโลก และสามารถทำยอดขายได้มากถึง 70 ล้านเครื่องในเวลาต่อมา ทำให้บริษัท นินเทนโดซึ่งเป็นผู้สร้างประสบความสำเร็จและกลายเป็นผู้นำในตลาดของเครื่องเกมที่พกพาได้ในเวลาต่อมา ในปี 1996 บริษัท นินเทนโดได้ผลิต เกมบอยรุ่นใหม่ออกมาที่มีชื่อว่า เกมบอยพ็อกเกต (Gameboy Pocket) โดยรุ่นใหม่นี้ถูกพัฒนาให้มีขนาดตัวเครื่องที่เล็กลงกว่ารุ่นเก่า และเพิ่มความละเอียดในส่วนแสดงผล จนกระทั่งปลายปี 1998 เกมบอยคัลเลอร์ (Gameboy Color) ได้ถูกผลิตออกสู่ตลาดซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีจอแสดงผลที่เป็นสี ที่ให้ความละเอียดกว่าในรุ่นเก่าก่อนหน้า

1.2 ความเป็นมาของโครงการ

เกมบอยเป็นเครื่องเล่นเกมชนิดหนึ่งซึ่งช่วยให้ความบันเทิงแก่ผู้เล่นแต่เนื่องจากเศรษฐกิจในปัจจุบันทำให้ต้องประหยัดและประยุกต์สิ่งของทุกชนิดให้มีประโยชน์ในการใช้งานมากที่สุด และเนื่องจากปัจจุบันจอแสดงผล LCD ที่มีความละเอียดสูงนั้นมีราคาที่สูง จึงได้เกิดแนวความคิดที่จะนำจอแสดงผล LCD ของเกมบอยมาประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่แสดงผลทดแทน เนื่องจากปัจจุบันเห็นว่า เครื่องเล่นเกมบอย มีราคาที่ถูก หาง่าย จึงนำพัฒนาเพื่อใช้แสดงคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

1.3 ลักษณะของโครงการ

จากความคิดดังกล่าวข้างต้น จึงได้ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ เครื่องเล่นเกมบอยทั้งทางด้าน Hardware และ Software โดยในโครงการนี้จะสร้างการ์ดอินเตอร์เฟส และชิป EEPROM เป็นตัวเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานของเกมบอย และมีวงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจทำการส่งสัญญาณเป็นแบบอนาล็อก ป้อนเข้าสู่วงจร ADC แล้ว Microcontroller จะนำสัญญาณจาก ADC ส่งต่อไปให้เกมบอยเพื่อทำการแสดงผล

1.4 โครงสร้างของรายงาน

รายงานฉบับนี้เป็นการรายงานผลการศึกษาและการทดลองตลอดภาคการศึกษา เพื่อศึกษาการนำเครื่องเล่นเกมบอยมาใช้ทำหน้าที่แสดงผลสัญญาณเคลื่อนไฟฟ้าหัวใจ ซึ่งเนื้อหาประกอบด้วยส่วนต่างๆ แยกออกเป็นบทๆ ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงประวัติความเป็นมาและแนวคิดในการสร้างโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ

บทที่ 3 การออกแบบและการทำงานของเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

บทที่ 4 โครงสร้างและข้อมูลของเกมบอย

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง



บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับสัญญาณไฟฟ้าหัวใจ

หัวใจเป็นอวัยวะที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของร่างกายทำหน้าที่สูบฉีดโลหิตให้หมุนเวียนไปทั่วร่างกาย โดยที่การหดตัวและพองตัวอย่างสม่ำเสมอของหัวใจเพื่อส่งโลหิตไปทั่วร่างกายนั้น จะถูกควบคุมการทำงานด้วยกล้ามเนื้อพิเศษที่เรียกว่า กล้ามเนื้อหัวใจ (Myocardium) ที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าจาก Sinoatrial node การหดตัวและพองตัวดังกล่าวนี้เกิดไปพร้อมกับศักดาไฟฟ้า (electric potential) กระจายไปสู่ส่วนต่างๆ ของร่างกาย ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แสดงการกระจายกระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ

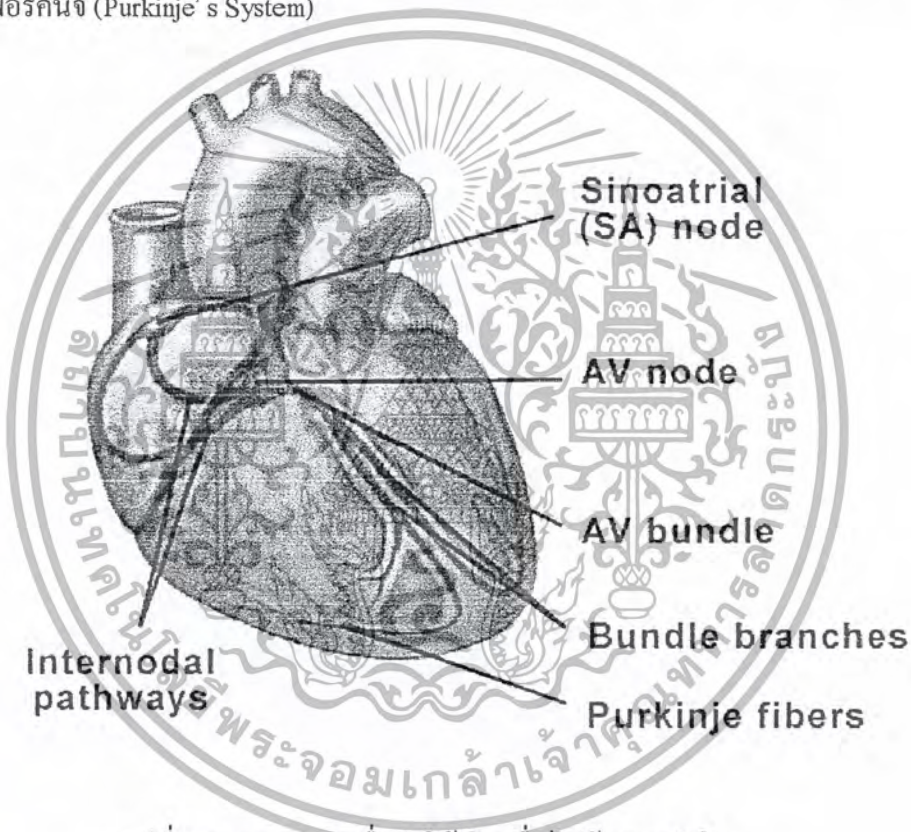
2.1 คุณสมบัติการทำงานของหัวใจ

หัวใจมีคุณสมบัติหลายอย่างซึ่งเป็นลักษณะพิเศษดังต่อไปนี้

1. กล้ามเนื้อหัวใจสามารถทำงานได้ด้วยตนเอง (Automatically) เนื่องจากมีศักดาไฟฟ้าทำงาน
2. การทำงานมีความต่อเนื่อง (Contractility) คุณสมบัติเช่นนี้เป็นลักษณะธรรมชาติของกล้ามเนื้อหัวใจ การบีบตัวของหัวใจเรียกว่า ซิสโตล (Systole) และการคลายตัวเรียกว่า ไดแอสโตล (Diastole) แล้วตามด้วยระยะพัก การทำงานครบวงจรเช่นนี้เรียกว่า วงจรการทำงานของหัวใจ (Cardiac Cycle)
3. มีระบบสื่อ นำ (Conductivity) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างคุณสมบัติของกล้ามเนื้อและประสาท ทำหน้าที่นำคำสั่งไปยังส่วนต่างๆ ของหัวใจ เพื่อให้การทำงานเป็นจังหวะและพร้อมเพรียงกัน ถึงแม้ว่ากล้ามเนื้อหัวใจจะทำงานได้เอง แต่ในร่างกายจะต้องมีระบบสื่อ นำเป็นตัวเริ่มทำให้เกิดพลังประสาท ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ระบบสื่อ นำที่กล่าวนี้ ประกอบด้วยกลุ่มเซลล์อยู่ที่บริเวณหัวใจห้องบนขวา (Right Atrium) ใกล้กับรูเปิดของหลอดเลือดซุพีเรียเวนาคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Superior Vena Cava) เรียกว่า ไชโน-เอเทรียลโนด (Sino-atrial Node: S-A Node) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระตุ้นเพื่อให้เกิดการบีบตัวของหัวใจห้องบนและนำคลื่นไฟฟ้าส่งต่อไปยังกลุ่มเซลล์ที่บริเวณส่วนบนของหัวใจห้องล่างขวา (Right Ventricle) เรียกว่า เอเทรียโอเวนตริคิวลาร์โนด (Atrioventricular Node: A-V Node) โดยที่เซลล์กลุ่มนี้มีส่วนของเนื้อเยื่อที่เรียกว่า บันเดิลออฟฮิส (Bundle of his) และส่วนของเส้นใยพิเศษเรียกว่า เพอร์คินจ์ (Purkinje Fibers) ทำหน้าที่เป็นสื่อ นำสัญญาณจากกลุ่มเซลล์ที่บริเวณส่วนบนของหัวใจห้องล่างขวาผ่านไปยังกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่าง ระบบื่อนำตั้งแต่กลุ่มเซลล์ที่บริเวณส่วนบนของหัวใจห้องล่างขวาลงมาเรียกว่า ระบบเพอร์คินจ์ (Purkinje' s System)

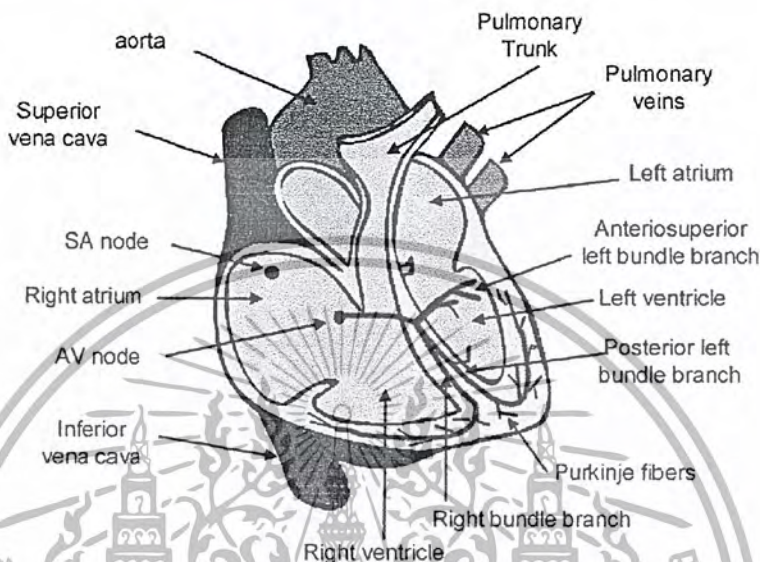


รูปที่ 2-2 แสดงระบบสื่อ นำให้เกิดคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ

4. กล้ามเนื้อหัวใจมีระยะคือ นาน ในระยะบีบตัว กล้ามเนื้อยังอยู่ในภาวะ ดีโพลาไรซ์ (Depolarization) ซึ่งเป็นระยะแรกที่เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจถูกกระตุ้นและรีโพลาไรซ์ (Repolarization) เป็นช่วงที่กลับคืนสู่ภาวะปกติ จึงยังไม่สนองต่อการกระตุ้น ระยะนี้เรียกว่า ระยะแอบโซลูทรีแฟรคทอรี (Absolute Refractory Period) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 0.25 วินาที แต่ ต่อมา ในระยะต้นของการคลายตัวนั้น กล้ามเนื้อหัวใจ มีการสนองต่อการกระตุ้น (Excitability) มากขึ้น แต่ก็ยังคืออยู่ ต้องทำการกระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นที่แรงมากพอจึงสามารถตอบสนองได้ เรียกระยะนี้ว่า ระยะรีเลทีฟรีแฟรคทอรี (Relative Refractory Period) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 0.05 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการทำงานเชิงกลของหัวใจ (Mechanical Operation of Heart)



รูปที่ 2-3 แสดงภาพตัดขวางของส่วนประกอบที่สำคัญของหัวใจ

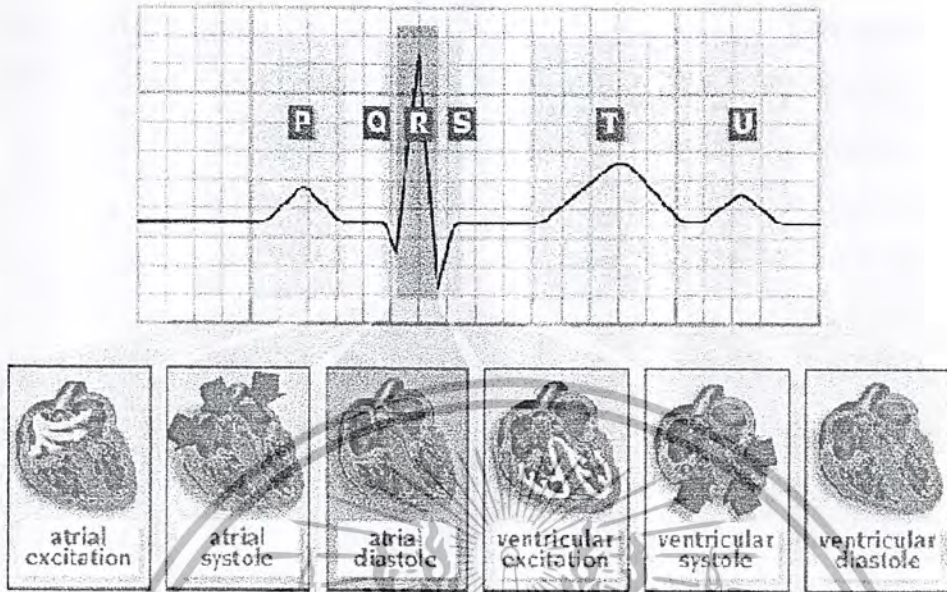
ในการทำงานเลือดดำจากส่วนต่างๆ ของร่างกายจะไหลกลับเข้าสู่หัวใจผ่านทางหลอดเลือดดำอินฟีเรียร์เวนาคาวา (Inferior vena cava) และซูพีเรียร์เวนาคาวา เข้าสู่หัวใจห้องบนขวา (Right Atrial : RA) จากนั้นหัวใจห้องบนขวาจะบีบตัวส่งเลือดให้ไหลลงสู่หัวใจห้องล่างขวา (Right Ventricle : RV) และถูกฉีดออกไปสู่ปอดเพื่อทำการรับออกซิเจนให้เปลี่ยนเป็นเลือดดี แล้วส่งกลับเข้ามายังหัวใจห้องบนซ้าย (Left atrial : LA) ทางหลอดเลือดแดงพัลโมนารีเวิน (Pulmonary vein) และไหลผ่านลงสู่หัวใจห้องล่างซ้าย (Left Ventricle : LV) โดยการบีบตัวของหัวใจห้องบนซ้าย ต่อจากนั้นเลือดแดงจะถูกฉีดไปเลี้ยงร่างกายโดยผ่านทางเส้นเลือดแดงใหญ่ (Aorta)

การทำงานของหัวใจแบ่งได้เป็นช่วงจังหวะต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ช่วงที่การบีบตัวส่งเลือดออกไปของหัวใจสิ้นสุด และกำลังรอจังหวะการบีบตัวครั้งต่อไป ช่วงนี้เป็นช่วงที่เลือดไหลเข้าสู่หัวใจ สภาพหัวใจขณะนี้ จะถือว่าเป็นสภาวะพัก (Resting State) ของหัวใจ
2. เป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากระยะพักเสร็จสิ้นลง ในช่วงนี้หัวใจห้องบน (Atrial) เริ่มหดตัว ทำให้ความดันภายในหัวใจห้องบนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และด้วยความดันนี้จะทำให้เลือดไหลจากหัวใจห้องบนเข้าสู่หัวใจห้องล่าง (Ventricle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อความดันในหัวใจห้องล่าง เพิ่มขึ้นจะทำให้หัวใจที่กั้นระหว่างหัวใจห้องบนกับห้องล่างทั้งด้านขวา (Triaspid valve) และด้านซ้าย (Mitral valve) ปิด ดังนั้นปริมาตรของหัวใจห้องล่างจะไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่หัวใจห้องล่างเริ่มหดตัวนั้นความดันในเส้นเลือดดำจากหัวใจห้องบนขวา (pulmonary artery) เท่ากับ 7 มิลลิเมตรปรอท ขณะที่ในเส้นเลือดแดงใหญ่ซึ่งนำเลือดจากหัวใจห้องล่างซ้ายส่งไปยังร่างกายมีความดันเท่ากับ 80 มิลลิเมตรปรอท ลิ้นเปิด-ปิดของเส้นเลือดแดงใหญ่ (Aorta valve) และเส้นเลือดดำใหญ่ (Pulmonary valve) จะปิดอยู่จนกระทั่งความดันเพิ่มขึ้นจนเพียงพอ
4. เมื่อความดันในหัวใจห้องล่างซ้ายเพิ่มขึ้นจนมากกว่าความดันในเส้นเลือดแดงใหญ่ลิ้นหัวใจของเส้นเลือดแดงใหญ่จะเปิด และหัวใจห้องล่างซ้ายจะสูบฉีดเลือดผ่านเส้นเลือดแดงใหญ่เข้าสู่ระบบไปเลี้ยงร่างกาย ความดันจะขึ้นถึงจุดสูงสุดประมาณ 125 มิลลิเมตรปรอท หลังจากเลือดส่วนใหญ่ถูกขับออกไปสู่ร่างกายแล้ว กล้ามเนื้อของหัวใจห้องล่างซ้ายจะลดลง ความดันในหัวใจห้องล่างและในเส้นเลือดแดงใหญ่จะเริ่มตกลง
5. เมื่อความดันในหัวใจห้องล่างตกลงจนถึงค่าหนึ่ง ความดันในเส้นเลือดแดงใหญ่ และเส้นเลือดดำใหญ่จะมากกว่าความดันในห้องใจ (Chambers) ลิ้นเปิด-ปิดของหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำจะปิด ที่จุดนี้การสูบฉีดเลือดออกจากหัวใจห้องล่างกำลังพองตัว ความดันจะยังคงตกลงเรื่อยๆ
6. เมื่อความดันในหัวใจห้องล่างตกลงต่ำกว่าความดันในหัวใจห้องบน ลิ้นหัวใจจะเปิดและเลือดจะเริ่มไหลเข้าสู่หัวใจห้องล่างอย่างรวดเร็ว และจะช้าลงเมื่อหัวใจห้องล่างเริ่มเพิ่มขนาดขึ้นสูงสุดขณะนี้เป็นช่วงของ ระยะพักของหัวใจ ดังที่กล่าวไว้ในข้อ 1 และครบวงจรการเต้นของหัวใจ วงจรต่อไปก็จะเริ่มใหม่อีก



รูปที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ของการทำงานของหัวใจกับการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

2.2 สัญญาณไฟฟ้าจากหัวใจ

ตามปกติเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจจะมีแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์มีค่าเป็นลบมากกว่าแรงดันไฟฟ้าภายนอกเซลล์ประมาณ 90 มิลลิโวลต์ แสดงตามรูปที่ 2-6 แรงดันไฟฟ้าดังกล่าวเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าขณะอยู่นิ่ง (resting potential) ถ้าศักย์ไฟฟ้าขณะอยู่นิ่งนี้มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดค่าหนึ่งจะมีการแตกตัวของอนุภาคและประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีการแตกตัวให้ประจุเกิดขึ้นศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์จะมีค่าประมาณ +30 มิลลิโวลต์ และเซลล์กล้ามเนื้อจะมีการหดตัวทำให้เซลล์มีขนาดเล็กลงหลังจากนั้นประมาณ 20 มิลลิวินาที ศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์จะกลับไปมีค่าเท่ากับ ศักย์ไฟฟ้าขณะหยุดนิ่ง และเซลล์จะอยู่ในลักษณะคลายตัว จนกว่าวัฏจักรจะเริ่มซ้ำ (เมื่อศักย์ไฟฟ้าหยุดนิ่งเพิ่มขึ้นอีก)

หัวใจส่วนบนมีการเกี่ยวพันทางไฟฟ้ากับเซลล์ข้างเคียง ดังนั้นเมื่อเซลล์หนึ่งเกิดการแตกตัวให้ประจุเซลล์ใกล้เคียงจะได้รับการกระตุ้นให้ปลดปล่อยประจุด้วยคลื่นของการปลดปล่อยประจุ จะกระจายไปทั่วส่วนบน ในที่สุดเซลล์ทุกเซลล์ในหัวใจส่วนบนจะมีการแตกตัวให้ประจุหัวใจส่วนบนจะหดตัว คลื่นของการปลดปล่อยประจุเกิดจากเซลล์จำนวนมากทำให้เกิดความแตกศักย์ไฟฟ้ามากพอที่จะวัดได้โดยการใช้อิเล็กโทรดวางบนผิวหนัง ค่าแรงดันที่วัดได้ด้วยวิธีนี้เรียกว่าอิเล็กโทรคาร์ดิโอแกรม

ในการทำงานเดียวกันกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในห้องหัวใจส่วนบน เซลล์ทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบของกล้ามเนื้อหัวใจส่วนล่างทั้ง 2 ห้องจะมีความสัมพันธ์ทางไฟฟ้ากับเซลล์ข้างเคียง ดังนั้น เซลล์ใดเซลล์หนึ่งในหัวใจส่วนล่างมีการแตกตัวของอนุภาคและให้ประจุออกมา(และการหดตัว) ในทุกๆเซลล์ของหัวใจส่วนล่าง

อย่างไรก็ตาม หัวใจส่วนบนและหัวใจส่วนล่างไม่ได้เชื่อมต่อกันโดยตรง บริเวณแนวเชื่อมต่อของช่องทางไฟฟ้าของหัวใจส่วนบนและหัวใจส่วนล่างเรียกว่า โหนดเอวี (Atrio Ventricular node) การส่งผ่านสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างหัวใจส่วนบนและหัวใจส่วนล่างจะทำให้ทั้ง 2 ส่วนได้รับสัญญาณช้ากว่ากัน 0.04 วินาทีการนี้ทำให้หัวใจส่วนบนที่เวลาติดเลือดให้หัวใจส่วนล่าง การล่าช้าดังกล่าวยังเป็นตัวจำกัดจำนวนครั้งต่อนาทีที่หัวใจบีบตัวตลอดจากหัวใจส่วนบนจนถึงหัวใจส่วนล่าง ในกรณีที่หัวใจส่วนบนมีการบีบรัดตัวเร็วเกินไป การจำกัดอัตราการบีบรัดตัวของหัวใจส่วนล่างเป็นการทำให้ชีวิตปลอดภัย ทั้งนี้เพราะว่าการสูบฉีดเลือดของหัวใจส่วนล่างนี้เองที่ทำให้เลือดไหลไปสู่สมองและอวัยวะต่างๆได้มากที่สุด ถ้าการบีบตัวดังกล่าวเกิดขึ้นเร็วเกินไป การไหลของเลือดจะลดลงเนื่องจากไม่มีเวลามากพอที่จะใช้สูบเลือดเข้าสู่หัวใจส่วนล่างซึ่งเวลาดังกล่าวก็คือช่วงเวลาระหว่างการหด

กลับไปดูรูปที่ 2-4 ซึ่งเป็นแผนภาพวงจรควบคุมการปลดปล่อยประจุของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจถ้าไม่มีการกระตุ้นจากภายนอกทำให้เกิดการแตกตัวให้ประจุไฟฟ้า เซลล์หัวใจจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงจากสภาพที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศักย์ไฟฟ้า ขณะหยุดนิ่งมีการแตกตัวของอนุภาคให้ประจุไฟฟ้า ด้วยจำนวนคงที่ เซลล์ที่มีการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าเร็วที่สุดจะเป็นเซลล์ที่นำซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยประจุที่จุด โหนดเอวี สัญญาณการปลดปล่อยประจุจากเซลล์นำจะกระจายสู่เซลล์ต่างๆในหัวใจส่วนบนก่อน จากนั้น โหนดเอวีจะนำสัญญาณไฟฟ้า ไปยังเส้นใยไฟฟ้า ซึ่งจะนำไฟฟ้าเข้าสู่หัวใจส่วนบนก่อนที่ จะนำสัญญาณไฟฟ้าไปยังเส้นใยไฟฟ้า ซึ่งจะนำไฟฟ้าสู่หัวใจส่วนล่างอย่างรวดเร็วการกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยประจุในหัวใจส่วนล่างทั้ง 2 ห้องจะเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยเริ่มจากภายในสู่ผนังหัวใจจากภายนอก เซลล์ในหัวใจตอนบนจะมีแนวโน้มน้ำที่จะปลดปล่อยประจุประมาณ 60-100 ครั้งต่อวินาที เซลล์ในโหนดเอวีซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างหัวใจส่วนบนกับหัวใจส่วนล่างมีแนวโน้มน้ำที่จะปลดปล่อยประจุประมาณ 30 ครั้งต่อนาที

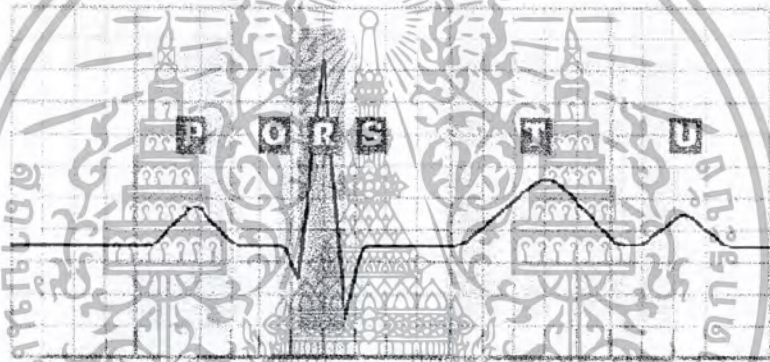
ดังนั้นการหดตัวของหัวใจส่วนบนจะเกิดขึ้นก่อน ตามด้วยระยะเวลาที่ทั้งช่วงและการหดตัวของหัวใจส่วนล่างจากนั้นจะมีระยะหยุดพักก่อนที่จะมีการบีบตัวของหัวใจ หรือวัฏจักรการทำงานของหัวใจครั้งต่อไปจะเกิดขึ้น เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจมีการปลดปล่อยประจุและหดตัวเป็นลำดับเป็นจังหวะ เป็นเวลา สัญญาณจากโหนดเอวีเข้ามาแล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยประจุและหดตามอัตราที่เป็นลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นโหนดเอวีจึงเป็นผู้นำในการทำงานของหัวใจ ถ้าโหนดเอวี

ไม่ทำงาน หรือสัญญาณที่ส่งมาถูกแนวโหนดเอวีที่เป็นโรคกักไว้ หัวใจส่วนล่างจะยังคงบีบรัดตัวได้

อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะว่าเซลล์บางเซลล์ในหัวใจส่วนล่างสามารถที่จะปลดปล่อยประจุได้เอง และทำตัวเป็นผู้นำในหัวใจส่วนล่าง อัตราการเต้นของหัวใจในลักษณะนี้จะช้า (ประมาณ 30 ครั้งต่อ นาที) แต่จังหวะการเต้นของหัวใจเพื่อความอยู่รอดเช่นนี้มักจะเพียงพอที่จะทำให้ชีวิตรอดได้

2.3 ความหมายและรูปร่างของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ลักษณะของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ปกติแสดงได้ดังรูปที่ 2-5 ภาพคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกได้ จะเริ่มตั้งแต่ก่อนการบีบตัวของหัวใจจนกระทั่งมีการคลายตัวในแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงเกิดสัญญาณขึ้นเป็นจังหวะโดยมีความถี่เท่ากับอัตราการเต้นของหัวใจ



รูปที่ 2-5 แสดงผลอิเล็กทรอนิกส์โอแกรมของคนที่ปกติ

ภาพคลื่นไฟฟ้าหัวใจในแต่ละจังหวะประกอบด้วยคลื่นไฟฟ้าย่อย 3 คลื่น คือ

1. ช่วงคลื่น P เป็นผลรวมทางไฟฟ้าขบวนการดีโพลาร์ไรซ์ที่เกิดขึ้นที่หัวใจห้องบนทั้งซ้ายและขวา ซึ่งเกิดก่อนที่หัวใจทั้งสองห้องจะมีการบีบตัว
2. ช่วงคลื่น QRS เป็นผลรวมทางไฟฟ้าจากขบวนการดีโพลาร์ไรซ์ของหัวใจห้องล่างด้านซ้ายและขวาซึ่งเกิดขึ้นก่อนที่หัวใจทั้งสองข้างจะมีการบีบตัว โดยที่ขนาดของคลื่นสัญญาณ R สำหรับการทำงานปกติของหัวใจมีค่าประมาณ 1 มิลลิโวลต์
3. ช่วงคลื่น T เป็นผลรวมทางไฟฟ้าจากขบวนการรีโพลาร์ไรซ์ของหัวใจห้องล่างทั้งซ้ายและขวา และเกิดขึ้นก่อนที่หัวใจทั้งสองห้องจะมีการคลายตัว โดยขนาดของสัญญาณ T มีค่าประมาณ 1/3 ของขนาดของสัญญาณ R

สำหรับขบวนการรีโพลาร์ไรซ์ของหัวใจห้องบน อาจเกิดขึ้นในช่วงระหว่างที่หัวใจห้องล่างมีการบีบตัว แต่ค่าขนาดจะไม่ปรากฏเนื่องจากค่าของสัญญาณช่วงคลื่น QRS มีค่ามากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ

การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจตามมาตรฐานแล้วมีวิธีวัดอยู่ 2 แบบ คือ

1. แบบไบโพลาร์ ลิมบ์ลีด (Bipolar Limb Lead)

วิธีนี้จะวางขั้วไฟฟ้า (electrode) ระหว่างแขนและขา ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงระหว่างจุด 2 จุด ซึ่งมีมาตรฐานของตำแหน่งที่จะวางขั้วไฟฟ้า 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-6

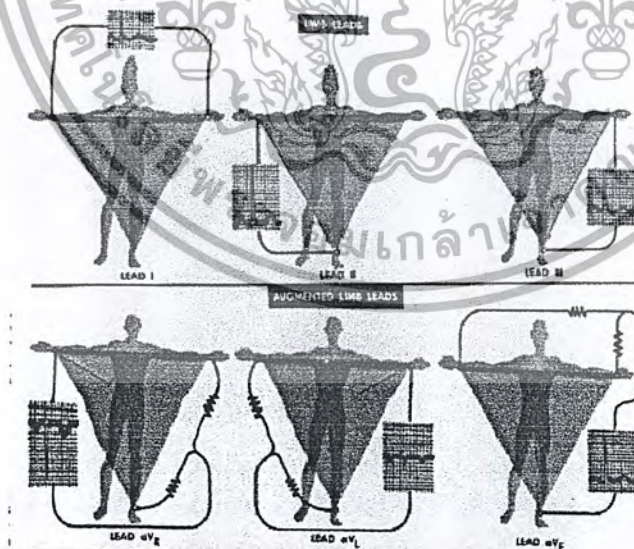
1.1 ลีด I (Lead I) จะใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักดาที่แขนขวาและแขนซ้ายเทียบกัน โดยใช้ศักดาจากขาขวาเป็นสัญญาณอ้างอิง

1.2 ลีด II (Lead II) จะใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักดาที่แขนขวาและแขนซ้ายเทียบกัน โดยใช้ศักดาจากขาขวาและแขนซ้ายเป็นสัญญาณอ้างอิง

1.3 ลีด III (Lead III) จะใช้ขั้วไฟฟ้าวัดศักดาที่แขนขวาและแขนซ้ายเทียบกัน โดยใช้ศักดาจากขาขวาและแขนขวาเป็นสัญญาณอ้างอิง

2. แบบยูนิโพลาร์ ลิมบ์ลีด (Unipolar Limb Lead)

วิธีนี้สามารถตรวจสอบบริเวณหัวใจได้อย่างสะดวกดังรูปที่ 2-7 ที่ขั้วไฟฟ้าของแขน และขาจะรวมความต้านทานเข้าด้วยกันเป็นจุดๆ หนึ่ง และบันทึกการเปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 6 อันที่วางไว้บนหน้าอก



รูปที่ 2-6 แสดงวิธีวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจทั้ง 2 แบบ

2.5 อิเล็กโทรด

การจะวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนร่างกายจะต้องมีตัวเชื่อม นั่นก็คือ *อิเล็กโทรด* ที่ทำงานเสมือนเป็นทรานสดิวเซอร์ เพราะในร่างกายมีการนำกระแสด้วย ไอออน แต่ในเครื่องวัดจะมีการนำกระแสด้วย อิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กโทรดต้องทำหน้าที่เปลี่ยน ionic current ให้เป็น electric current

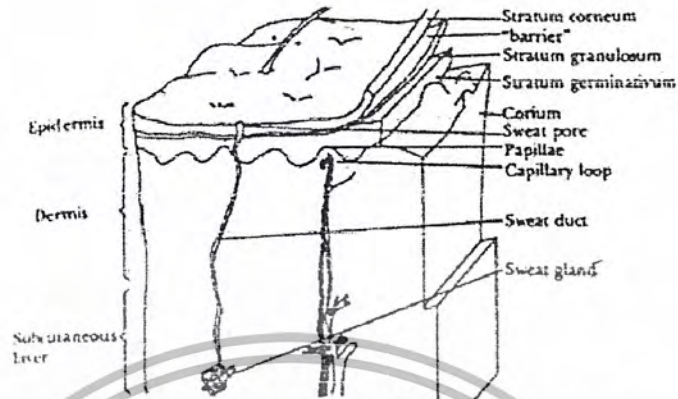
ไดอะแกรมพื้นหน้าระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ แสดงไว้ในรูป กระแสไฟฟ้าจะข้ามจากอิเล็กโทรดไปยัง อิเล็กโทรไลต์จะประกอบด้วย

1. อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ทิศทางตรงข้ามกับกระแสอิเล็กโทรด
2. แคทไอออนเคลื่อนที่ทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า
3. แอนไอออนเคลื่อนที่ทิศทางตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์

สำหรับประจุที่ข้ามพื้นหน้านั้น เนื่องจากไม่มีอิเล็กตรอนอิสระในอิเล็กโทรไลต์และไม่มีแคทไอออนและแอนไอออนในอิเล็กโทรดด้วยจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เพื่อถ่ายทอดประจุระหว่างพาสทั้งสอง ดังนั้นอิเล็กโทรไลต์ที่ห่อหุ้มด้วยโลหะจะมีศักย์ไฟฟ้าต่างไป เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) แต่เราไม่สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของอิเล็กโทรดได้ จึงต้องใช้อิเล็กโทรดอีกอันในการเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของอิเล็กโทรดที่กล่าวมาเป็นภาวะที่ไม่มีกระแสไหล ถ้ามีกระแสไหล ศักย์ไฟฟ้าที่วัดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ความแตกต่างนี้เป็นผลมาจาก *โวลตาไรเซชันของอิเล็กโทรด* ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะสมดุลนั้นเรียกว่า *overvoltage* มีกลไกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ 3 ส่วนคือ

1. Ohmic overvoltage เป็นผลเนื่องจากความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรดทั้งสองอัน เมื่อความต้านทานของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงตามกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าที่เกินทางต้านโอห์ม (Ohm Overvoltage) ก็จะไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับกระแสไฟฟ้า ตามกฎของโอห์ม
2. Concentration overvoltage เกิดจากความเข้มข้นที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการกระจายของไอออนในอิเล็กโทรไลต์
3. Activation overvoltage เป็นผลของการถ่ายทอดประจุ ของปฏิกิริยาการเติมและการลดออกซิเจน ไม่สามารถเปลี่ยนกลับได้หมด



รูปที่ 2-7 แสดงโครงสร้างผิวหนังและวงจรสมมูลของผิวหนังที่อิเล็กโทรด

2.5.1 อิเล็กโทรดที่ปาลาไรซ์และอิเล็กโทรดที่ไม่มีปาลาไรซ์

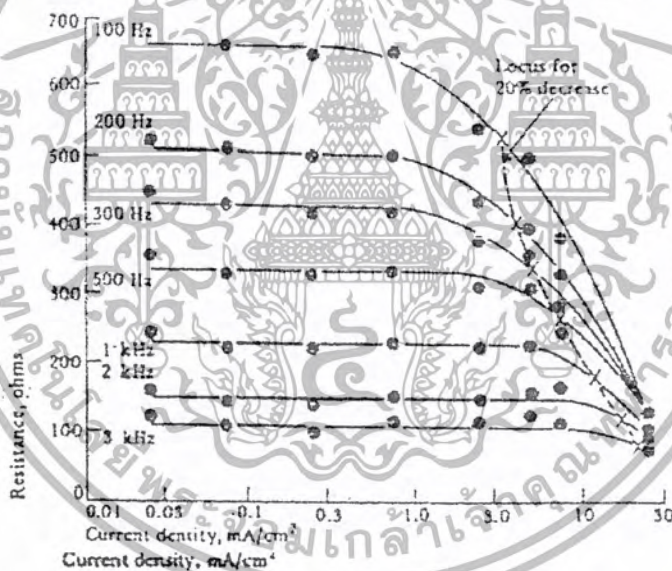
คามทฤษฎีสามารถแบ่งอิเล็กโทรดออกได้เป็น 2 ชนิด

1. อิเล็กโทรดที่ปาลาไรซ์ อิเล็กโทรดนี้เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะไม่มีกระแสไฟฟ้าข้ามพื้นหน้าของอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์จะทำงานเหมือนเป็นคาปาซิเตอร์
2. อิเล็กโทรดที่ไม่มีปาลาไรซ์เมื่อมีกระแสผ่านจะสามารถผ่านพื้นหน้าได้อย่างเสรีโดยไม่สูญเสียพลังงาน ดังนั้นจึงไม่เกิด overvoltage แต่เราไม่สามารถสร้างอิเล็กโทรดที่ปาลาไรซ์และอิเล็กโทรดที่ไม่มีปาลาไรซ์ ได้อย่างสมบูรณ์

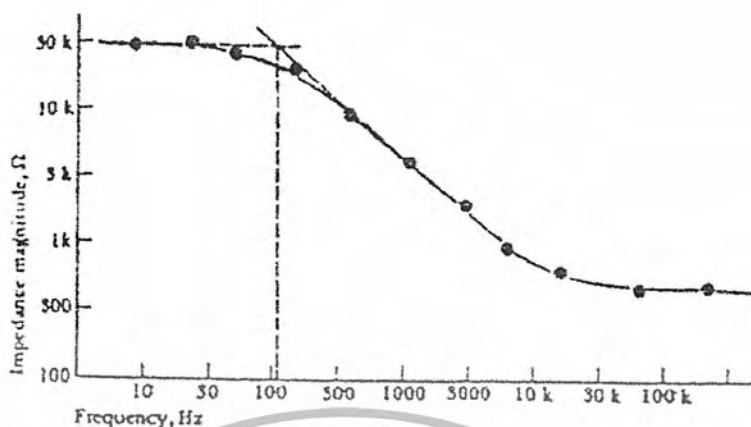
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 คุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์

เราจะพบว่าคุณสมบัติกระแสและแรงดันอิเล็กทรอนิกส์นั้นไม่เป็นเส้นตรง เพราะอิเล็กทรอนิกส์มีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือความไวต่อกระแสที่ผ่านอิเล็กทรอนิกส์ ถ้ามีความเข้มข้นของกระแสมาก คุณสมบัติจะต่างไปจากเดิม และคุณสมบัติยังขึ้นกับรูปคลื่นไฟฟ้าถ้าเป็นไซน์ต้องขึ้นกับความถี่ด้วย เพราะอิเล็กทรอนิกส์เหมือนมีความต้านทานและระดับประจุอยู่ด้วยเมื่อนำอิเล็กทรอนิกส์มาติดที่ผิวหนัง เราต้องพิจารณาพื้นหน้าระหว่างอิเล็กทรอนิกส์, อิเล็กโทรไลต์ และผิวหนังด้วย เราใช้ครีมอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยคลอไรด์ไอออน ทาก่อนที่จะติดอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวประสาน ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผิวหนังคือการวัด galvanic skin reflex (GSR) เพราะเกี่ยวกับเหงื่อและท่อของต่อมเหงื่อ ที่จะมีโซเดียม โปแทสเซียม และคลอไรด์ไอออนหลังจากต่อมเหงื่อ ทำให้เกิดความต่างศักย์ของรูของท่อนำเหงื่อกับผิวหนังแต่ละส่วนประกอบที่ลดความสามารถตัดไปได้กับอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วัดทางชีววิทยารวมกัน ไม่เกี่ยวกับการวัดทางผิวหนัง



รูปที่ 2-8 แสดงคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นหลัก ไรสนิมที่อิมพีแดนซ์ขึ้นกับค่าความถี่ ประจุและความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า

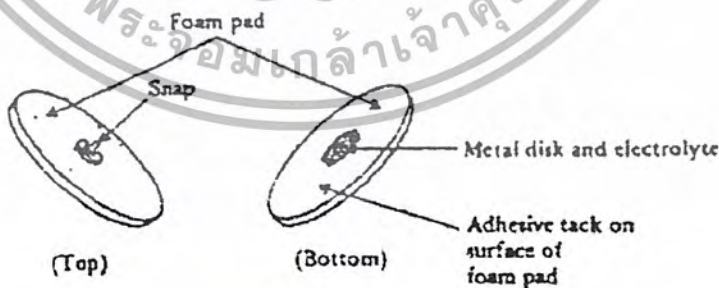


รูปที่ 2-9 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

2.5.3 อิเล็กโทรดแบบแผ่นที่ทำด้วยโลหะ

อิเล็กโทรดที่ใช้น้อยในการรับศักย์ไฟฟ้าทางชีววิทยาคืออิเล็กโทรดที่ทำด้วยโลหะ โดยการนำแผ่นโลหะมาสัมผัสกับผิวหนัง และมักใช้ครีมอิเล็กโทรไลต์ที่เชื่อมระหว่างกลางเพื่อทำให้มีการสัมผัสที่ดียิ่งขึ้น

รูปที่ 2-10 แสดงอิเล็กโทรดแผ่นโลหะแบบต่างๆ เป็นอิเล็กโทรดที่ใช้รวดเร็วและใช้แล้วทิ้ง ทั้งนี้เพื่อประหยัดเวลาและบุคลากรทางด้านนี้ อิเล็กโทรดนี้ประกอบด้วยพลาสติกที่ทำเป็นโฟมและมีแผ่นเงินติดอยู่ข้างหนึ่ง แผ่นเงินนี้อาจเคลือบด้วยซิลเวอร์คลอไรด์ ในการใช้งานนี้ ผู้ใช้เพียงแต่ทำความสะอาดผิวหนัง เปิดห่ออิเล็กโทรดครั้งกระกายที่เปิดอยู่แล้วกดอิเล็กโทรดลงบนผิวหนังทันที



รูปที่ 2-10 อิเล็กโทรดแผ่นที่ทำด้วยโฟม (ชนิดใช้แล้วทิ้งเลย) สำหรับเครื่อง อี ซี จี ใช้ปิดผิวหนังที่ติด แชน - ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ข้อแนะนำในการใช้อิเล็กโทรดในทางปฏิบัติ

ในการใช้อิเล็กโทรดโลหะสำหรับวัดศักดาทางไฟฟ้าหรือกระตุ้นก็ดี จะต้องคำนึงถึงข้อปฏิบัติ 5 ประการ ดังต่อไปนี้ คือ

1. ในการสร้างอิเล็กโทรดรวมทั้งสายไฟที่นำมาต่อ โดยเฉพาะส่วนที่จะต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อของร่างกาย ควรเป็นวัสดุชนิดเดียวกันตลอด เมื่อใช้วัสดุอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมก็ควรจะใช้ฉนวนหุ้มไว้ ไม่ให้สัมผัสกับเนื้อเยื่อหรืออิเล็กโทรไลต์ของร่างกาย โลหะต่างชนิดกันไม่ควรนำมาสัมผัสกันเพราะจะมีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่างกัน นอกจากนี้เมื่อสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้น เป็นผลให้มีโพลาไรเซชันเพิ่มเติม และมักทำให้ อิเล็กโทรดอันหนึ่งถูกกัดกร่อนไป ปัจจุบันนี้ทำให้ศักดาไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีเสถียรภาพน้อย ทำให้เพิ่มการรบกวนทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดได้

2. เมื่อใช้อิเล็กโทรดคู่ใดคู่หนึ่งสำหรับวัดศักย์ไฟฟ้าในร่างกาย ควรใช้อิเล็กโทรดที่ทำด้วยวัสดุอย่างเดียวกัน เนื่องจากครึ่งเซลล์ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นศักย์ไฟฟ้า ดี ซี ที่ป้อนเข้าไปยังอินพุทของแอมพลิไฟเออร์จะได้มีค่าน้อยมาก อันเป็นการทำให้การอิมิตัวของแอมพลิไฟเออร์ไม่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อแอมพลิไฟเออร์ที่ใช้เป็นชนิด ดีซี และมีกำลังขยายสูง

3. อิเล็กโทรดที่ติดบนผิวหนังมักจะหลุดง่าย อย่างไรก็ตาม ปัญหาเหล่านี้จะไม่เกิดขึ้น ถ้าอิเล็กโทรดได้รับการออกแบบที่ดี เส้นลวดที่ต่อออกมาจากอิเล็กโทรดควรจะอ่อนตัวได้มาก แต่ต้องแข็งแรง จุดต่อของเส้นลวดที่เข้าไปยังแผ่นอิเล็กโทรดมักจะหลุดง่าย เนื่องมาจากภาระโค้งงอของเส้นลวดที่มีอยู่เรื่อยๆ จะคำนึงถึงข้อนี้ด้วยเสมอในการออกแบบ

4. อิเล็กโทรดมักถูกใช้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสูง ฉนวนของอิเล็กโทรดเหล่านี้มักทำด้วยวัสดุจากพวก พลาสติก ซึ่งสามารถดูน้ำได้ดีเมื่อใช้ไปนานๆ

5. การใช้แอมพลิไฟเออร์ที่มีอินพุทสูงๆ ทำให้การบันทึกไฟได้ผลดี ถ้าอิมพีแดนซ์ของแอมพลิไฟเออร์ที่ค่าไม่สูงพอ นอกจากจะได้สัญญาณที่มีความถี่สูงลดลงแล้ว ยังมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปอีกด้วย

2.6 ความต้องการโดยเฉพาะของเครื่อง อี ซี จี

คณะกรรมการการตรวจ อี ซี จี ของสมาคมโรคหัวใจแห่ง U.S.A. ได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับเครื่อง อี ซี จี มาตรฐานที่ใช้เขียนโดยตรงบนกระดาษ Pipberger ค.ศ. 1975 ข้อเสนอแนะดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

1. Linearity and distortion ความแม่นยำและความผิดเพี้ยนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเครื่อง อี ซี จี การเบี่ยงเบนไปจากความถูกต้องควรมีค่าน้อยกว่า 5 % เมื่อทำการบันทึกบนกระดาษด้วยความถี่ 5 และ 50 มม. ความต้องการนี้ครอบคลุมคลื่นไฟฟ้าที่มีความถี่ระหว่าง 0.05 - 100 Hz

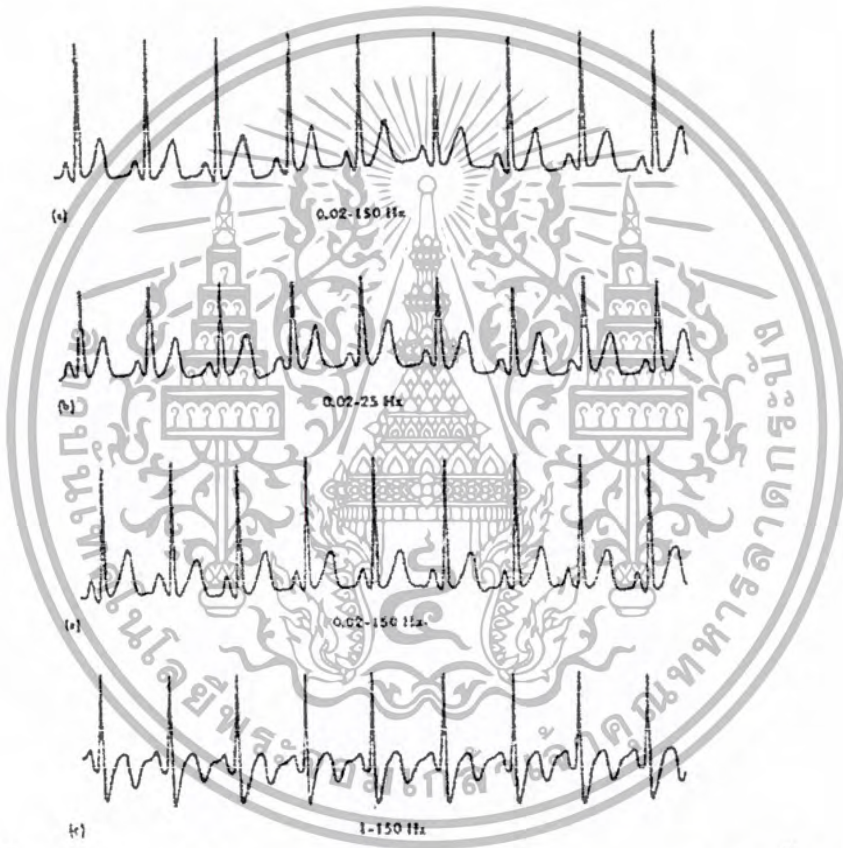
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่คิดค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Input Range เครื่อง อี ซี จี ต้องสามารถขยายสัญญาณได้ในช่วงกว้าง คือ ช่วงที่มีความสูงได้ถึง 10 mv.
3. Input Impedance and current อินพุตอิมพีแดนซ์ระหว่างอิเล็กโทรดกับพื้นดิน ควรมีค่าน้อยกว่า 5 M Ω ในระหว่างการวัดนั้น อิเล็กโทรดทุกอันควรจะทำการต่อลงดินให้หมด เครื่อง อี ซี จี ไม่ควรให้มีกระแสไฟฟ้ามากกว่า 10 ไมโครแอมแปร์ ไหลผ่านผู้ป่วย
4. Central Terminal วงจรซิสเตมส์ที่ต้องการเพื่อนทำให้เกิด Central Terminal ไม่ควรจะทำให้มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณเพิ่มขึ้นจากที่ได้กล่าวในข้อที่ 1 หรือเพิ่มขึ้น 2% เมื่อรวมกับความต้องการทางด้านอินพุตอิมพีแดนซ์แล้ว ค่ารีซิสเตนซ์ที่น้อยที่สุดควรมีค่า 3.3 เมกกะโอห์ม
5. Gain เครื่อง อี ซี จี ควรปรับกำลังขยายได้ 3 ค่า คือ 5, 10 และ 20 มม./มม. โวลต์
6. Frequency Response การตอบสนองของเครื่อง อี ซี จี ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.14 ถึง 25 Hz ควรเท่ากันจะดี ไม่ควรต่างกันเกิน 0.5 dB สำหรับสัญญาณที่มีความสูงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มม. บนกระดาษบันทึกเมื่อใช้ความถี่ 25 Hz แล้ว การตอบสนองต่อสัญญาณรูปไซน์จะลดลงมากกว่า 3 dB
7. Common-mode-Rejection Ratio (CMRR) ในทุกตำแหน่งของสวิตช์ที่ใช้เลือกสายต่อ เมื่อปรับตั้งกำลังขยายเครื่องบันทึกไว้ที่ 10 มม./มม. โวลต์ และสายต่ออิเล็กโทรดทั้งหมดเข้ากับไฟฟ้าสลับ 60 Hz 120 V พร้อมกับสายอีกข้างหนึ่งลงดิน ส่วนสายอีกข้างหนึ่งนั้น ซึ่งต่อกับจุดรวมของสายอิเล็กโทรดทั้งหมด จะนำไปต่ออนุกรมกับคาปาซิเตนซ์ 22 pF ผลที่ได้นั้นไม่ควรจะมีการเคลื่อนที่ของเข็มมากกว่า 20 มม. ข้อกำหนดเฉพาะนี้ยังคงใช้ได้เมื่อต่อรีซิสเตนซ์ 100 กิโลโอห์ม แบบอนุกรมกับสายอินพุต
8. Calibration เครื่อง อี ซี จี ควรจะมีศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 1.0 มม. โวลต์ สำหรับปรับเปรียบเทียบค่ากำลังขยายของเครื่อง
9. Chart Speed คือความเร็วของกระดาษบันทึกมาตรฐานควรเป็น 25 มม./วินาที นอกจากนั้นควรมีความเร็วสูงกว่าด้วย คือความเร็ว 50 มม./วินาที ความแม่นยำของความเร็วควรมีค่า 2 %
10. Output เอาท์พุทอิมพีแดนซ์ควรมีค่าน้อยกว่า 100 โอห์ม เอาท์พุทสูงสุดควรมีค่า 1 V
11. Event Marker อุปกรณ์ที่ทำเครื่องหมายด้วยมือควรมีไว้ในเครื่อง อี ซี จี สำหรับให้ผู้ใช้เครื่องทำเครื่องหมายเมื่อทำการบันทึกคลื่นไฟฟ้า อี ซี จี

2.7 ปัญหาที่พบบ่อยในการออกแบบและใช้เครื่อง อี ซี จี

2.7.1 ความผิดเพี้ยนทางด้านความถี่

เมื่อเครื่อง อี ซี จี มีการตอบสนองความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป คือ ไม่ได้มาตรฐานที่กล่าวไว้ข้างต้น จะมีความผิดเพี้ยนของคลื่น อี ซี จี ดังแสดงให้เห็นในรูป 2-12



รูปที่ 2-11 แสดงความผิดผลาดของรูปคลื่น อี ซี จี ซึ่งมีผลมาจากความผิดเพี้ยนของความถี่ รูปที่ 2-11a แสดงคลื่น อี ซี จี ปกติ จากเครื่องมือ ซึ่งมีการตอบสนองความถี่กว้างกว่า 0.05-100 Hz

รูปที่ 2-11b แสดงคลื่น อี ซี จี ที่บันทึกได้ด้วยเครื่องที่มีการตอบสนองความถี่จาก 0.02-25 Hz ความผิดปกตินี้ เรียกว่า high-frequency distortion รูปคลื่นแต่เดิมจะเป็นนุ่มแหลม เมื่อความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นจะมีขนาดกลม และความสูงยังลดลงด้วย

รูปที่ 2-11c แสดงคลื่น อี ซี จี จากต้นตอเดียวกัน แต่บันทึกด้วยเครื่องที่มีการตอบสนองความถี่ 1-150 Hz สังเกตความผิดเพี้ยนที่พื้นฐานเครื่อง อี ซี จี เส้นพื้นฐานจะไม่อยู่ในแนวราบ

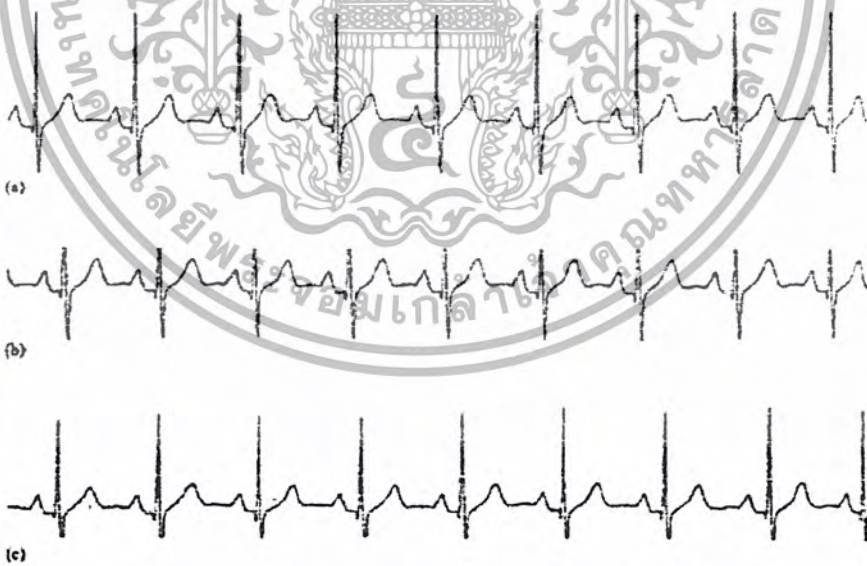
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตว่า คลื่นซึ่งแต่เดิมมีขดเดียว จะกลายเป็น 2 ขด ความผิดปกติเช่นนี้จะเรียกว่า low-frequency distortion

2.7.2 การอิมิตัวหรือความผิดเพี้ยนที่ตัดการทำงาน (Saturation or Cut off Distortion)

Offset Voltage ที่อิเล็กทรอนิกส์หรือการปรับแอมพลิไฟเออร์ไม่ถูกต้องในเครื่อง อี ซี จี อาจทำให้เกิดการอิมิตัวหรือความผิดเพี้ยนที่ตัดการทำงาน ซึ่งทำให้รูปร่างของคลื่น อี ซี จี เปลี่ยนไปได้มาก รูปที่ 2-12a แสดงคลื่น อี ซี จี ปกติ ส่วนรูปที่ 2-12b แสดงคลื่นไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไปจากการเปลี่ยนระดับไปสู่การอิมิตัว ทำให้ขดคลื่น อี ซี จี ถูกตัดออกไป เนื่องจากแอมพลิไฟเออร์ไม่สามารถมีเอาท์พุทเกินศักย์ไฟฟ้าที่อิมิตัวได้

รูปที่ 2-12c แสดงการเปลี่ยนแปลงทำงานของตัวเองกัน เมื่อส่วนล่างของคลื่น อี ซี จี ถูกตัดออกไป ทั้งนี้ เป็นผลจากการอิมิตัวทางด้านลบของแอมพลิไฟเออร์ สังเกตว่าในกรณีเส้นพื้นฐานจะเรียกขดคลื่น P และ T อาจยังมองเห็นได้จากภาพบันทึก หรืออาจต่ำกว่าระดับที่ถูกตัด ถ้าเป็นเช่นนี้จะเห็นแต่คลื่น R อย่างเดียว



รูปที่ 2-12 แสดงความผิดพลาดของคลื่น อี ซี จี ซึ่งมีผลจากการผิดเพี้ยนที่เกิดจากแอมพลิไฟเออร์

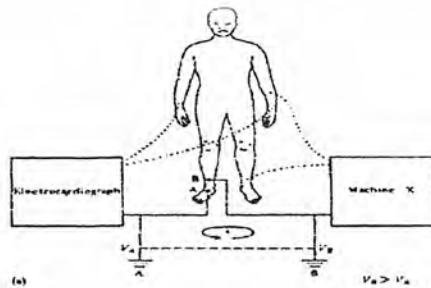
2.73. วงจรสายดิน (Ground Loops)

ผู้ป่วยที่กำลังถูกบันทึก อี ซี จี เช่นในมอนิเตอร์การทำงานของหัวใจเป็นต้น ย่อมได้รับการต่อ อุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างอื่นด้วย อุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละอย่างจะมีการต่อสายดินของตนเอง อาจจะโดยอาศัยร่วมไปกับสายไฟ หรือในบางกรณีนั้นจะต่อโดยผ่านไปกับสายดินใหญ่ไปยังจุดสายดินในห้อง

วงจรสายดินอาจเกิดขึ้นในภาวะที่แสดงในรูป 2-13a ในรูปตัวนี้ ผู้ป่วยได้ต่อกับเครื่อง 2 เครื่อง คือ เครื่อง อี ซี จี และเครื่องอื่น แต่ละเครื่องมีสายดินต่อกับตัวของผู้ป่วย เครื่อง อี ซี จี ถูกต่อลงดิน โดยผ่านทางปลั๊กของสายไฟที่เรียกว่าสายดิน A ส่วนเครื่องอีกเครื่องหนึ่งนั้นก็มีสายดิน โดยผ่านทางสายไฟเช่นเดียวกัน แต่มีปลั๊กอยู่อีกที่อีกแห่งหนึ่งซึ่งมีสายดินคนละเส้น เรียกว่าเป็นสายดิน B ถ้าสายดิน B มีศักย์สูงกว่า สายดิน A จะมีกระแสไฟฟ้าไหลจากสายดิน B ผ่านไปยังตัวเครื่องและ ผู้ป่วย และผ่านอิเล็กโทรดของเครื่อง อี ซี จี ไปลงที่จุด A กระแสไฟฟ้างกล่าว นอกจากจะมีปัญหาทางด้านความปลอดภัยแล้วยังทำให้ศักย์ไฟฟ้าในตัวผู้ป่วยสูงกว่าของสายดิน ซึ่งต่อกับกับตัวเครื่องตัวอย่างแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2-13a ผู้ป่วยจะมีศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่างสายดิน B และสายดิน A จึงทำให้เกิด common-mode voltage บนเครื่อง อี ซี จี ซึ่งจะ ทำให้ CMRR ต่ำ ดังนั้น จึงเป็นการเพิ่มปริมาณของสัญญาณรบกวน

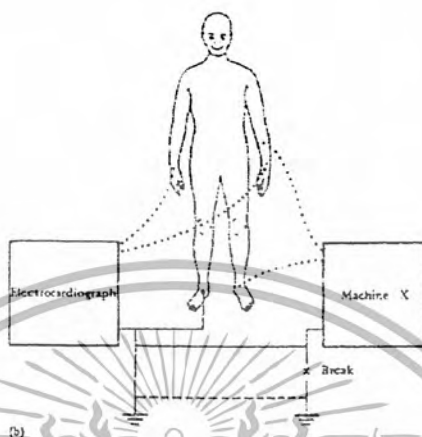
ทางเดินของกระแสไฟฟ้าระหว่างสายดินทั้ง 2 ดังแสดงในรูป 2-13a นั้นเรียกว่า Ground loop ปกติการเช่นนี้ควรพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้นในระบบของอุปกรณ์ทางการแพทย์

รูปที่ 2-13b เป็นภาวะที่ควรจะทำให้เกิดขึ้น ในรูปนี้ เครื่องทั้ง 2 มีสายดินที่ต่อมายังจุดเดียวกัน จึงไม่มีวงจรสายดินเกิดขึ้น ศักย์ไฟฟ้าสายดินของเครื่อง อี ซี จี และอีกเครื่องหนึ่งควรจะอยู่ในระดับเดียวกัน ในกรณีเช่นนี้จึงไม่ควรมียึดไฟฟ้าตกรวมสายดิน อันจะทำให้เครื่องมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจุดสายดินถึงแม้ว่าผู้ป่วยจะมีสายดินที่ต่อกับเครื่องเพียงเครื่องเดียว แต่ก็ไม่มีกระแสไฟฟ้าในวงจรสายดินไหลผ่านตัวของผู้ป่วย ตามปกติแล้วเครื่องทั้ง 2 จะมีศักย์ไฟฟ้าของสายดินเท่ากัน ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าในวงจรสายดินไหลผ่านตัวของผู้ป่วย ถึงแม้ว่าผู้ป่วยจะไปสัมผัสกับสายดินของเครื่องก็ตาม



รูปที่ 2-13a แสดงอันตรายที่เกิดจากวงจรสายดิน

2.7.4. สายต่อที่ขาด (Open Lead Wire)

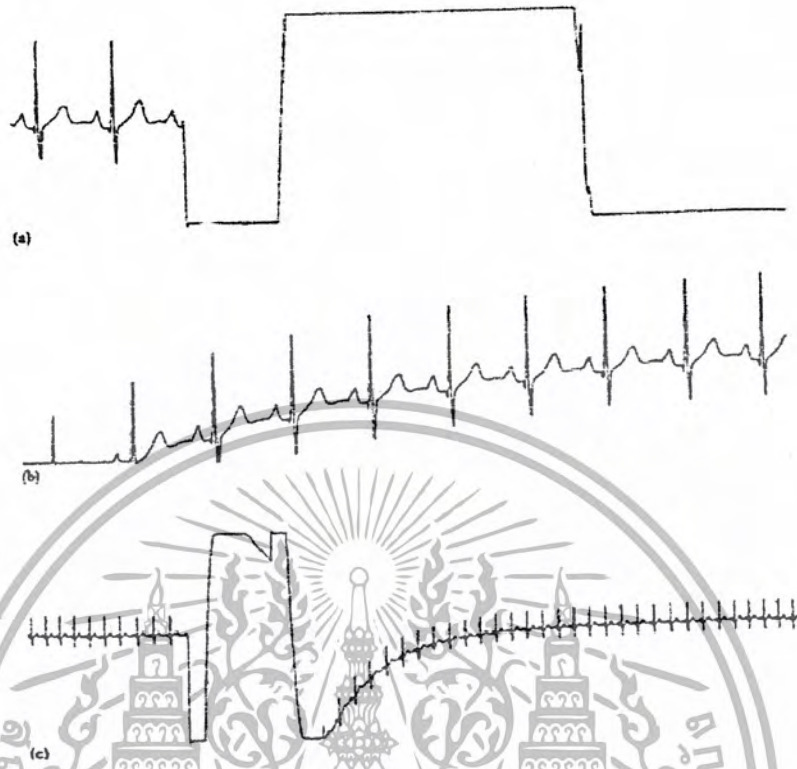


รูปที่ 2-13 b แสดงอันตรายที่เกิดจากรอยต่อที่ขาด

มีหลายครั้งที่สายต่อที่อิเล็กทรอนิกส์ของเครื่อง อี ซี จี เส้นใดเส้นหนึ่งขาดไป ศักย์ไฟฟ้าที่สูงสามารถเหนี่ยวนำในสายต่อที่ขาดนี้ได้ เป็นผลทำให้ปากที่ใช้บันทึกมีการเคลื่อนไหวไปตามคลื่นความถี่ของคลื่นไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น ภาวะเช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้แม้สายไม่ขาด เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์สัมผัสไม่ติดกับตัวผู้ป่วย

2.7.5. ถึงที่รบกวนเกิดจากศักย์แรงสูงระยะสั้น

ในบางภาวะที่กำลังตรวจวัด อี ซี จี จะต้องทำการดีฟบริลเรชัน ในกรณีเช่นนี้จะต้องป้อนคลื่นศักย์ไฟฟ้าสูง และกระแสจำนวนมากผ่านตัวผู้ป่วย ดังนั้นจึงเกิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูงคร่อมอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่อง อี ซี จี ศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้มีค่าสูงกว่าสัญญาณ อี ซี จี มาก ศักย์ไฟฟ้านี้จะทำให้เข็มของเครื่อง อี ซี จี เปลี่ยนระดับไปมาก ดังแสดงในรูป 2.14 ทั้งนี้เนื่องจากการอิมพัลส์ของแอมพลิไฟเออร์ ในเครื่อง อี ซี จี คลื่นไฟฟ้านี้มีจำนวนมากพอที่จะทำให้มีการเก็บประจุไฟฟ้าของคาปาซิแตนซ์ที่อยู่ในแอมพลิไฟเออร์ แล้วหลังจากนั้นจึงค่อยๆลดกลับมาสู่พื้นฐานใหม่ แต่ใช้เวลานาน ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับความถี่ของแอมพลิไฟเออร์ ต้นคออีกอย่างของสิ่งรบกวนในการทำงานเดียวกันนี้คือ การเคลื่อนไหวของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้ามากกว่าศักย์ไฟฟ้าจาก อี ซี จี



รูปที่ 2-14 ผลของสิ่งรบกวนที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าแรงสูงระยะสั้น

a) การเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น b) กลับคืนสู่สภาพปกติ

c) สภาพการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน แต่ลดกำลังขยายของ first-order recover ของระบบ

2.7.6. การรบกวนจากเครื่องไฟฟ้า

ต้นตอสำคัญของการรบกวนเมื่อทำการบันทึก หรือมอนิเตอร์คลื่นไฟฟ้า อี ซี จี คือการรบกวนที่เกิดจากระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบไฟฟ้านั้นนอกจากจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้า ให้กับเครื่อง อี ซี จี แล้วยังต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ภายในห้องเดียวกันอีกด้วย การรบกวนดังกล่าวอาจเกิดขึ้นด้วยกลไกที่แตกต่างกันอีกด้วย

สนามไฟฟ้าที่ควมระหว่างเครื่องจ่ายไฟฟ้ากับเครื่อง อี ซี จี หรือตัวผู้ไวเ็นผลจากสนามไฟฟ้ารอบๆ สายไฟ หรือรอบๆเครื่องใช้ไฟฟ้า สนามไฟฟ้าเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้แม้แต่ยังไม่ได้ปล่อยพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่เครื่อง การรบกวนจึงเป็นเสมือนหนึ่งมีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่กับสายไฟที่จ่ายพลังงานไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านคาปาซิเตอร์ C3 ที่ควมระหว่างสายไฟกับเครื่อง อี ซี จี และไม่ทำให้เกิดการรบกวน C1 เป็นคาปาซิเตอร์ระหว่างสายไฟที่จ่ายพลังงานกับสายอิเล็กโทรดอีกเส้นหนึ่ง กระแสไฟฟ้า i_{d1} ไม่สามารถไหลเข้าไปในเครื่อง อี ซี จี เพราะมีอิมพีแดนซ์สูง แต่จะไหลผ่านรีซิสแตนซ์ของผิวหนังกับอิเล็กโทรด Z_1, Z_p เพื่อลงดิน ในทำนองเดียวกัน i_{d2} จะไหลผ่าน Z_2, Z_G เพื่อลงดิน อิมพีแดนซ์ระหว่างร่างกายซึ่งมีค่าประมาณ 50 โอห์ม นั้นสามารถตัดทิ้งไปได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆ ที่แสดงไว้ ศักย์ไฟฟ้าที่ขยายแล้วปรากฏระหว่างอินพุท A และ B ดังสมการ

$$V_A - V_B = I_{d1}Z_1 - I_{d2}Z_2$$

ถ้าสายไฟสองเส้นวางอยู่ใกล้กัน โดยที่ I_{d1} เท่ากับ I_{d2} แล้วจะได้สมการ

$$V_A - V_B = I_{d1}(Z_1 - Z_2)$$

ค่าที่ได้เมื่อใช้สายยาว 9 เมตรนั้น จะได้ $I_d = 6 \text{ nA}$ อิมพีแดนซ์ของผิวหนังกับอิเล็กโทรดอาจแตกต่างกันได้มากถึง 20 กิโลโอห์ม ดังนั้นจะได้ค่า $V_d = (6 \text{ nA})(20\text{k}) = 120 \text{ uV}$

ค่าดังกล่าวทำให้เกิดการรบกวนได้มากพอสมควร สามารถทำให้ลดลงได้โดยการหุ้มกำบังสายอิเล็กโทรดพร้อมด้วยต่อลงดินด้วย ซึ่งการกระทำนี้ได้ทำไว้แล้วในเครื่อง ECG ที่ทันสมัยเป็นส่วนใหญ่ การลดอิมพีแดนซ์ระหว่างผิวหนังกับอิเล็กโทรดก็สามารถช่วยได้เช่นกัน

กระแสไฟฟ้าสามารถไหลจากสายไฟเข้าไปในร่างกายได้ กระแส i_{db} จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของสายดิน Z_G เพื่อลงดิน ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมจะทำให้เกิด Common mode voltage V_{CM} ทั่วร่างกาย ดังสมการ $V_{CM} = i_{db} Z_G$ เมื่อได้แทนค่าแล้ว จะได้ค่าในสมการ $V_{CM} = 10 \text{ mV}$

ในสภาวะแวดล้อมที่มีกระแสไฟฟ้าน้อย ซึ่ง i_{db} มากกว่า 1 uA , V_{CM} สามารถมีค่ามากกว่า 50 mV ถ้าแอมพลิฟายเออร์สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ จะไม่เกิดปัญหาแต่อย่างใด เพราะวาคิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิฟายเออร์สามารถกำจัด Common mode voltage ใดๆก็ได้ แอมพลิฟายเออร์ที่แท้จริงนั้นจะต้องมีอินพุทอิมพีแดนซ์ที่มีค่า Z_{in} ดังนั้น V_{CM} จะมีค่าลดลงเนื่องจากถูกจำกัดโดยอิมพีแดนซ์ของผิวหนังกับอิเล็กโทรดและ Z_{in} ดังแสดงในสมการ

$$V_A - V_B = V_{CM} [Z_{in}/(Z_{in} + Z_1) - Z_{in}/(Z_{in} + Z_2)]$$

แต่เนื่องจากว่า Z_1 และ Z_2 มีค่าน้อยกว่า Z_{in} มากจะได้ค่าดังสมการ

$$V_A - V_B = V_{CM} [(Z_1 - Z_2)/Z_{in}]$$

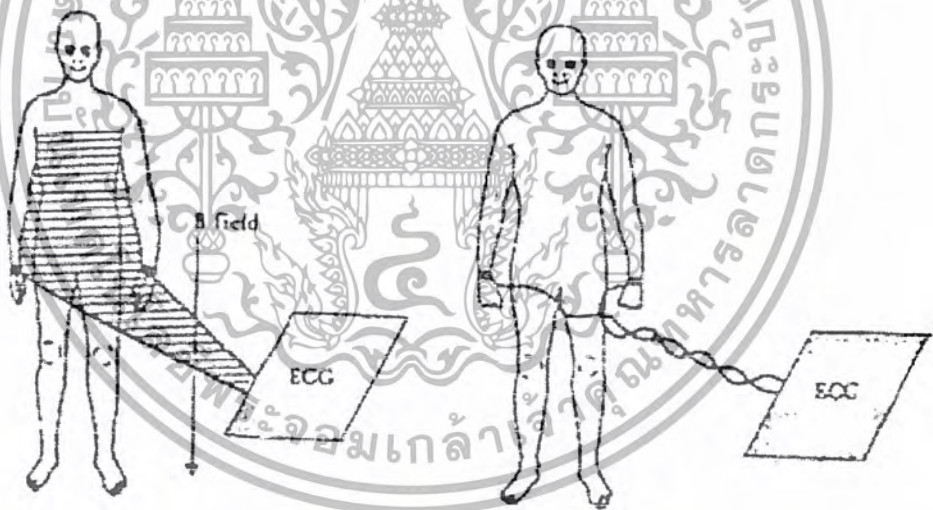
เมื่อได้แทนค่าต่างๆลงในสมการ จะได้ $V_A - V_B = 40 \text{ V}$ ผลเช่นนี้จะสังเกตได้ในการตรวจวัดเครื่อง อี ซี จี และเห็นได้มากขึ้นเมื่อทำการตรวจวัด อี ซี จี สามารถทำให้ลดน้อยลงได้โดยการลดอิมพีแดนซ์ ระหว่างผิวหนังกับอิเล็กโทรดและเมื่อเพิ่มอินพุทอิมพีแดนซ์ของแอมพลิฟายเออร์

ดังนั้น เราจะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างผิวหนังกับอิเล็กโทรด มีความสำคัญในการออกแบบแอมพลิฟายเออร์ในทางชีววิทยา มักจะมี common-mode voltage เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้น

ในความไม่สมดุลของอินพุตกับอิมพีแดนซ์ เป็นปัจจัยสำคัญในการตรวจหา CMRR โดยไม่คำนึงว่าดิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิไฟเออร์จะมีคุณสมบัติที่ดีเพียงใด

ต้นตออย่างอื่นของการรบกวนที่เกิดจากสายไฟจ่ายพลังงานคือ การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้ารอบสายตัวนำสนามแม่เหล็กอาจเกิดจากทรานฟอเมอร์ หรือขดลวดของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ หากสนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปในขดลวดที่สร้างขึ้นโดยเครื่อง อี ซี จี สายต่อ และตัวผู้ป่วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-15 ศักย์จะเกิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในวงจรนี้ศักย์ไฟฟ้านี้จะได้สัดส่วนกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและพื้นที่ของขดลวดรอบตัวที่ เกิดขึ้นด้วย สามารถการรบกวนนี้ได้โดย

1. การลดสนามแม่เหล็ก โดยการหุ้มกำบัง
2. การหลีกเลี่ยงสนามแม่เหล็ก โดยการวางเครื่อง อี ซี จี และสายต่อให้ห่างจากสนามแม่เหล็ก
3. การลดพื้นที่ของขดลวดรอบตัว โดยการบิดสายต่อให้พันเป็นเกลียว



รูปที่ 2-15 การลดสัญญาณรบกวนโดยการพันสายเป็นเกลียว

2.7.7 การรบกวนทางไฟฟ้าจากต้นตออื่น ๆ

การรบกวนทางไฟฟ้าจากต้นตออื่นสามารถมีผลต่อการบันทึกคลื่นไฟฟ้า อี ซี จี ได้ การรบกวนจากแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมาจากสถานีวิทยุที่อยู่ใกล้ หรือสถานีโทรทัศน์ หรือสถานี เรดาร์ เครื่อง

อี ซี จี สามารถรับคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ได้ และเรคคิไฟเออร์โดยเครื่อง บังที่คลื่นไฟฟ้าอาจ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทแพทย์ศิริราชเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจะเอามาใช้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงได้โดยพื้นที่หน้าตัด ระหว่างอิเล็กโทรด และอิเล็กโทรไลต์ สายต่อและตัวผู้ปวยทำหน้าที่เป็นเสาอากาศ

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเกิดขึ้น โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความถี่สูงซึ่งอยู่ในโรงพยาบาลเอง เครื่องตัดจี้ด้วยไฟฟ้า และเครื่องไดอะเทอร์มียังมักเป็นต้นตอที่สำคัญ การแผ่รังสีของแม่เหล็กไฟฟ้า อาจเกิดจากเครื่องเอ็กซเรย์หรือสวิตช์หรือรีเลย์ของเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ของโรงพยาบาล แม้แต่การกระพริบของหลอดไฟลูออเรสเซนต์ ก็ยังสามารถทำให้เกิดการรบกวนได้เช่นกัน

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำให้น้อยลง โดยการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดเล็กให้ขนาดเท่ากับเครื่อง อี ซี จี รีแอกเตนซ์ของเครื่องนี้มีค่าสูงมาก ที่ต่อข้ามคลื่นความถี่ในช่วงของคลื่น อี ซี จี ดังนั้นจึงไม่ทำให้อินพุทอิมพีแดนซ์ของเครื่อง อี ซี จี ลดลง อย่างไรก็ตาม ความถี่ของคลื่นวิทยุนี้ ค่าของรีแอกเตนซ์มีค่าต่ำพอที่จะทำให้คลื่นรบกวนทางแม่เหล็ก ไฟฟ้าลัดวงจรไปโดยไม่เข้าไปทางอินพุทของแอมพลิฟายเออร์

ยังมีการรบกวนทางไฟฟ้าซึ่งมีต้นตอทางร่างกายเอง การรบกวนนี้เกิดจากกล้ามเนื้อลายที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรด เมื่อใดก็ตามที่กล้ามเนื้อเหล่านี้หดตัว จะทำให้เกิดคลื่นไฟฟ้า อี เอ็ม จี และป้อนเข้าไปทำการรบกวนในเครื่องอี ซี จี ได้

2.8. การป้องกันคลื่นไฟฟ้าช่วงสั้นที่มารบกวน (transient protection)

วงจรที่ใช้แยก ซึ่งได้ออกแบบโดยทั่วไปนั้น จะใช้ป้องกันผู้ปวยจากอันตรายที่เกิดจากไฟฟ้าลัดที่เกิดขึ้นระหว่างตัวผู้ปวยกับตัวเครื่อง และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงในบางกรณีจากต้นตออื่นที่ผ่านตัวผู้ปวยเข้าไปในเครื่อง อี ซี จี อาจทำให้เครื่องได้รับอันตรายจนเสียหายได้ เช่น เครื่องตัดจี้ด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในห้องผ่าตัด ในขณะที่ใช้เครื่องตัดจี้ด้วยไฟฟ้านั้น ถ้าสายดินที่ต่อกับตัวเครื่องหลุดหรือขาดไป จะมีศักย์ไฟฟ้าในตัวผู้ปวยเมื่อเทียบเท่าสายดินสูงมาก ศักย์ไฟฟ้าที่สูงนี้จะเข้าไปในเครื่อง อี ซี จี หรือ เครื่องมอนิเตอร์หัวใจ ถ้ามีจำนวนมากพอ ก็สามารถทำให้เกิดอันตรายต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนั้นยังทำให้เกิดคลื่น ไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ ในภาพบันทึก ดังรูปที่ 2-13

ตามอุดมคติแล้ว เครื่อง อี ซี จี ควรจะได้รับการออกแบบเพื่อป้องกันอันตรายดังกล่าว แต่อย่างไรก็ดี อาจไม่มีระบบป้องกันหรือป้องกันได้หมด วงจรที่ใช้ป้องกัน โดยมีอุปกรณ์จำกัดศักย์ไฟฟ้า 2 ปลายที่ต่ออยู่ระหว่างอิเล็กโทรด แต่ละอันของผู้ปวยกับสายดิน

การต่อไดโอด 2 อันให้กลับข้ามกัน เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ถึงระดับ 700 mV ไดโอดตัวใดตัวหนึ่งจะทำงานจึงช่วยจำกัดศักย์ไฟฟ้าให้อยู่ที่ระดับ 700 mV ได้ อย่างไรก็ดี การจำกัดไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใดที่ระดับ 700 mV แต่จะค่อยๆเกิดขึ้นที่ระดับ 300 mV ดังนั้น สัญญาณที่ถูกบันทึกจึงอาจมีความ

ผิดเพี้ยนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การลด common-mode และการรบกวนอย่างอื่น

ดังที่ได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่า common-mode voltage สามารถทำให้เกิดการรบกวนในแอมพลิไฟเออร์ซึ่งใช้ในทางชีววิทยาได้มาก ถึงแม้ว่า แอมพลิไฟเออร์ที่มี high common-mode rejection ratio ที่สามารถทำการลดผลที่เกิดขึ้นจาก common-mode voltage ได้ วิธีที่ดีกว่าในการแก้ปัญหา คือ การกำจัดต้นตอของศักย์ไฟฟ้ารบกวนนั้น ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะกล่าวถึงต้นตอของสิ่งรบกวนอื่นๆ พร้อมทั้งการค้นหาที่จะทำให้ลดน้อยลง

2.9.1 การรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

การรบกวนนี้ สามารถเข้ามาได้ โดยการควบคุม คาปาซิแตนซ์ และการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก เราสามารถลดการรบกวนเหล่านี้ โดยการกำจัดต้นตอด้วยวิธีหุ้มกำบัง (shielding) การหุ้มกำบังไฟฟ้าสถิตย์นั้น โดยการต่อวัสดุที่นำไฟฟ้าได้กั้นอยู่ระหว่างสนามไฟฟ้าและระบบที่จะทำการตรวจวัด และต่อลงดินด้วย โครงข่ายบางส่วนมากจะมีห้องที่ได้หุ้มกำบังไว้สำหรับการตรวจ อี ซี จี โดยการฝังวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ เช่น มุ้งลวดในฝาผนังของห้องดังกล่าว

การหุ้มกำบังดังกล่าวจะไม่ได้ผลในการป้องกันสนามแม่เหล็ก นอกจากจะ โลหะที่ใช้ชั้นจะเป็นชนิด high permeability เช่น การใช้แผ่นเหล็กไรสนิม เป็นต้น หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า แผ่นกั้นนั้นต้องเป็นทั้งตัวนำแม่เหล็กและตัวนำไฟฟ้าที่ดีด้วยวิธีที่มีราคาถูกมากคือการลดพื้นที่ระหว่างขดไฟเฟอร์เรียมชีตอินพุทกับแอมพลิไฟเออร์ ในกรณีที่เป็นสัญญาณชีพเฟอร์เรียมชีต และระหว่างอินพุทสายดิน ในกรณีที่เป็นสัญญาณ common-mode กระทำได้ง่ายโดยการบิดสายต่อให้เป็นเกลียว ก็สามารถลดการรบกวนได้มาก

2.9.2 การกำจัดวงจรสายดิน (Elimination of ground loop)

วงจรสายดินทำให้เกิด common-mode voltage จากการใช้หลอดของกระแสไฟฟ้าของวงจรที่ไหลลงดิน ในการป้องกันการรบกวนนี้จะต้อง ออกแบบระบบสายดิน ให้มีทางเดินทางเดียวระหว่างอุปกรณ์แต่ละอย่างกับดิน วงจรสายดินควรมีรูปร่างคล้ายดาว ที่มีจุดลงดินที่กึ่งกลาง และรัศมีกระจายออกไปสู่อุปกรณ์ต่างๆ

2.9.3 ระบบป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขาข้างขวา (Driven-right-leg system)

ในระบบของเครื่อง อี ซี จี ที่ทันสมัย ตัวผู้ป่วยจะไม่ได้ถูกต่อลงดินเลย แต่อิเล็กโทรดที่ต่อเข้ากับขาข้างขวานั้น จะถูกต่ออยู่กับเอาต์พุทของออปแอมป์อีกชุด จะมีรีซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่เฉลี่ย 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ R_a ทำหน้าที่รับ common-mode voltage จากร่างกาย ให้กลับหัวและมีอัตราขยายมากขึ้น แล้วจึงป้อนกลับผ่านทางรีซิสเตอร์ R_0 ไปยังขาขา การป้อนกลับเชิงลบนี้จะขับ common-mode voltage ให้ไปสู่ค่าต่ำ กระแสที่ไหลอยู่ในร่างกายจะไม่ไหลลงดิน แต่จะไหลไปยังวงจรเอาต์พุตที่เป็นออปแอมป์ จึงทำให้การรบกวนลดลงไปได้

วงจรนี้ มีประโยชน์ทางด้านความปลอดภัยต่ออันตรายจากไฟฟ้าอีกด้วย ถ้ามีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นระหว่างผู้ป่วยกับสายดิน ที่เกิดเนื่องจากกระแสรั่วไหลหรือวิธีอื่น จะทำให้ออปแอมป์ที่เสริมเข้ามานี้ทำงานจนถึงจุดอิ่มตัว ค่า R_0 ที่อยู่ระหว่างผู้ป่วยกับสายดิน อาจมีค่าหลายเมกะโอห์ม ดังนั้นจึงสามารถป้องกันผู้ป่วยได้



บทที่ 3

การออกแบบและการทำงานของเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ ECG (Electrocardiogram) เป็นวงจรที่ประกอบด้วยหลายๆ ส่วนด้วยกัน ทั้งนี้ เพื่อให้วงจรมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น ซึ่ง วงจรทั้งหมดประกอบด้วย วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) วงจรปรับศูนย์อัตโนมัติ (Auto Zero Adjust) วงจรกรองความถี่แบบไม่ให้ความถี่ผ่านเฉพาะช่วง (Band Reject Filter) ซึ่งในแต่ละวงจร มีการทำงาน และการคำนวณ ดังนี้

3.1 ภาควงจรขยาย (amplifier)

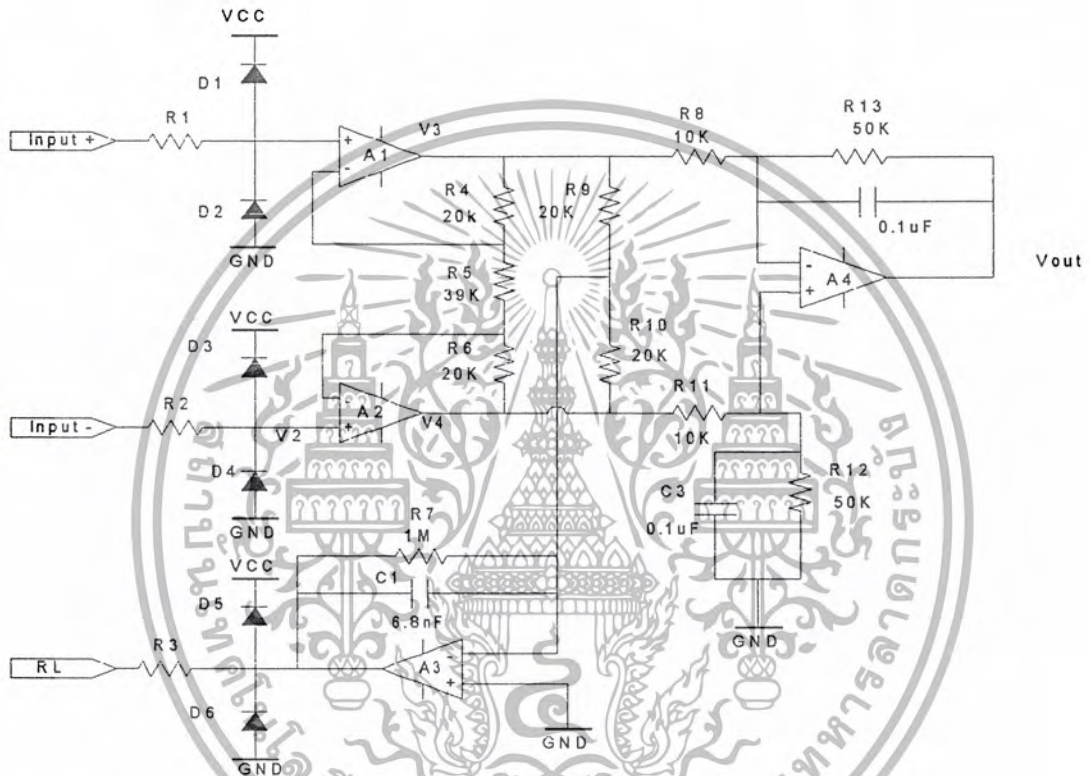
ในการวัดสัญญาณ ECG จะวัดโดยใช้วงจรถ่ายแบบอินสตรูเมนต์ (Instrumentation Amplifier) ซึ่งเป็นวงจรแรกที่ใช้ขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ที่มีขนาดของสัญญาณน้อยมาก ประมาณ 1 mV โดยการรับสัญญาณจากอิเล็กโทรด ที่ติดบนผิวหนัง ซึ่งมีความต้านทานสูง วงจร Instrumentation Amp. นี้ ที่จริงแล้วเป็นวงจรถ่ายความแตกต่างที่ปรับคุณสมบัติบางประการ ซึ่งวงจร Instrumentation Amp. มีคุณสมบัติ ดังนี้

คุณสมบัติของวงจร Instrumentation Amp.

1) มีอินพุตที่แคบสูงมาก เนื่องจากว่าการต่ออิเล็กโทรดเข้ากับผิวหนัง จะทำให้ความต้านทานที่ผิวหนังมารวมกับอินพุตที่แคบสูง ของวงจรถ่าย ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียบสมดุลย์และ กันทอนสัญญาณ การเสียบสมดุลย์ของวงจรคือ จะเกิดสัญญาณรบกวนต่อ วงจรในลักษณะคอมมอนโหมด (Common Mode Signal) ไม่สามารถกำจัดออกไปได้ และยังทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าออฟเซต (Offset Voltage) ซึ่งจะถูกขยายให้มีค่ามากขึ้น ถ้ามีค่าออฟเซตมาก จะทำให้วงจรถ่ายเกิดการอิ่มตัว เนื่องจากมีศักดาเอาท์พุทเกือบเท่ากับศักดาไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟด้านใดด้านหนึ่ง และวงจร จะไม่สามารถทำงานได้

2) มีค่า CMRR สูง (Common Mode Reject Ratio) ค่า CMRR เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวงจรถ่ายความแตกต่าง ที่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งก็คือ มีอัตราขยายของสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลโหมด (Differential Mode Signal) สูง และมีอัตราขยายของสัญญาณคอมมอนโหมดต่ำ

วงจรขยายในภาคแรกไม่ควรให้มีอัตราขยายมากเกินไป เพราะว่า ถ้าหากเกิดมีศักดาไฟฟ้าออฟเซทที่อินพุท ไม่ว่าจะสาเหตุใดก็ตามจะทำให้เกิดสัญญาณที่เอาท์พุทมีศักดาคลอออกนอกศูนย์กลาง ซึ่งถ้าหากมากจนใกล้เคียงกับศักดาไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ จะทำให้เกิดการอิ่มตัวของสัญญาณจนวงจรไม่สามารถทำงานได้



รูปที่ 3-1 วงจร Instrumentation Amp. วงจร RL Driver และวงจร Clamping

การคำนวณอัตราขยาย

จากวงจรในรูป 3-1 ออปแอมป์ A1 , A2 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายบัฟเฟอร์ (Buffer Amplifier) ซึ่งจะมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 M ทั้งนี้ เนื่องจากเลือกใช้ ออปแอมป์ ชนิด JFET

$$V3 = (1 + R4/R5)V1 - (R4/R5)V2 + Vic \quad (3.1)$$

$$V4 = (1 + R6/R5)V1 - (R6/R5)V1 + Vic \quad (3.2)$$

ซึ่ง Vic เป็นค่าแรงดันที่เข้ามาในลักษณะ Common Mode มีค่า

$$Vic = (V1 + V2) / 2 \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $R13 / R8 = R12 / R11$

$$V_o = (R13/R8)(V4 - V3)$$

$$V_o = R13(R4 + R5 + R6)(V2 - V1)/(R5R8) \quad (3.4)$$

เมื่อ $A = V_o / V_{in}$

$$\text{จะได้ } A = (1 + 2R4 / R5)(R13 / R8) \quad (3.5)$$

$$= (1 + 2(20/39)(50 / 10))$$

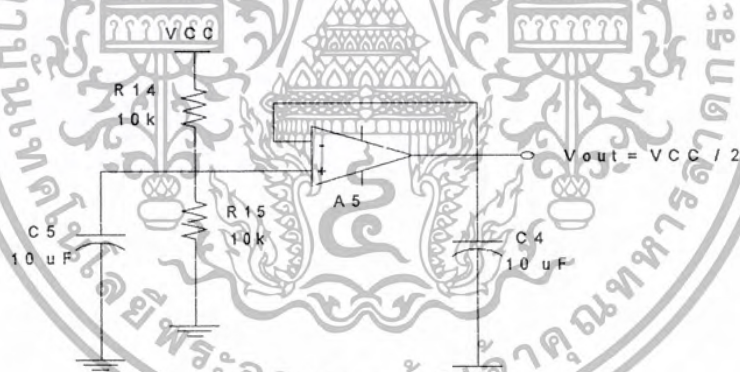
$$= 10.13$$

ดังนั้น วงจรขยายในภาคนี้ มีอัตราขยาย 10.13 เท่า

3.2 วงจรไดโอดแคลมป์ (Diode Clamping)

เป็นวงจรที่ช่วยป้องกันความเสียหายของวงจร จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต จากไฟฟ้าสถิต

3.3 วงจรยกระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3-2 วงจรยกระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูป 3-2 วงจรจะทำทำงานโดยการหารแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ก่อนโดยใช้ตัวต้านทาน

$R14$ และ $R15$

จะได้แรงดันที่ได้ คือ

$$V_{in} = VCC * R15 / (R14 + R15) \quad (3.6)$$

เมื่อ $R14 = R15$

จะได้ $V_{in} = VCC / 2$

$$= 5 / 2$$

$$= 2.5 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

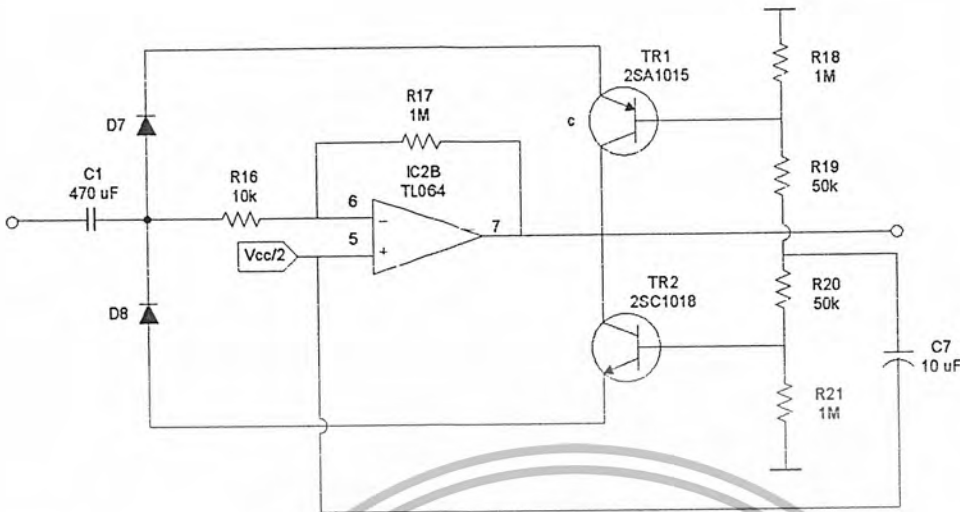
เมื่อ ได้แรงดัน Vin แล้ว จะรักษาระดับแรงดันให้คงที่โดย ผ่าน ออปแอมป์ A5 ซึ่งออปแอมป์ จะทำงานเป็น วงจรโวลต์เตจ ฟอลโลเวอร์ (Voltage Follower) ซึ่งแรงดันจะมีค่าคงที่ตลอด

การต่อวงจรในส่วนนี้ จะใช้ประโยชน์ในการแปลงสัญญาณ จากอนาล็อก เป็น สัญญาณ ดิจิตอล ซึ่งไอซีที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอนาล็อก เป็นดิจิตอล ADC 0804 จะทำงานได้กับแรงดัน ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 – 5 V ถ้าหากว่า มีการป้อนแรงดันไม่อยู่ในช่วงทำงานนี้ จะทำให้การทำงานของ ไอซีผิดพลาดได้

3.4 วงจรปรับศูนย์อัตโนมัติ (Auto Zero Circuit)

เมื่อสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจผ่านวงจรขยายความแตกต่าง มักจะมีศักดาไฟฟ้าออฟเซตถูก ขยายมาด้วย ซึ่งศักดานี้ เป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถแยกออกจากสัญญาณคลื่นไฟฟ้า หัวใจได้โดยการ ให้สัญญาณผ่านตัวเก็บประจุ โดยการต่ออนุกรมกัน เนื่องจากสัญญาณคลื่นไฟฟ้า หัวใจมีความถี่ค่า อยู่ในช่วง 0.5 – 200 Hz ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้จึงต้องมีค่ามาก ทั้งนี้ เพื่อให้ สัญญาณในช่วงความถี่ค่าผ่านไปได้ และอีกปัญหาที่ตามมาคือ การเกิดสัญญาณรบกวนที่อเล็กโทรด ถ้าหากว่า คนไข้ได้มีการขยับตัว จะทำให้ความต้านทานที่ผิวหนังของคนไข้เปลี่ยนแปลง จะเกิดเป็น ศักดาไฟฟ้าออฟเซต ที่ทางออกของวงจรขยายความแตกต่าง สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ผ่านตัวเก็บ ประจุจะลดยอกห่างจากระดับศูนย์ และจะกลับเข้าสู่ระดับศูนย์ช้ามาก ยิ่งค่าความจุของตัวเก็บประจุมี ค่ามากเพียงใดก็จะทำให้เวลาในการกลับเข้าสู่ระดับศูนย์ช้ามากขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการ ชาร์จ และ ดิสชาร์จ ของตัวเก็บประจุ

หลักการของวงจรปรับศูนย์ คือ จะช่วยลดค่าเวลาคงที่ (Time Constant) ให้เหลือน้อยมาก เมื่อเกิดศักดาไฟฟ้าออฟเซตขึ้น ถึงระดับที่กำหนดไว้ ในขณะที่ยังไม่เกิดศักดาไฟฟ้าออฟเซตค่าเวลา คงที่ (Time Constant) จะมีค่าเท่ากับผลคูณของ R1 กับ C1 และเมื่อมีไฟฟ้าออฟเซตประมาณ + 1.4 V หรือ - 1.4 V (เท่ากับ ศักดาไฟฟ้าคร่อมไดโอด กับ V_{BE} ของทรานซิสเตอร์) โดยทรานซิสเตอร์ จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสัญญาณ ซึ่งจะทำให้ค่าเวลาคงที่ (Time Constant) ลดลงเหลือเพียง เท่ากับผลคูณของ C1 กับค่าความต้านทานภายในของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีค่าน้อย ส่วน ออปแอมป์ จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)



รูปที่ 3-3 วงจรปรับศูนย์อัตโนมัติ (Auto Zero Circuit)

จากวงจรปรับศูนย์อัตโนมัติ (Auto Zero Circuit) จะมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ดังนี้
จากสมการ $A = R2 / R1$ (เป็นวงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟส Inverting Amplifier)

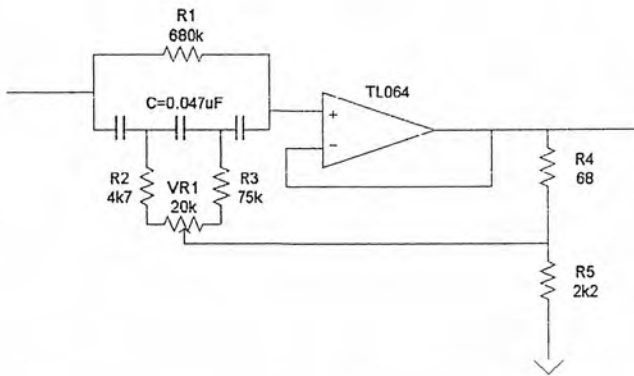
$$= 1M / 10k$$

$$= 1000$$

ดังนั้น วงจรนี้ จะมีอัตราขยายแบบกลับเฟส 1000 เท่า

3.5 วงจรกรองความถี่แบบไม่ให้ผ่านเฉพาะความถี่ (Notch Filter)

ถึงแม้ว่าวงจรขยายความถี่จะมีคุณสมบัติในการกำจัดสัญญาณรบกวนก็ตาม แต่ก็ยังไม่เพียงพอในการทำงานจริง ทั้งนี้เนื่องจากว่า หากสัญญาณรบกวนมีค่าความถี่เท่ากับความถี่ไฟฟ้าในระบบบ้าน นั่นคือ มีค่าความถี่ 50 Hz วงจรนี้ก็จะไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนในช่วงนี้ได้ เนื่องจากว่า วงจรจะทำงานในช่วงความถี่ 0.5 – 200 Hz ดังนั้น จึงต้องมีวงจรที่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนไม่ให้ความถี่ 50 Hz ผ่านไปได้ แต่ สัญญาณในช่วงทำงานอื่น ผ่านไปได้ นั่นคือ ต้องใช้ วงจรกรองความถี่แบบ วงจรกรองความถี่ต่ำ แบบไม่ให้ผ่านเฉพาะความถี่ (Low Pass Notch Filter) ซึ่งจะกำจัดสัญญาณที่ความถี่ 0.5 – 200 Hz ผ่านไป ยกเว้นความถี่ 50 Hz



รูปที่ 3-4 วงจรกรองความถี่แบบไม่ให้ผ่านเฉพาะความถี่ (Notch Filter)

จากรูปที่ เป็นวงจรกรองความถี่แบบบริดจ์ดิฟเฟอเรนเชียล (The Bridge Differentiator) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่ง่ายในการออกแบบ กล่าวคือ ค่าความถี่ศูนย์กลางสามารถปรับได้แบบแมนนวล (Manual) โดยมีค่าความต้านทานแบบปรับค่าได้เป็นตัวควบคุม ทำให้สามารถปรับค่าความถี่ศูนย์กลางได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน จะทำให้แบนวิธด์เปลี่ยนแปลง แต่ค่า Q ยังคงเดิม ซึ่งเป็นการง่ายในการออกแบบ ซึ่งวงจรกรองความถี่แบบบริดจ์ดิฟเฟอเรนเชียล มักนิยมใช้กับค่าความถี่ศูนย์กลางที่มีค่าต่ำ เพราะจะทำให้ได้ค่า Q สูง และมีช่วงแบนวิธด์แคบกว่าวงจรในรูปแบบอื่น

ค่าความถี่ศูนย์กลาง (Fc) หาได้จาก

$$F_c = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_a R_b}} \tag{3.7}$$

$$C = C_1 = C_2 = C_3 \tag{3.8}$$

$$R_1 = 6 (R_2 + V_r + R_4) \tag{3.9}$$

เมื่อ $R_a = R_2 + V_{ra} \tag{3.9}$

$$R_b = R_3 + V_{rb} \tag{3.10}$$

โดยที่ $V_r = V_{ra} + V_{rb} \tag{3.11}$

ต้องการความถี่ศูนย์กลาง 50 Hz จึงกำหนดช่วงการปรับค่าความถี่ศูนย์กลางอยู่ในช่วงประมาณ 45 Hz ถึง 95 Hz ดังนั้นกำหนดค่าความจุ C = 0.047 uF กำหนดให้ค่าความต้านทาน R2 = 4.7 KΩ และ R4 = 75 KΩ

และ Vr = 20 kΩ

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } R_1 &= 6 (4700 + 75000 + 20000) \\ &= 598200 \quad \Omega \end{aligned}$$

$$R_4 = 68 \quad \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R5 = 2200 \quad \Omega$$

เมื่อปรับค่า V_r ไปซ้ายสุด จะได้ $V_{ra} = 0$ $V_{rb} = 20$ k

จะได้ค่าความถี่ศูนย์กลาง (F_c) ดังนี้

$$R_a = R_2 + V_{ra}$$

$$R_a = 4700 + 0$$

$$= 4700$$

$$R_b = R_3 + V_{rb}$$

$$R_b = 75000 + 20000$$

$$= 95000 \quad \Omega$$

จะได้ค่าความถี่ศูนย์กลางสูงสุด คือ

$$F_c = \frac{1}{2\pi} * 0.047u\sqrt{3 * 4700 * 95000}$$

$$= 92.52 \text{ Hz}$$

เมื่อปรับ V_r ไปขวาสุด จะได้ $V_{ra} = 20$ k $V_{rb} = 0$ ซึ่งจะได้ค่าความถี่ศูนย์กลางต่ำสุด ดังนี้

$$R_a = R_2 + V_{ra} \quad \Omega$$

$$R_a = 4700 + 20000 \quad \Omega$$

$$= 24700 \quad \Omega$$

$$R_b = R_3 + V_{rb} \quad \Omega$$

$$R_b = 75000 + 0 \quad \Omega$$

$$= 75000 \quad \Omega$$

จะได้ค่าความถี่ศูนย์กลางต่ำสุด คือ

$$F_c = \frac{1}{2\pi} * 0.047u\sqrt{3 * 24700 * 75000}$$

$$= 45.42 \text{ Hz}$$

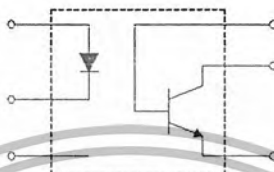
3.6 วงจรแยกสัญญาณ (Opto-Isolation)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทำงานโดยการเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง และเปลี่ยนสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง วงจรแยกสัญญาณ ประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสง (infrared LED) และทรานซิสเตอร์รับแสง (silicon photo transistor) ซึ่งรวมอยู่ในไอซีตัวเดียวกัน ลักษณะการทำงานของวงจรแยกสัญญาณ (opto-isolation) เป็นการส่งผ่านสัญญาณเพียงทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวข้ามช่องว่าง ดังนั้นส่วนของทรานซิสเตอร์รับแสง จะไม่มีผลกระทบโดยตรงกับวงจรทางด้าน สัญญาณเข้า และลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ วงจรแยกสัญญาณ มีค่าความต้านทาน ระหว่าง ทางด้านขาเข้าและทางด้านขาออกสูงมาก (ประมาณ 10^{11} โอห์ม)

ตัวอย่างของอุปกรณ์แยกสัญญาณที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงได้ดังรูปที่ 3-5

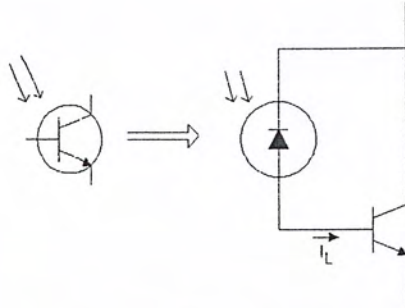


รูปที่ 3-5 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์แยกสัญญาณที่นิยมใช้กันทั่วไป

ลักษณะการทำงานพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสง และทรานซิสเตอร์รับแสง สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ไดโอดเปล่งแสง เป็นส่วนที่สามารถให้กำเนิดแสงได้ เมื่อมีกระแสไหลผ่านบริเวณรอยต่อพีเอ็น (PN Junction) ของตัวมันจะทำให้อิเล็กตรอนบริเวณนั้นมีการเปลี่ยนระดับพลังงานไปจากเดิม และมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแสง โดยความถี่ของแสงที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับช่องว่างของแถบพลังงานของวัสดุที่ใช้เป็นไดโอดนั้นๆ

ทรานซิสเตอร์รับแสง เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นค่าของพลังงานไฟฟ้าได้ ทรานซิสเตอร์รับแสง ประกอบด้วย ไดโอดรับแสง (Photo Diode) และทรานซิสเตอร์ (transistor) แสดงได้ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 แสดงลักษณะของทรานซิสเตอร์รับแสง (Photo transistor)

จากรูปที่ 3-6 เมื่อมีพลังงานจากภายนอก เช่น แสง หรือ ความร้อน มาตกกระทบอย่างเพียงพอให้กับวาเลนซ์อิเล็กตรอนจะทำให้เกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดกระแส I_C ไหล กระแส I_C นี้จะแปรค่าโดยตรงกับปริมาณพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอนและโฮล และค่ากระแสนี้จะถูกขยายให้เป็นกระแสมีตเตอร์ของทรานซิสเตอร์

สำหรับในวงจรของเครื่องวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ จะนำอุปกรณ์นี้มาใช้เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้กับผู้ป่วยเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้ารั่วไหล

บทที่ 4

โครงสร้างและข้อมูลของเกมบอย

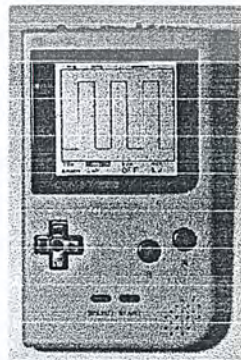
4.1 บทนำ

การประยุกต์ใช้งานเกมบอยให้ได้ตรงจุดประสงค์ และเกิดประโยชน์มากที่สุด จึงจำเป็นต้องเข้าใจแนวคิดและโครงสร้างของ ซึ่งเห็นพื้นฐานในการนำเกมบอยไปพัฒนา มีรายละเอียด ดังนี้

4.2 รูปแบบและสเปคเครื่องเล่นเกมบอยโดยทั่วไป

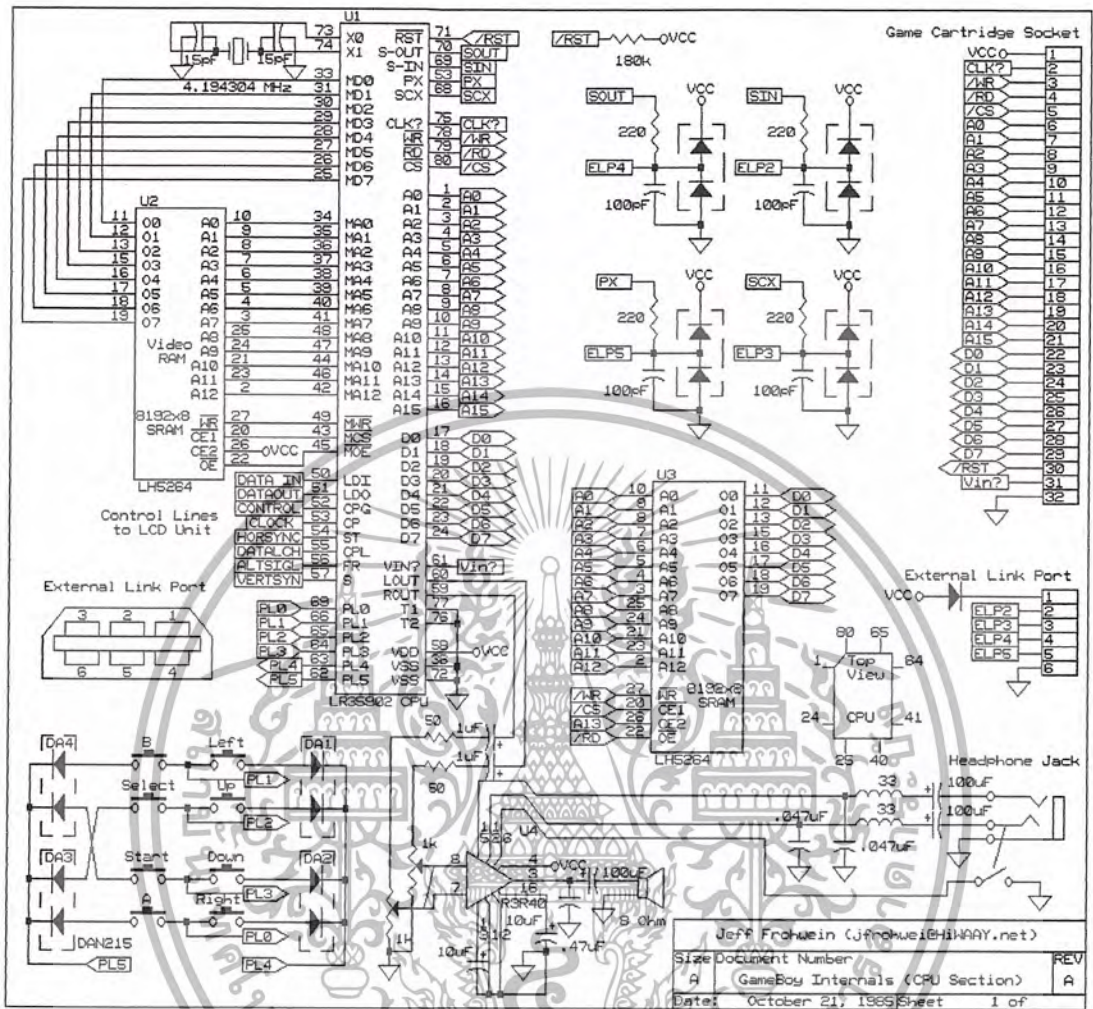
เกมบอย เป็นเครื่องเล่นเกมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ผลิตออกมาหลายรุ่นตั้งแต่ เกมบอยคลาสสิก เกมบอยพ็อกเก็ต เกมบอยคัลเลอร์ ชูปเปอร์เกมบอย ไม่ว่าจะเป็นรุ่นใดจะพบว่าจะมีอุปกรณ์หลักๆ ที่ จะสังเกตได้ คือ หน้าจอกราฟิก LCD ซึ่งมีเป็นชนิด TFT ความละเอียด 160 × 144 พิกเซล ซึ่งถ้าเป็น ของเกมบอยคัลเลอร์ก็จะสามารถแสดงสีอื่นได้อีกด้วย ต่อมาก็คือ คีย์แพด ที่ใช้ควบคุมการเล่น เกม และลำโพง เป็นต้น ซึ่งภายในตัวเกมบอยรุ่นต่างๆ จะมีหัวใจที่สำคัญก็คือ ไมโครโพร เซสเซอร์ ที่ใช้ ควบคุมและประมวลผลข้อมูลซึ่งสำหรับเกมบอยนี้จะใช้ ไมโครโพรเซสเซอร์ที่มีโครงสร้างและคำสั่ง คล้ายกับ Z80 โดยจะมีบางคำสั่งที่ถูกตัดออกไปบ้างและมีคำสั่งพิเศษบางคำสั่งเพิ่มเข้ามา ซึ่งก็จะมี ความเร็วในการทำงานตามรุ่นของเครื่อง ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเครื่องเล่นเกมบอยทั้งหมด รวมกันก็จะพบว่า ตัวเกมบอยนี้ก็เหมือนกับคอมพิวเตอร์มือถือเครื่องเล็กๆ เครื่องหนึ่ง ซึ่งมีวงจรส่วน แสดงผลและส่วนอื่นๆ ภายในตัวอยู่ในรูปร่างที่สวยงาม ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาโปรแกรมเกมหรือ แม้กระทั่งพัฒนาทางด้านฮาร์ดแวร์สำหรับเกมบอยต่อไป

โดยทั่วไปเครื่องเล่นเกมบอยมีหลายรูปแบบ แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเครื่องเล่นเกมบอยชนิดสี (Gameboy color) และเป็นแบบเดียวกับที่ใช้ใน โครงงานด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4-1 แสดงรูปร่างลักษณะภายนอกของเครื่องเล่นเกมบอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 แสดงวงจรภายในของเครื่องเล่นเกมบอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

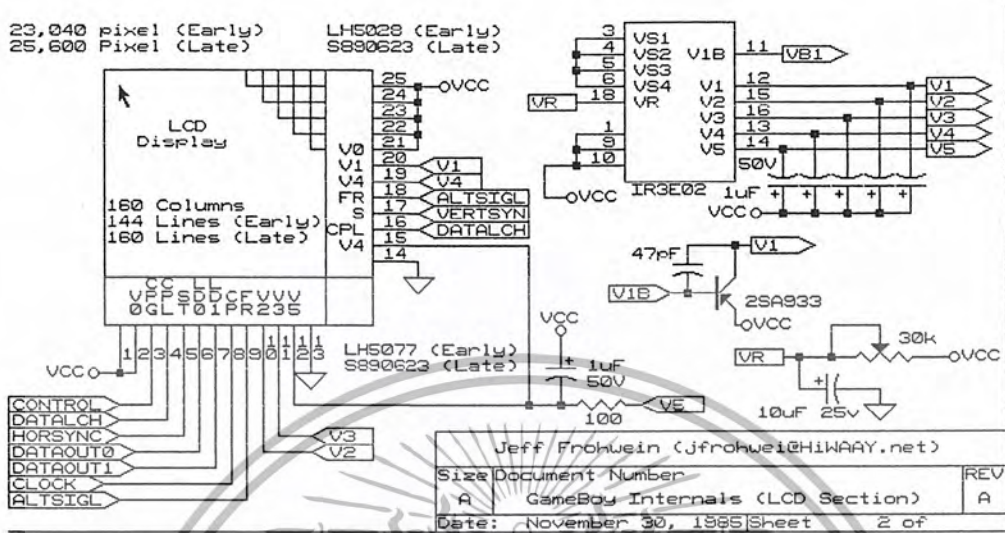
ตารางที่ 4.1 สเปกต่างๆ ของเครื่องเล่นเกมบอย

ซีพียู	8-bit z80 like CPU runing at 4.194 MHz (8.388 MHz GBC 2× mode)
บัสข้อมูล	8-bit data-BUS , 16-BUS address bus
หน่วยความจำแรม	8 kB/32 kB internal 8 kB address space for external RAM
หน่วยความจำวีดีโอแรม	8 Kb/ 16 internal (CGB,GBP/GBC)
หน่วยความจำรอมระบบ	32 Kb address space for external ROM
เสียง	4 channels. Each of which can be mapped either to left or right or to bort speakers
จอแสดงผล	Display : Reflective LCD 160×144 dots (physically),Color : 4 shades of gray (GBC ; max 56 of 32,768), Sprites : 40 sprites (8×8,8×16)
พอร์ตสื่อสาร	One serial port with 8 kbps
การกินพลังงาน	CGB : 6 V , 0.7 W/ GBP : 3 V , 0.9 W/GCB : 3 V , 0.3 W

4.3 ส่วนแสดงผล

ในส่วนของการแสดงผลของเกมบอยจะมีความละเอียดอยู่ที่ 160×144 พิกเซล ส่วน Registers SCROLLX และ SCROLLY จะเป็นส่วนในการแสดงผลบนพื้นที่ของแบล็คกราวด์ร่วมกัน โดยจะเริ่มต้นที่มุมซ้ายบนสุดของหน้าจอ ซึ่ง Background จะครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดในส่วนที่แสดงผล โดยพื้นที่ของ VRAM ซึ่งก็คือ แบล็คกราวด์ นั้นจะถูกบรรจุค่าของ Tile Table ซึ่งจะใช้ในการแสดงผลและมีอยู่ด้วยกัน 32 แถว โดยแต่ละแถวจะมี 32 ไบต์และแต่ละไบต์ก็จะบรรจุค่าของ Tile patterns ของ Tile โดยจะถูกนำมาจาก Tile Pattern Table ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 8000-8FFF หรือ 8800-97FF ในกรณีแรก patterns จะเป็นเลขที่ไม่มีเครื่องหมายจาก 0 – 255 ส่วนในกรณีที่สองจะเป็นเลขแบบมีเครื่องหมายจาก -128 ถึง 127 ตำแหน่งของ Tile Pattern Table สำหรับแบล็คกราวด์นั้นสามารถจะเลือกได้โดยผ่านทาง LCD CONT register.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 แสดงวงจรการเชื่อมต่อส่วนแสดงผล จอ LCD

4.4 ระบบเสียง

เครื่องเกมบอยมีระบบเสียงสองช่องซึ่งจะต่อกับ output terminals คือ SO1 และ SO2 โดยจะมี input terminal ต่อกับคัลัมเกมอีกที เพื่อให้คัลัมเกมเป็นตัวกำหนดเสียงที่จะออกที่ลำโพงว่าจะเป็นเสียงอย่างไร

4.5 I/O Ports

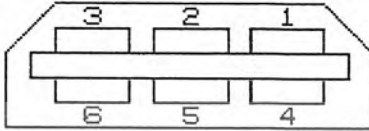
I/O Ports จะอยู่ใน memory address ตั้งแต่ FF00-FFFF มีรายละเอียดดังนี้
FF00--JOYPAD [RW] Joypad port

- Bit5 Bit4 ถ้ามีการรับข้อมูลจะส่ง output 0 ไปที่ Bit4
- Bit3 DOWN START Bit5 ของ JOYPAD , รอเพื่ออ่านคำสั่งจากคำสั่งจาก JOYPAD
- Bit2 UP SELECT Bit 0-3 จะ set เป็น 0 ถ้ามีการกดปุ่ม
- Bit1 LEFT B เมื่อมีการกดปุ่ม Bits 6 and 7 ไม่มีการใช้งาน
- Bit0 RIGHT A 0-3 จะติดต่อกับ input lines P10-P13 และ Bits 4 and 5 ติดต่อกับ output lines P14 and P15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gameboy Cartridge

External Link Port



1. Vcc
2. Sin
3. Scx
4. Sout
5. Px
6. Gnd

VCC0	1
CLK?	2
/WR	3
/RD	4
/CS	5
A0	6
A1	7
A2	8
A3	9
A4	10
A5	11
A6	12
A7	13
A8	14
A9	15
A10	16
A11	17
A12	18
A13	19
A14	20
A15	21
D0	22
D1	23
D2	24
D3	25
D4	26
D5	27
D6	28
D7	29
/RST	30
Vin?	31
	32

รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะของ พอร์ตสื่อสารอนุกรมและ connector

Connector ของเกมบอย จะมี 32 pin มีขา Address 16 bit ส่วนขา Data มีขนาด 8 bit ในการต่อ Connector กับ ROM จะต่อที่บริเวณ Connector นี้ ส่วน Serial Port สามารถใช้รับส่งข้อมูลได้อีกด้วย

4.6 การแบ่งพื้นที่หน่วยความจำของเครื่องเกมบอย

Gameboy มี memory ทั้งหมด 64k แต่ไม่จำเป็นต้องใช้ทั้งหมดขึ้นอยู่กับโปรแกรมการประยุกต์ แต่จะมีหน่วยความจำที่จำเป็นซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ส่วนของ Video RAM เป็นต้น หน่วยความจำของเครื่องเล่นเกมบอย สามารถดูได้จากตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.2 การแบ่งพื้นที่หน่วยความจำของเครื่องเกมบอย

MEMORY ADDRESS	CONTENTS
FFFF	Interrupt Enable Register
FF80	Internal RAM
FF4C	I/O ports
FEA0	Empty but unusable for I/O
FE00	Sprite Attrib Memory (OAM)
E000	Echo of 8kB Internal RAM
C000	8kB Internal RAM
A000	8kB switchable RAM bank
8000	8kB Video RAM
4000	16kB switchable ROM bank 6000
0000	16kB ROM bank #0 2000

ข้อมูลตั้งแต่ตำแหน่งที่ 0100 - 014F จะเป็นพื้นที่ในส่วนของ Cartridge Header ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการบูทเครื่องและเป็นส่วนที่ห้ามแก้ไข ถ้าข้อมูลในส่วนนี้เปลี่ยนแปลงก็ไม่สามารถแสดงผลออกที่หน้าจอ LCD ได้ โดยในแต่ละ cartridge จะบรรจุค่าต่างๆ ไว้ดังนี้

0100-0103	ลำดับของ bytes ที่กำหนดให้ CPU เริ่มต้นทำงาน โดยปกติมักเป็นคำสั่ง NOP หรือ JP
0104-0133	ตำแหน่งของ Nintendo character area (ห้ามเปลี่ยน) CE ED 66 66 CC 0D 00 0B 03 73 00 83 00 0C 00 0D 00 08 11 1F 88 89 00 0E DC CC 6E E6 DD DD D9 99 BB BB 67 63 6E 0E EC CC DD DC 99 9F BB B9 33 3E
0134-0142	ไต่ติลเกม
0143	\$80 = Color GB, \$00 or other = not Color GB
0144-0146	ไม่ใช่

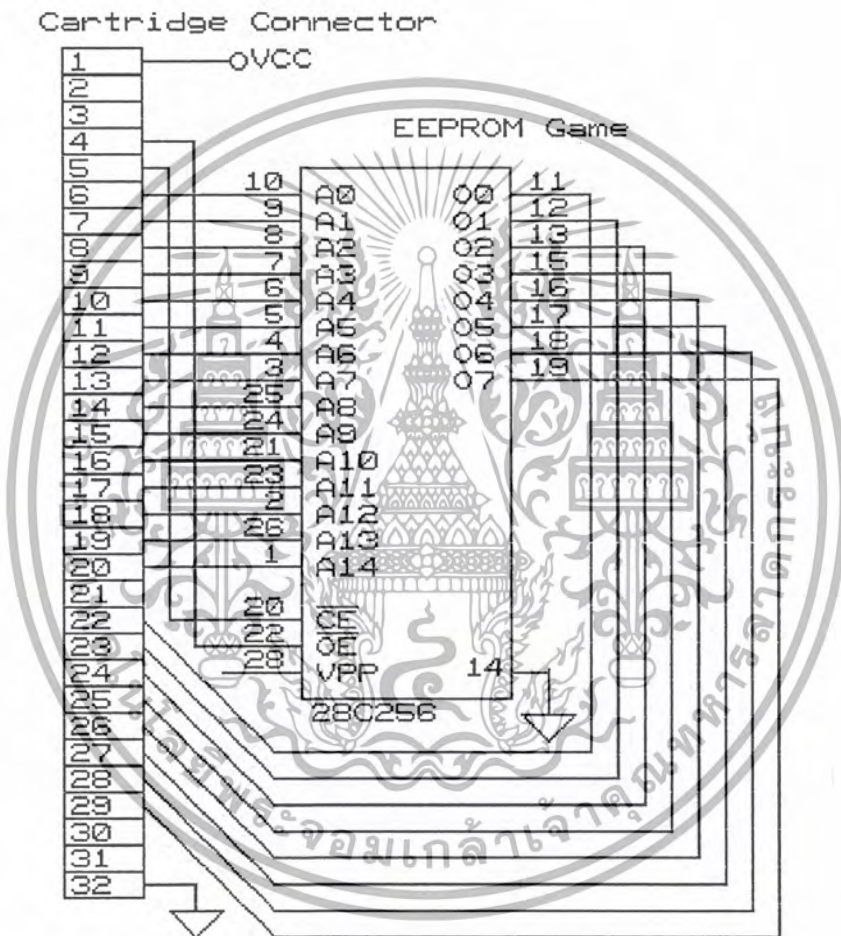
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 0147 ชนิดของ cartridge
- | | |
|------------------|--------------------------|
| 0 – ROM ONLY | 3 – ROM+MBC1+RAM+BATTERY |
| 1 – ROM+MBC1 | 5 – ROM+MBC2 |
| 2 – ROM+MBC1+RAM | 6 – ROM+MBC2+BATTERY |
- 0148 ขนาดของ ROM
- 0 – 256 kBit = 32 kB = 2 banks
- 1 – 512 kBit = 64 kB = 4 banks
- 2 – 1 Mbit = 128 kB = 8 banks
- 3 – 2 Mbit = 256 kB = 16 banks
- 4 – 4 Mbit = 512 kB = 32 banks
- 0149 ขนาดของ RAM
- 0 – None
- 1 – 16 kBit = 2 kB = 1 banks
- 2 – 64 kBit = 8 kB = 1 banks]
- 3 – 256 kBit = 32 kB = 4 banks
- 014A สถานที่ผลิต 0 = ญี่ปุ่น, 1 = ไม่ใช่ญี่ปุ่น
- 014B รหัสของผู้ผลิต เช่น A4 เป็นของบริษัท KONAMI
- 014C ตัวเลขเวอร์ชัน
- 014D ตรวจสอบเช็ค Complement
- 014E-014F ตรวจสอบเช็คกลับกันว่าผลิตอย่างถูกต้องหรือไม่ (เช็คจากไปต์สูงก่อน)



4.7 การ์ดอินเตอร์เฟส

การควบคุมเกมบอยให้แสดงผลได้นั้นจะต้องมีส่วนควบคุมการแสดงผลโดยเฉพาะ โดยได้สร้างการ์ดอินเตอร์เฟสขึ้นมาเพื่อควบคุม หน่วยประมวลผลของเกมบอยโดยเฉพาะ ซึ่งการ์ดอินเตอร์เฟสนี้ หลักการพื้นฐานคือ ต้องมี ROM เป็นตัวเก็บข้อมูล ซึ่งหน่วยประมวลผลภายในของเกมบอยจะเรียกข้อมูลจาก ROM เพื่อการทำงาน โดยสามารถต่อ ROM ได้ดังรูป



รูปที่ 4-5 การเชื่อมต่อ EEPROM กับ เกมบอย Connector

4.7.1 การทำงานของเกมบอย

เกมบอยจะมีขาเชื่อมต่อกับภายนอก 32 ขา ซึ่งมีไว้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยได้เลือกเชื่อมต่อ ROM แบบ EEPROM เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ซึ่ง เบอร์ 28C256 มีความจุ 256 kb หรือ 32 KB ซึ่งนับว่ามีความเหมาะสม และมีความจุเพียงพอในการเก็บข้อมูลในการควบคุมการทำงานของเกมบอย เพราะว่า จากการคอมไพล์ โปรแกรมแล้วจะได้ไฟล์ ที่มีขนาด 32 KB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจ่ายไฟให้ EEPROM นั้น จะใช้ไฟที่ออกมาจาก ขา 1 ของตัวเกมบอย ซึ่งมีแรงดัน 5 volt DC เป็นแรงดันที่เกมบอย แปลงมาจาก แบตเตอรี่ ดังนั้นจึงไม่ต้องหาแหล่งจ่ายไฟใหม่

4.7.2 การสร้างการ์ดอินเตอร์เฟส

การ์ดอินเตอร์เฟสที่ใช้นี้ จะเป็นตัวฐาน คือ สามารถจะสร้างการ์ดมาเสียบที่การ์ดฐานเพิ่มได้ เพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนา ซึ่งการ์ดตัวฐานนี้ จะประกอบด้วยอุปกรณ์เพียง 2 ตัว คือ EEPROM และ Connector ซึ่งการ์ดแบบนี้สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองอยู่แล้ว โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม แต่ ถ้าหาก ต้องการเพิ่มความสามารถให้แก่เกมบอย ก็สามารถจะสร้างการ์ดมาเสียบใช้งานได้เลย

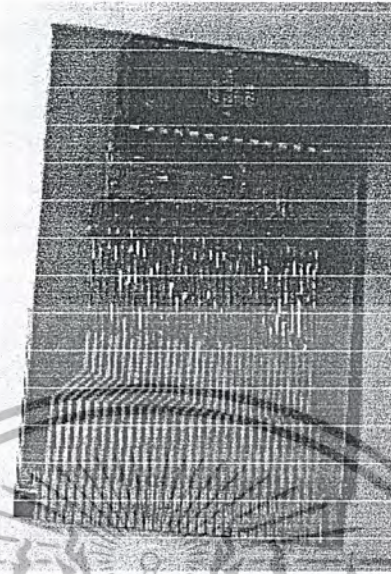
การสร้างการ์ดอินเตอร์เฟสนั้นนับว่ามีความยุ่งยากพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจาก จะต้องนำไปเสียบเข้ากับตัวเกมบอย ซึ่งจะต้องมีขนาดที่พอมหะกับตัวเกม ดังนั้น จึงต้องวัดขนาดให้มีความพอดี และการออกแบบลายวงจรจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมด้วย ซึ่งขนาดของ ลายวงจรที่จะเสียบกับตัวเกม จะมีความกว้าง 1 mm. และมีระยะห่าง 0.5 mm. และความกว้างของตัวการ์ด จะมีขนาด 53 mm. ซึ่งขนาดของ Connector ที่จะเสียบกับตัวเกมบอย จะต้องมีความตรงกัน มิเช่นนั้น จะทำให้ตัวการ์ด ไม่สามารถใช้งานได้ หรืออาจเกิด error ได้ จึงควรระวังเป็นอย่างยิ่งในกัการสร้างการ์ด

Gameboy Connector



รูปที่ 4-6 ขนาดของ Gameboy Connector

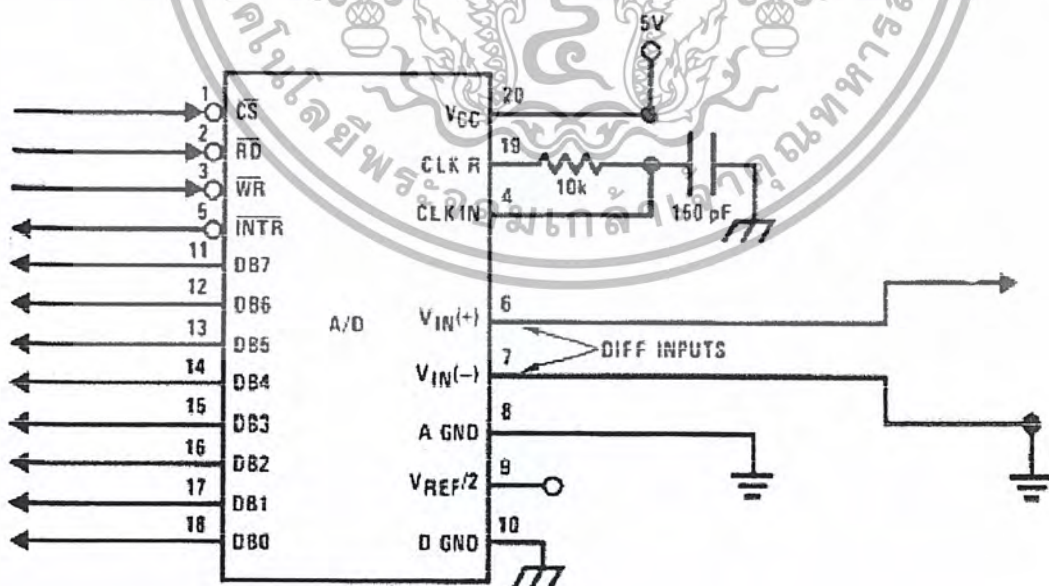
การ์ดที่สร้างนี้ ใช้แผ่น PCB แบบ 2 หน้า ซึ่งมีขนาดที่ไม่พอดีกับการเสียบกับตัวเกม ดังนั้นจึง ต้องเพิ่มความหนาให้แก่แผ่น PCB ในที่นี้ใช้การ์ดโทรศัพท์ มาตัดให้มีขนาดพอดีกับการ์ดอินเตอร์เฟส ก็จะช่วยชดเชยส่วนที่ขาดให้พอดีได้



รูปที่ 4-7 การ์ดอินเตอร์เฟส ที่ใช้ติดต่อกับเกมบอย

4.8 วงจร ADC (Analog to Digital Converter)

วงจร ADC เป็นส่วนที่สำคัญที่ช่วยในการแปลงสัญญาณจาก อนุาล็อกมาเป็นดิจิทัล โดยรับสัญญาณอนุาล็อกอินพุตแล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต แล้วนำข้อมูลมาป้อนเข้าที่ port ของเกมบอย ซึ่งจะนำไปต่อร่วมกับการ์ดอินเตอร์เฟสที่ใช้ควบคุมหน้าจอกเกมบอยต่อไป



รูปที่ 4-8 แสดงวงจร ADC (Analog to Digital Converters)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-8 เป็นการแสดงวงจรในส่วนของการแปลงสัญญาณอนาล็อกมาเป็นสัญญาณดิจิทัลในที่นี้เราจะใช้ IC เบอร์ ADC 0804 ซึ่งเป็น IC A to D ขนาด 8 บิต โดยใช้ไฟเลี้ยง +5V เนื่องจากตัวเกมบอยนั้นมีแหล่งจ่ายไฟขนาด +5V อยู่แล้ว และสามารถนำแหล่งจ่ายตัวนี้มาใช้งานได้เลย สำหรับข้อมูลเพิ่มเติมสามารถดูได้จาก Data Sheet ทำรายงาน

4.9 การพัฒนาโปรแกรมบนเกมบอย

สำหรับการ เขียนโปรแกรมสำหรับทำงานบนเกมบอยนั้น สามารถเขียนได้ 2 ภาษาด้วยกัน คือ ภาษา แอสเซมบลี และ ภาษา ซี สำหรับโครงการที่ทำนี้ ได้เลือกใช้ภาษา ซี ในการทำงาน เนื่องจาก เป็นภาษาที่สามารถเข้าใจได้ง่าย และสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย มีรายละเอียด ดังนี้

4.9.1 ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมบนตัวเกบลบอย

1. เขียน โปรแกรมเป็นภาษา ซี
2. คอมไพล์ เพื่อแปลงนามสกุลเป็น .gb
3. ทดลอง โปรแกรมด้วย Emulator
4. เปรินลง EEPROM

การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี นั้น จะต้องตั้งอยู่บนรากฐานของเกมบอย ซึ่งใช้ GBDK (Gameboy Development Kit) เป็นตัวคอมไพล์ บางคำสั่งอาจจะไม่เหมือนกับภาษาซีทั่วไป ซึ่งได้แทรกไว้ใน ส่วน ของภาคผนวกแล้ว

4.9.2 คำสั่งในการคอมไพล์ โดยใช้ GBDK

สำหรับการคอมไพล์ โดยใช้ GBDK นั้น มีคำสั่งที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- การคอมไพล์ จาก source.c เพื่อแปลงเป็น image.gb

```
lcc -o image.gb source.c
```

- การคอมไพล์ จาก source.c เพื่อสร้าง object.o

```
lcc -c -o object.o source.c
```

- การคอมไพล์ จาก object.o เพื่อแปลงเป็น image.gb

```
lcc -o image.gb object.o
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.3 Option ในการคอมไพล์

- WI-yl กำหนดชนิดของ MBC (Memory Control Bank) ถ้าไม่มี MBC ใช้ -WI-yl0
- WI-yo กำหนดจำนวนของ ROM Bank ถ้าเป็น 32K ใช้ -WI-yo2
- WI-ya กำหนดจำนวนของ RAM Bank ถ้าเป็น 0 ใช้ -WI-ya0

4.10 การพัฒนาโปรแกรม ที่ใช้งานด้วย GBDK

1. ทำการประกาศ Header file ที่จำเป็นต้องใช้ในโปรแกรมหลัก ซึ่ง Header file ที่จำเป็น ต้องใช้ได้แก่ gb.h, stdio.h, stdlib.h, console.h Drawing.h
2. หลังจากที่ได้ทำการประกาศ Header file ที่สำคัญไว้ในโปรแกรมแล้วก็ต้องทำการ เขียนในส่วนของโปรแกรมหลักซึ่งจะมีเป้าหมายหลักคือ ต้องการให้เกมบอยรับข้อมูล เพื่อนำมาแสดงผลเป็นกราฟให้ได้
3. ทำการคอมไพล์โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาด้วย compiler ของโปรแกรม GBDK (Gameboy Development kit) ซึ่งผลที่ได้จากการคอมไพล์คือไฟล์ *.gb ซึ่งมีรูปแบบเป็น binary file และก็ยังเป็นไฟล์ที่ใช้ในการ โปรแกรมข้อมูลลง EEPROM อีกด้วย โดยการ เขียนคำสั่งใน การคอมไพล์บน Editor แล้ว Save เป็นไฟล์ นามสกุล .bat เพื่อง่ายต่อการ คอมไพล์
4. ทดสอบโปรแกรมที่คอมไพล์ โดยใช้โปรแกรมทดสอบประเภท emulator ในที่นี้จะใช้ โปรแกรมที่มีชื่อว่า nosgmb



บทที่ 5

การทดลอง และผลการทดลอง

5.1 การทดสอบวงจรมายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

สำหรับการทดลอง ในการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ หรือเรียกว่า คลื่น ECG ซึ่งปกติแล้ว คลื่น ECG เป็นคลื่นที่มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 1 mV จะมีความถี่ของสัญญาณ อยู่ในช่วง 0 – 200 Hz แต่ ในการทำงาน จะมีสัญญาณรบกวน มีความถี่ 50 Hz ดังนั้น ในการทดลอง จึงทดลองเฉพาะ ความถี่ที่อยู่ในช่วงทำงานของคลื่น ECG นี้ และ เครื่องขยายคลื่น ECG ที่ได้ออกแบบมา ก็ต้อง สามารถตอบสนองความถี่ได้ในช่วงนี้ ถ้าหาก มีความถี่สูงกว่านี้ ก็จะถือว่า สัญญาณ ที่ความถี่นั้นๆ เป็นสัญญาณรบกวน และจะถูกกลดทอนสัญญาณออกไป ดังนั้น ในการทดลอง จึงต้องวัดคุณสมบัติที่มีความจำเป็นในการทำงานของเครื่องขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ดังนี้

1. Bandwidth เป็นผลการตอบสนองทางความถี่ ซึ่งช่วง Bandwidth จะอยู่ในช่วง -3dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้
2. CMRR (Common Mode Rejection Ratio) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของวงจรมาย ซึ่งสามารถวัดได้จาก การป้อนสัญญาณแบบ Difference และ Common แล้วจึงนำผลการทดลองที่วัดได้ไปหาค่า CMRR โดยวงจรมายที่ดี จะมีค่า CMRR สูง นั้นหมายความว่า สามารถ ขจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการได้ดี

อุปกรณ์การทดลอง

- 1.) ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function generator)
- 2.) ออสซิลโลสโคป
- 3.) เครื่องวัดคลื่นหัวใจ
- 4.) แหล่งจ่ายไฟ 5 โวลท์

การทดลองที่ 1 การหาค่าการตอบสนองทางความถี่

1.1 ต่อแหล่งจ่ายไฟให้แก่วงจร

- 1.2 ต่อวงจรดังรูปที่ 5-1 ป้อนสัญญาณจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ขนาด 4 mV รูปคลื่นไซน์ ป้อนความถี่ดัง ตารางที่ 5.1 บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตในตาราง 5.1 ที่ความถี่ 50 Hz ทำการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ V_{r1} เพื่อให้มีแรงดันเอาต์พุตมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อเป็น

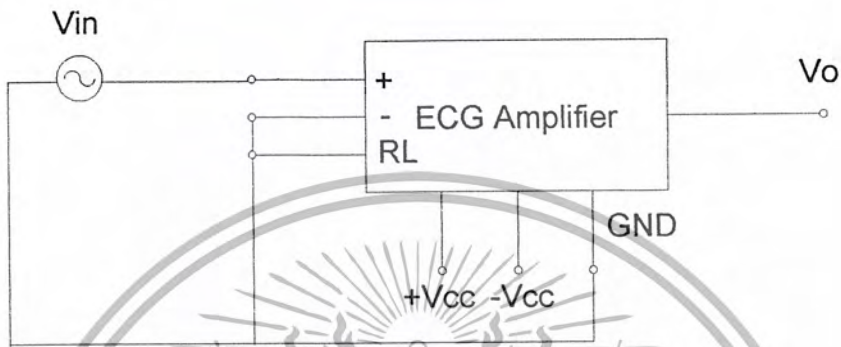
การลดทอนสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 กำหนดหาอัตราขยายแรงดัน และอัตราขยายในหน่วย dB

1.4 วาดกราฟอัตราขยาย และอัตราขยาย dB

Difference Mode



รูปที่ 5-1 การป้อนสัญญาณแบบ Difference Mode

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดการตอบสนองทางความถี่

ความถี่ (Hz)	Vout (Volt)	อัตราขยาย	อัตราขยาย (dB)
4.9	1.60	400	52.04
10	2.70	675	56.58
15	3.40	850	58.58
20	4.20	1050	60.42
30	3.76	940	59.46
40	3.20	800	58.06
50	0.30	75	37.50
60	2.9	725	57.20
70	4.15	1037.5	60.31
80	4.08	1020	60.17
90	3.94	985	59.86
100	3.76	940	59.46
110	3.62	905	59.13
120	3.34	835	58.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

130	3.14	785	57.89
140	2.94	735	57.32
150	2.74	685	56.71
160	2.60	650	56.25
180	2.30	575	55.19
200	2.08	520	54.32

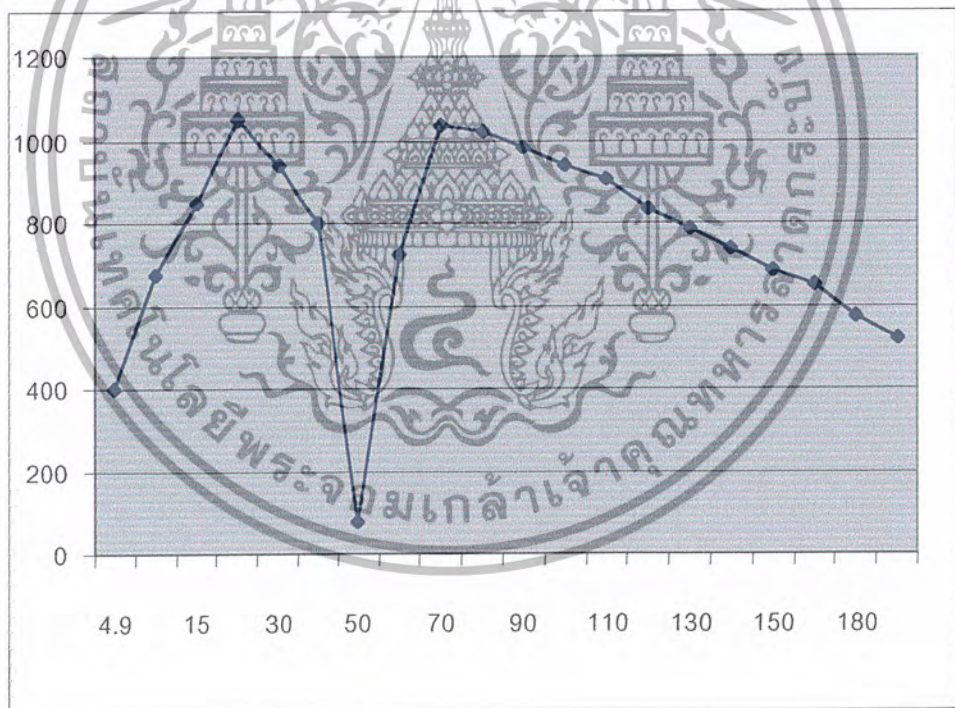
ให้อัตราขยายแรงดัน = A

จากสมการ $A = V_{out} / V_{in}$

ให้อัตราขยายแรงดัน dB = A_{dB}

จากสมการ $A_{dB} = 20 \log A$

อัตรขยาย (เท่า)

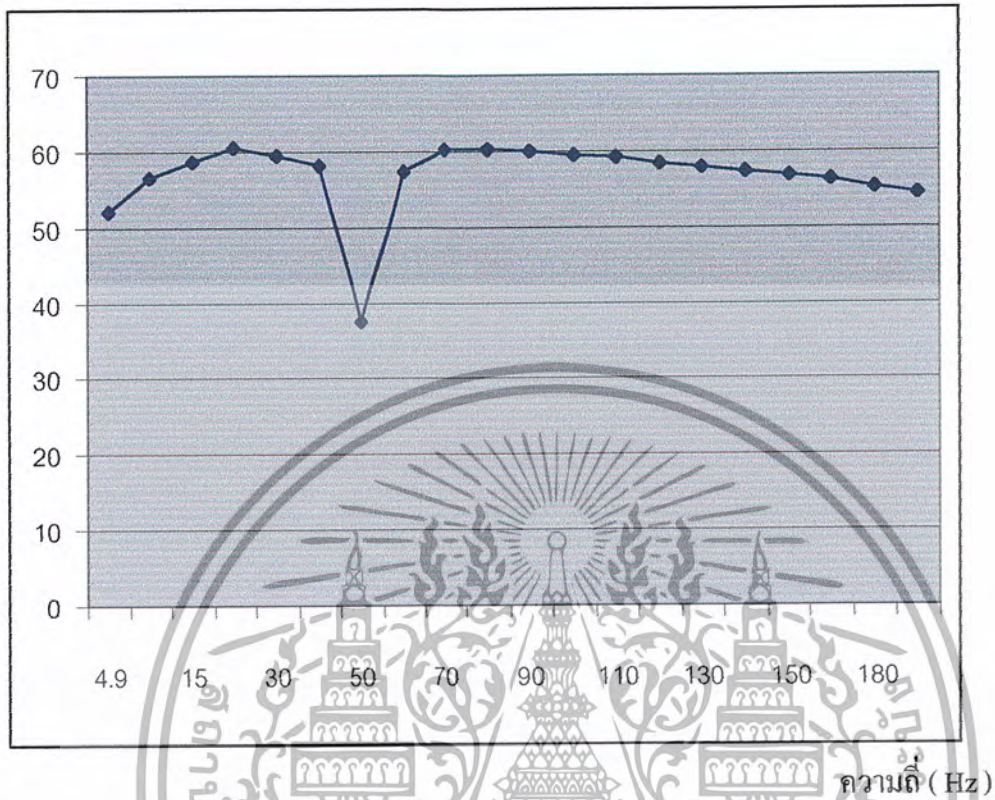


ความถี่ (Hz)

รูปที่ 5-2 กราฟแสดงอัตรขยายของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยาย (dB)



รูปที่ 5-3 กราฟแสดงอัตราขยาย dB ของวงจร ECG Amp.

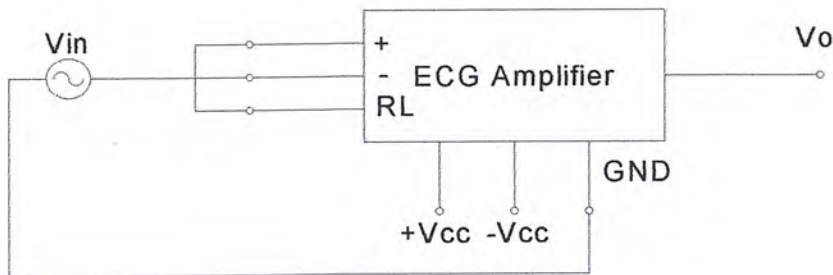
การทดลองที่ 2 การหาค่า CMRR (Common Mode Reject Ratio)

2.1 ต่อแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจร

2.2 ป้อนสัญญาณแบบ Common Mode ดังรูป โดยป้อนคลื่น Sine ความถี่ ตามตารางที่ 5.2

ขนาด 10 mV วัดค่าสัญญาณเอาต์พุต บันทึกผลแล้วคำนวณค่า CMRR

Common Mode



รูปที่ 5-4 การป้อนสัญญาณอินพุตแบบ Common Mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองหาค่า CMRR

ความถี่ (Hz)	Vout (Volt)	CMRR	CMRR (dB)
10	0.20	33.75	30.56
20	0.20	52.50	34.40
30	0.20	47.00	33.44
40	0.15	53.33	34.53
50	0.15	5.00	13.97
60	0.20	36.25	31.18
100	0.28	33.57	30.51
200	0.28	18.57	25.37

$$CMRR = A_d / A_c$$

$$CMRR (dB) = 20 \log (CMRR)$$

การทดลองที่ 3 การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

3.1 ต่อแหล่งจ่ายไฟให้วงจร

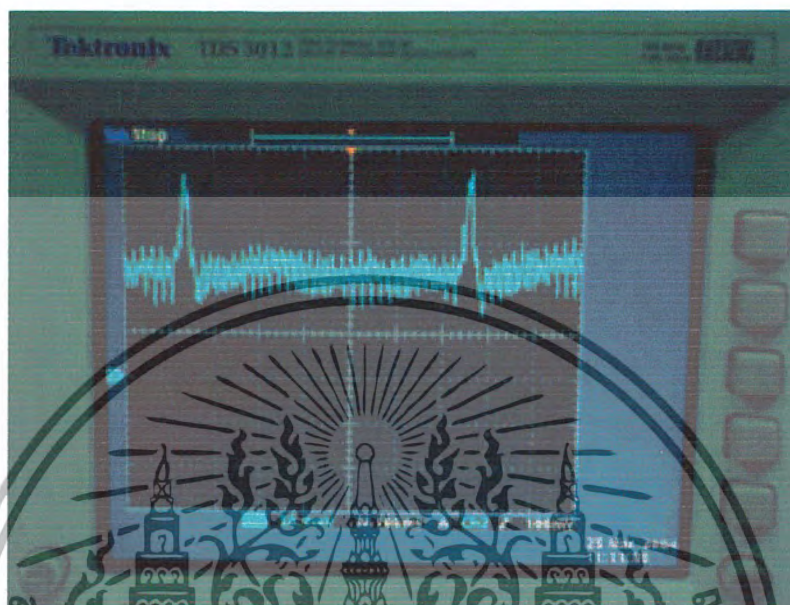
3.2 นำแผ่นอิเล็กโทรด มาติดที่ผิวหนัง ในตำแหน่ง ข้อมือซ้าย ข้อมือขวา และข้อเท้าด้านใดด้านหนึ่ง

3.3 ต่อแผ่นอิเล็กโทรดเข้ากับเครื่องขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (ECG Amp) โดย ให้อินพุต + ต่อกับอิเล็กโทรด ที่ข้อมือซ้าย อินพุต - ต่อกับแผ่นอิเล็กโทรดที่ข้อมือขวา และ RL ต่อกับอิเล็กโทรดที่ข้อเท้า

3.4 ตั้งเกตรูปลิ้นเอาต์พุต ถ้าสัญญาณที่วัดได้ไม่ชัด ให้ทำการหาค่าตำแหน่งของอิเล็กโทรดใหม่

ผลการทดลองที่ 3

ผลการทดลอง ภาพแสดงสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ



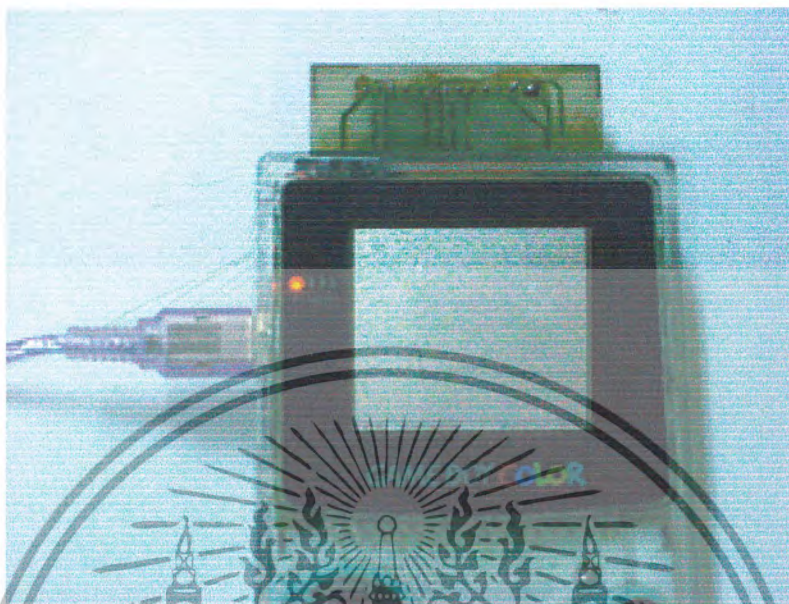
รูปที่ 5-5 แสดงสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้

การทดลองที่ 4 การวัดคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหัวใจแสดงผลที่เกมบอย

- 4.1 ต่อสายสัญญาณจากเกมบอยและสายที่จะเสียบกับอิเล็กโทรดเข้ากับตัวเครื่อง เปิดสวิทซ์การทำงาน
- 4.2 นำแผ่นอิเล็กโทรด ขนาดที่ผิวหนัง ในตำแหน่ง ข้อมือซ้าย ข้อมือขวา และข้อเท้าด้านใดด้านหนึ่ง
- 4.3 ต่อสายจากอิเล็กโทรดเข้ากับเครื่องวัด โดย ให้อินพุท + (สายสีแดง) ต่อกับอิเล็กโทรดที่ข้อมือซ้าย อินพุท - (สายสีเขียว) ต่อกับแผ่นอิเล็กโทรดที่ข้อมือขวา และ RL (สายสีดำ) ต่อกับอิเล็กโทรดที่ข้อเท้า
- 4.4 สังเกตผลที่ได้จากหน้าจอเกมบอย เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากสโคปในการทดลองที่ 3 กับหน้าจอเกมบอย บันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 4



รูปที่ 5-6 แสดงสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้บนเกมบอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผล

จากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปผลในแต่ละการทดลองได้ ดังนี้

ในการทดลองที่ 1 การหาการตอบสนองทางความถี่ จากการทดลอง ได้ทำการหาค่าแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้เพื่อต้องการหาค่าอัตราขยาย dB เพื่อหาช่วงการตอบสนองทางความถี่ ผลที่ได้ พบว่าเป็นวงจรมีลักษณะสัญญาณแบบ Low Pass เนื่องจาก วัดอัตราขยาย dB แล้ว วัดช่วงสัญญาณ -3 dB แล้วพบว่า มีช่วงกัทออฟ ที่ 200 Hz และมีการรีเจ็คท์ (Reject) สัญญาณ ที่ 50 Hz แต่ไม่สามารถกำจัดสัญญาณได้หมด ซึ่งเหลืออยู่ 0.3 Volt ก็นับว่ามีสัญญาณรบกวนมาก ซึ่งวงจรมีสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจนี้ เกิดที่ทำงานในช่วงความถี่นี้

ในการทดลองที่ 2 การหาค่า CMRR ในการวัดแรงดันเอาต์พุต ในการป้อนสัญญาณ แบบ Difference Mode และ Common Mode เพื่อหาอัตราขยาย แล้วนำไปคำนวณ เพื่อหาค่า CMRR จากการทดลองนี้ ค่า CMRR มีค่านี้นั้นหมายความว่า สามารถกำจัดสัญญาณในลักษณะ Common mode ได้ดี

ในการทดลองที่ 3 การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ในการวัดสัญญาณที่ได้ พบว่า มีสัญญาณรบกวน ประมาณ 50 Hz ทั้งนี้เนื่องจากการ Reject สัญญาณของวงจรทำได้ไม่ดี จึงสังเกตสัญญาณ ECG ที่ในช่วงลูกคลื่นที่มีขนาดเล็กๆ ไม่ค่อยได้ สัญญาณในจุด Q และ U มีขนาดเล็กจึงสังเกตสัญญาณได้ไม่แน่ชัดแต่สัญญาณในลูกคลื่นที่มีขนาดสูง P, R, S และ T สามารถสังเกตเห็น ได้ชัด

ในการทดลองที่ 4 การวัดคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหัวใจแสดงผลที่เกมบอย พบว่าสามารถทำการทดลองได้ง่าย เนื่องจากสามารถใช้ตำแหน่งอิเล็คโทรดที่ให้สัญญาณเข้ามาทดลอง พบว่า ที่หน้าจอเกมบอยสามารถแสดงผลในความถี่ต่ำ ได้ดี ทั้งนี้ เนื่องจากว่า ได้ทำการออกแบบการ์ดอินเตอร์เฟส กับเกมบอย และได้เขียน โปรแกรม เพื่อให้สามารถแสดงผลในย่านความถี่ต่ำ ได้ดี จึงมีสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงน้อย นั้นหมายความว่าสามารถใช้เกมบอยในการแสดงผลคลื่น ไฟฟ้าหัวใจ ได้ดี

ปัญหาในการทดลอง

จากการทำการทดลองเกิดปัญหาต่างๆมากมาย ซึ่งได้ทำให้เกิดทักษะในการแก้ปัญหา แต่ก็สามารถแก้ปัญหาได้ แต่บางอย่างก็ทำให้เกิดการสับสนเปลือง อิเล็คโทรด เป็นตัวที่มีปัญหามาก เนื่องจาก อิเล็คโทรด เป็นอุปกรณ์ ที่หาซื้อได้ยาก มีราคาแพง ในการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ จำเป็นที่ต้องใช้อิเล็คโทรด เป็นตัวทรานส์ดิวเซอร์ แปลงสัญญาณ คลื่นหัวใจ ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในการต่ออิเล็คโทรดเข้ากับผิวหนัง ในแต่ละจุดจะส่งสัญญาณที่มีความแรงต่างกัน ดังนั้นจึงเกิดความสับสนเปลือง

ในการทดลองหาจุดที่มีสัญญาณแรง เพื่อจะนำสัญญาณมาขยายได้ ดังนั้นจึงต้องมีความระมัดระวังในการใช้อิเล็กโทรดเป็นอย่างยิ่ง

การใช้เกมบอยแสดงผลการทดลอง ไม่สามารถแสดงความละเอียด ได้มาก เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้ มี Noise มาก และมีความแรงของสัญญาณน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการวัดแบบ Lead I จะให้ความละเอียดที่ไม่สูงนัก ซึ่งในการวัดจริงจะเป็นการวัดแบบ Unipolar ซึ่งจะมีความละเอียดมากกว่า แต่ในการทำโครงการนี้ จะเป็นการนำเสนอการนำเกมบอยมาแสดงผลสัญญาณ ECG ซึ่งสามารถทำได้ตามเป้าหมาย นั่นคือ สามารถแสดงสัญญาณ ECG บนเกมบอยได้ ซึ่งมีประโยชน์ในเรื่องต้นทุนและความสะดวกในการใช้งาน แต่ตัวชิ้นงานนี้ อาจจะยังไม่สามารถนำมาวิจัยในทางการแพทย์ได้ เพราะผู้จัดทำได้เพียงทำต้นแบบในการที่นำเกมบอยไปพัฒนาให้มากกว่านี้ เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง



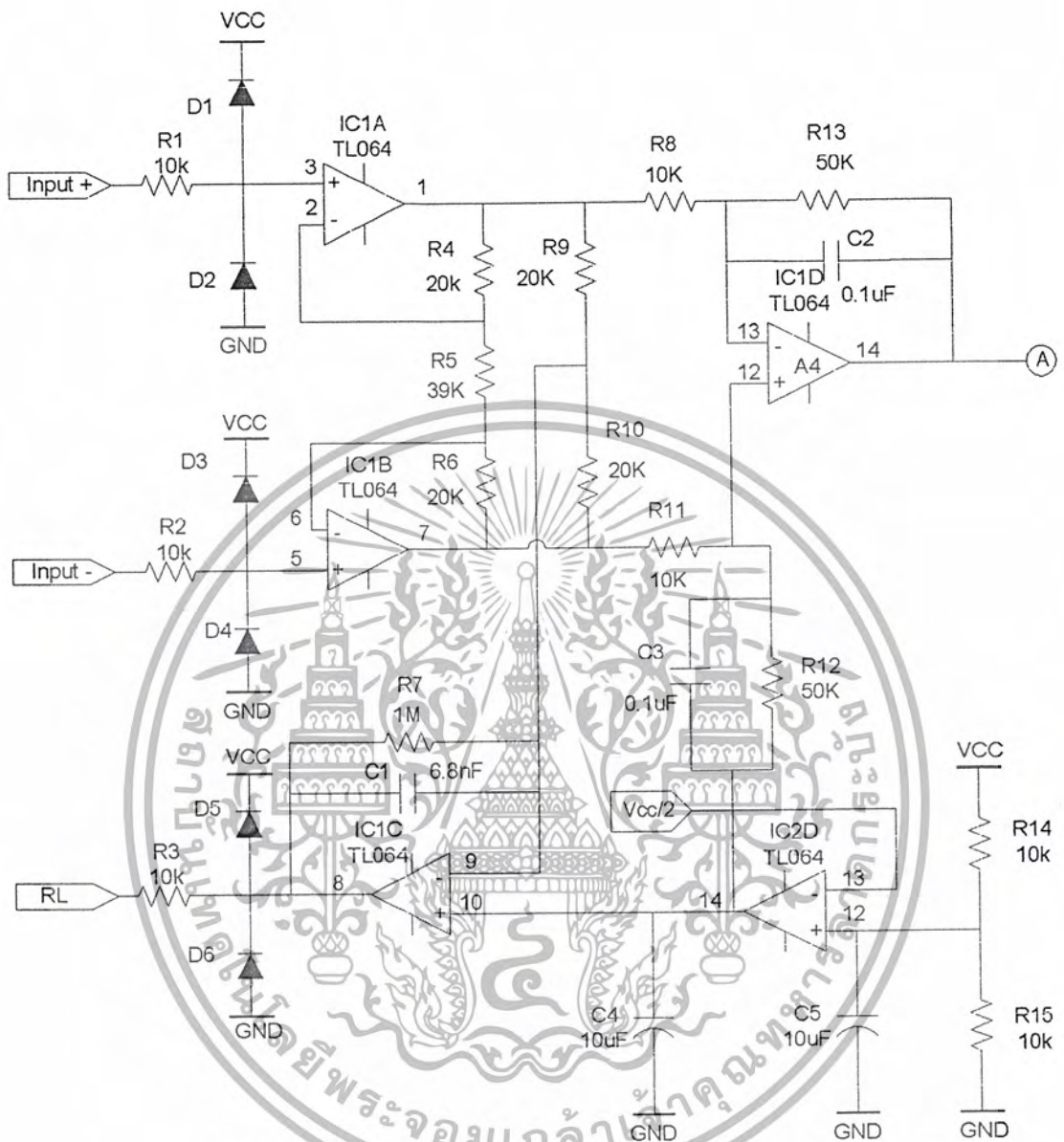
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

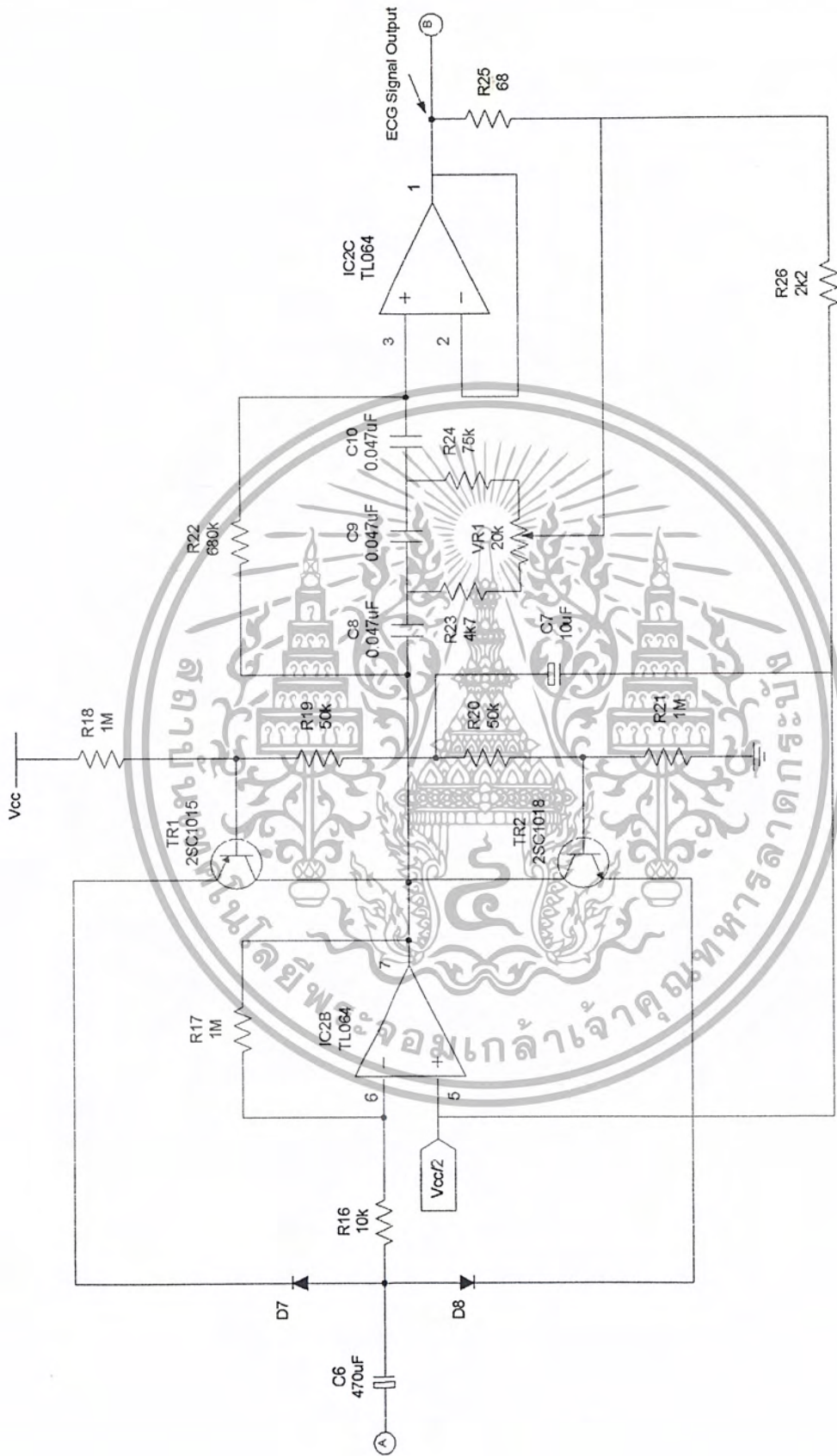
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

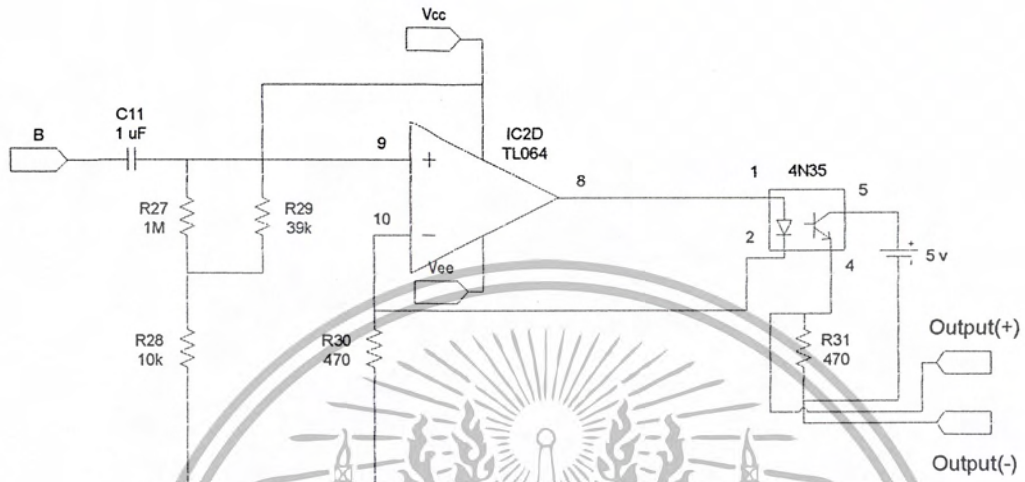


รูปแสดงวงจรส่วน ECG Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงวงจรสวน Opto Isolator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของโปรแกรม

```
#include <gb.h>
#include <stdio.h>
#include <drawing.h>
#include <console.h>
#include <cgb.h>

int i , m , inc ,add , xend , wait , inl=0 , rend
;
UBYTE ary [160];
UBYTE key;

void ClearScreen();
void ClearALL();
void pause();
void detail();

void main()
{
    UBYTE data , olddata;
    UBYTE n = 0;

    add = 1;
    n = 0;

    color(BLACK, BLACK, SOLID);
    box(0,0,159,5,1);

    box(0,0,5,143,1);

    box(154,0,159,143,1);

    box(0,139,159,143,1);

    gotogxy(4, 3);
    gprintf("ECG DISPLAY ");
    gotogxy(2, 4);
    gprintf("ON GAMEBOY COLOR");

    gotogxy(6, 7);
    gprintf("KMITL ");
    gotogxy(4, 8);
    gprintf("PROJECT 4C");
    gotogxy(8, 13);
    gprintf("Press START");
    key = waitpad(J_START);
    waitpadup;
    ClearScreen();
    //*****
    gotogxy(8, 3);
    gprintf("BY ");
    gotogxy(2, 4);
    gprintf("PORNSAK SOMTIHP");
    gotogxy(1, 5);
    gprintf("PUNNARAT
    PINYOPHAN");

    gotogxy(6, 8);
    gprintf("ADVISOR ");
```



```

gotogxy(6, 9);                                add = add+1;
gprintf("DOCTOR ");                            if (add >=8)
gotogxy(1, 10);                                add = 8;
gprintf("KITIPHOL CHITSAKOL");                }
                                                else if (key == J_UP)
gotogxy(8, 13);                                {
gprintf("Press START");                        add = add-1;
                                                if (add <= -1)

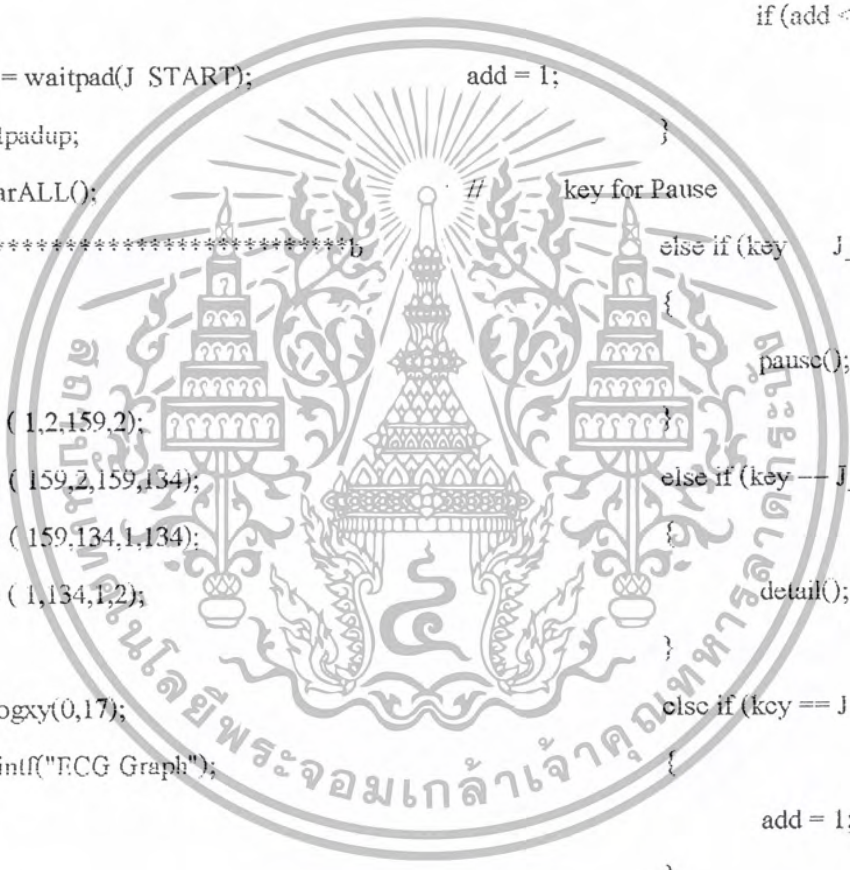
key = waitpad(J_START);                        add = 1;
waitpadup;                                    }
ClearALL();                                    // key for Pause
//*****b                                     else if (key == J_B)
egin graph                                     {
// head                                       pause();
line ( 1,2,159,2);                            }
line ( 159,2,159,134);                        else if (key == J_SELECT)
line ( 159,134,1,134);                        {
line ( 1,134,1,2);                             detail();
                                                }
gotogxy(0,17);                                else if (key == J_START)
gprintf("ECG Graph");                          {
// end head                                  add = 1;
                                                }

while (1)                                     gotogxy(12,17);
{                                               gprintf("Zoom %d" , add);

// key for Zoom                               xend = 156 / add ;
key = joypad();                               _io_out = n;
if (key == J_DOWN)                            rend = 158 * add;

ini = 0;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// *****begin receive data
for (i=0;i<rend;i++)
    // for 1
    {
        if (i % add == 0)
        {
            send_byte();
            send_byte();
            receive_byte();
            ary[in1] = _io_in;
            in1++;
        } // if
for (wait = 0; wait <= 2 ; wait++)
    // for 1
//*****begin show graph

ClearScreen();
color(DKGREY, WHITE, SOLID);
    m = 2;
    olddata = 132;
    for (i = 0 ; i <= 155 ; i++)
    {
        data = ary[i] ;
        if (data == 0 || data == 1)
            data = 132;
        else if (data == 2 || data == 3)
            data = 131;
        else if (data == 4 || data == 5)
            data = 130;
        else if (data == 6 || data == 7)
            data = 129;
        else if (data == 8 || data == 9)
            data = 128;
        else if (data == 10 || data == 11)
            data = 127;
        else if (data == 12 || data == 13)
            data = 126;
        else if (data == 14 || data == 15)
            data = 125;
        else if (data == 16 || data == 17)
            data = 124;
        else if (data == 18 || data == 19)
            data = 123;
        else if (data == 20 || data == 21)
            data = 122;
        else if (data == 22 || data == 23)
            data = 121;
        else if (data == 24 || data == 25)
            data = 120;
        else if (data == 26 || data == 27)
            data = 119;
        else if (data == 28 || data == 29)
            data = 118;
    }
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

else if (data == 30 || data == 31)

data = 117;

else if (data == 32 || data == 33)

data = 116;

else if (data == 34 || data == 35)

data = 115;

else if (data == 36 || data == 37)

data = 114;

else if (data == 38 || data == 39)

data = 113;

else if (data == 40 || data == 41)

data = 112;

else if (data == 42 || data == 43)

data = 111;

else if (data == 44 || data == 45)

data = 110;

else if (data == 46 || data == 47)

data = 109;

else if (data == 48 || data == 49)

data = 108;

else if (data == 50 || data == 51)

data = 107;

else if (data == 52 || data == 53)

data = 106;

else if (data == 54 || data == 55)

data = 105;

else if (data == 56 || data == 57)

data = 104;

else if (data == 58 || data == 59)

data = 103;

else if (data == 60 || data == 61)

data = 102;

else if (data == 62 || data == 63)

data = 101;

else if (data == 64 || data == 65)

data = 100;

else if (data == 66 || data == 67)

data = 99;

else if (data == 68 || data == 69)

data = 98;

else if (data == 70 || data == 71)

data = 97;

else if (data == 72 || data == 73)

data = 96;

else if (data == 74 || data == 75)

data = 95;

else if (data == 76 || data == 77)

data = 94;

else if (data == 78 || data == 79)

data = 93;

else if (data == 80 || data == 81)

data = 92;

else if (data == 82 || data == 83)

data = 91;

else if (data == 84 || data == 85)

data = 90;

else if (data == 86 || data == 87)

data = 89;

else if (data == 88 || data == 89)

data = 88;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
else if (data == 90 || data == 91)
```

```
data = 87;
```

```
else if (data == 92 || data == 93)
```

```
data = 86;
```

```
else if (data == 94 || data == 95)
```

```
data = 85;
```

```
else if (data == 96 || data == 97)
```

```
data = 84;
```

```
else if (data == 98 || data == 99)
```

```
data = 83;
```

```
else if (data == 100 || data == 101)
```

```
data = 82;
```

```
else if (data == 102 || data == 103)
```

```
data = 81;
```

```
else if (data == 104 || data == 105)
```

```
data = 80;
```

```
else if (data == 106 || data == 107)
```

```
data = 79;
```

```
else if (data == 108 || data == 109)
```

```
data = 78;
```

```
else if (data == 110 || data == 111)
```

```
data = 77;
```

```
else if (data == 112 || data == 113)
```

```
data = 76;
```

```
else if (data == 114 || data == 115)
```

```
data = 75;
```

```
else if (data == 116 || data == 117)
```

```
data = 74;
```

```
else if (data == 118 || data == 119)
```

```
data = 73;
```

```
data = 73;
```

```
else if (data == 120 || data == 121)
```

```
data = 72;
```

```
else if (data == 122 || data == 123)
```

```
data = 71;
```

```
else if (data == 124 || data == 125)
```

```
data = 70;
```

```
else if (data == 126 || data == 127)
```

```
data = 69;
```

```
else if (data == 128 || data == 129)
```

```
data = 68;
```

```
else if (data == 130 || data == 131)
```

```
data = 67;
```

```
else if (data == 132 || data == 133)
```

```
data = 66;
```

```
else if (data == 134 || data == 135)
```

```
data = 65;
```

```
else if (data == 136 || data == 137)
```

```
data = 64;
```

```
else if (data == 138 || data == 139)
```

```
data = 63;
```

```
else if (data == 140 || data == 141)
```

```
data = 62;
```

```
else if (data == 142 || data == 143)
```

```
data = 61;
```

```
else if (data == 144 || data == 145)
```

```
data = 60;
```

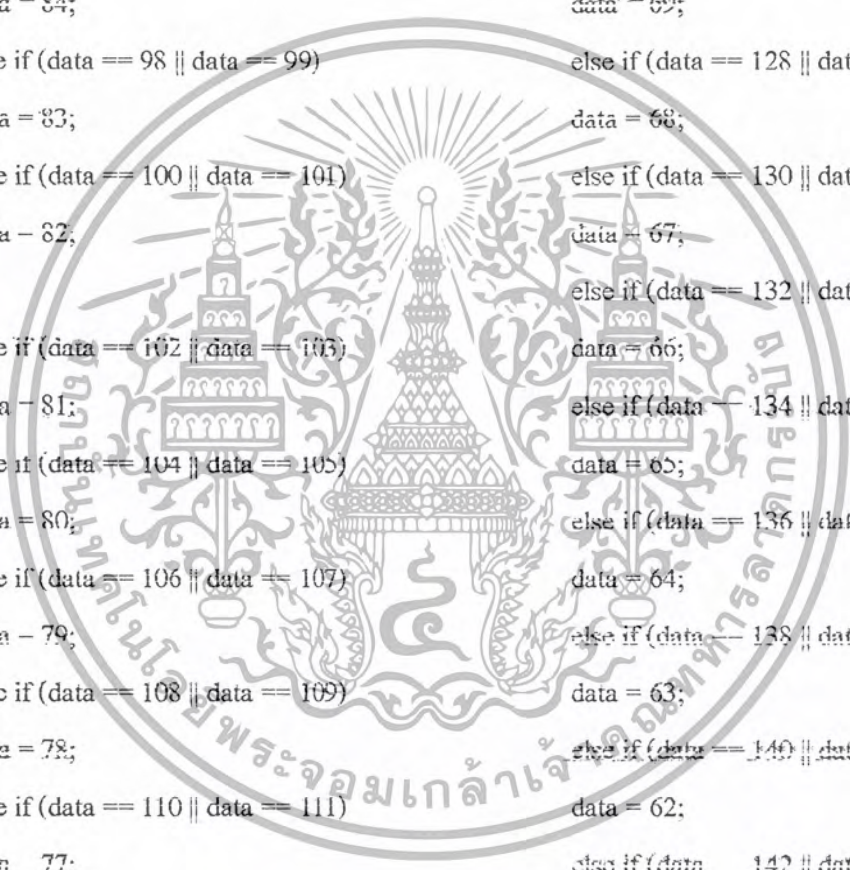
```
else if (data == 146 || data == 147)
```

```
data = 59;
```

```
else if (data == 148 || data == 149)
```

```
data = 58;
```

```
data = 58;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
else if (data == 150 || data == 151)
data = 57;
```

```
else if (data == 152 || data == 153)
data = 56;
```

```
else if (data == 154 || data == 155)
data = 55;
```

```
else if (data == 156 || data == 157)
data = 54;
```

```
else if (data == 158 || data == 159)
data = 53;
```

```
else if (data == 160 || data == 161)
data = 52;
```

```
else if (data == 162 || data == 163)
data = 51;
```

```
else if (data == 164 || data == 165)
data = 50;
```

```
else if (data == 166 || data == 167)
data = 49;
```

```
else if (data == 168 || data == 169)
data = 48;
```

```
else if (data == 170 || data == 171)
data = 47;
```

```
else if (data == 172 || data == 173)
data = 46;
```

```
else if (data == 174 || data == 175)
data = 45;
```

```
else if (data == 176 || data == 177)
data = 44;
```

```
else if (data == 178 || data == 179)
data = 43;
```

```
else if (data == 180 || data == 181)
data = 42;
```

```
else if (data == 182 || data == 183)
data = 41;
```

```
else if (data == 184 || data == 185)
data = 40;
```

```
else if (data == 186 || data == 187)
data = 39;
```

```
else if (data == 188 || data == 189)
data = 38;
```

```
else if (data == 190 || data == 191)
data = 37;
```

```
else if (data == 192 || data == 193)
data = 36;
```

```
else if (data == 194 || data == 195)
data = 35;
```

```
else if (data == 196 || data == 197)
data = 34;
```

```
else if (data == 198 || data == 199)
data = 33;
```

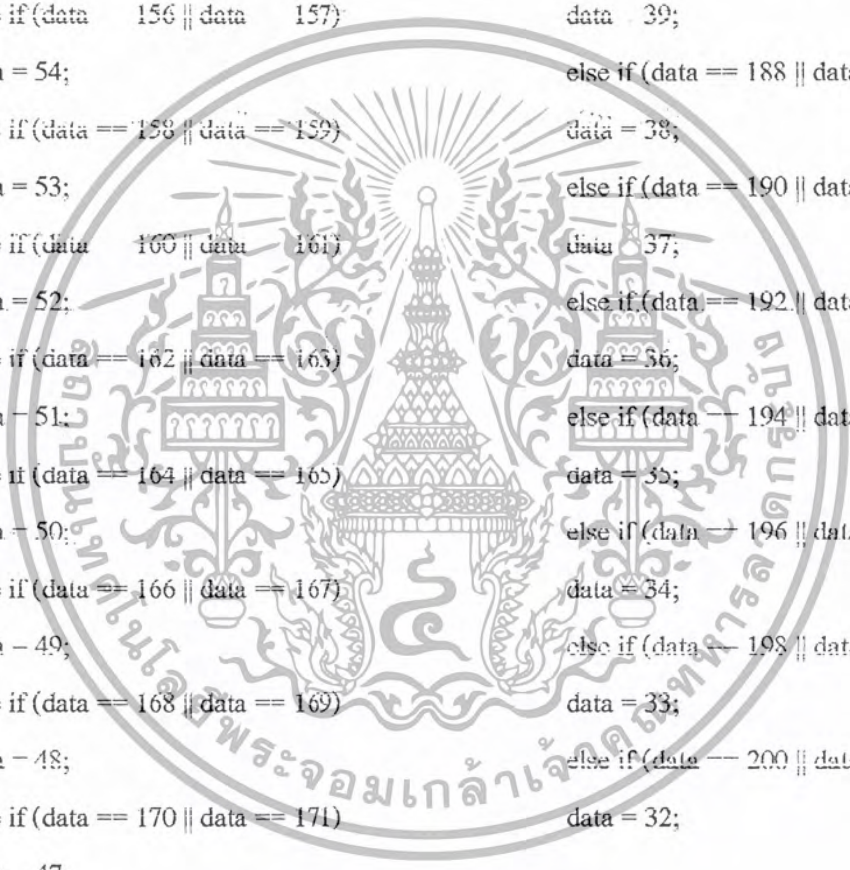
```
else if (data == 200 || data == 201)
data = 32;
```

```
else if (data == 202 || data == 203)
data = 31;
```

```
else if (data == 204 || data == 205)
data = 30;
```

```
else if (data == 206 || data == 207)
data = 29;
```

```
else if (data == 208 || data == 209)
data = 28;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if (data == 210 || data == 211)
    data = 27;
else if (data == 212 || data == 213)
    data = 26;
else if (data == 214 || data == 215)
    data = 25;
else if (data == 216 || data == 217)
    data = 24;
else if (data == 218 || data == 219)
    data = 23;
else if (data == 220 || data == 221)
    data = 22;
else if (data == 222 || data == 223)
    data = 21;
else if (data == 224 || data == 225)
    data = 10;
else if (data == 226 || data == 227)
    data = 19;
else if (data == 228 || data == 229)
    data = 18;
else if (data == 230 || data == 231)
    data = 17;
else if (data == 232 || data == 233)
    data = 16;
else if (data == 234 || data == 235)
    data = 15;
else if (data == 236 || data == 237)
    data = 14;
else if (data == 238 || data == 239)
    data = 13;

else if (data == 240 || data == 241)
    data = 12;
else if (data == 242 || data == 243)
    data = 11;
else if (data == 244 || data == 245)
    data = 10;
else if (data == 246 || data == 247)
    data = 9;
else if (data == 248 || data == 249)
    data = 8;
else if (data == 250 || data == 251)
    data = 7;
else if (data == 252 || data == 253)
    data = 6;
else data = 5;
    ary[i] = data;
    line(m , olddata , m+1 , data);
    olddata = data;
    m = m + 1;
} // for line
} // while
} //main*****
*****
void ClearScreen()
{
int xa;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

color(WHITE, WHITE, SOLID);

for( xa = 3; xa <= 133; xa++)
    line( 2, xa, 158, xa);
    color(BLACK, WHITE, SOLID);
} // ClearScreen

//*****

void ClearALL()
{
    int xa ;
    color(WHITE, WHITE, SOLID);
    for( xa = 0; xa <= 143; xa++)
        line( 0, xa, 159, xa);
        color(BLACK, WHITE, SOLID);
} // ClearALL

void pause()
{
    key = waitpad(J A);
    waitpadup();
}

void detail()
{
    ClearScreen();
    color(UK GRAY, WHITE, SOLID);
    gotogxy(5, 3);
    gprintf("JOY controll");
    gotogxy(1, 6);
    gprintf("A - Continue Graph");
    gotogxy(1, 7);
    gprintf("B - Pause");

    gotogxy(1, 8);
    gprintf("UP - Zoom in");
    gotogxy(1, 9);
    gprintf("DOWN - Zoom out");
    gotogxy(1, 10);
    gprintf("START - Default");
    gotogxy(1, 11);
    gprintf("SELECT - Control");

    gotogxy(10, 14);
    gprintf("Press A");

    key = waitpad(J A);
    waitpadup();
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805

8-Bit μ P Compatible A/D Converters

General Description

The ADC0801, ADC0802, ADC0803, ADC0804 and ADC0805 are CMOS 8-bit successive approximation A/D converters that use a differential potentiometric ladder—similar to the 256R products. These converters are designed to allow operation with the NSC800 and INS8080A derivative control bus with TRI-STATE output latches directly driving the data bus. These A/Ds appear like memory locations or I/O ports to the microprocessor and no interfacing logic is needed.

Differential analog voltage inputs allow increasing the common-mode rejection and offsetting the analog zero input voltage value. In addition, the voltage reference input can be adjusted to allow encoding any smaller analog voltage span to the full 8 bits of resolution.

Features

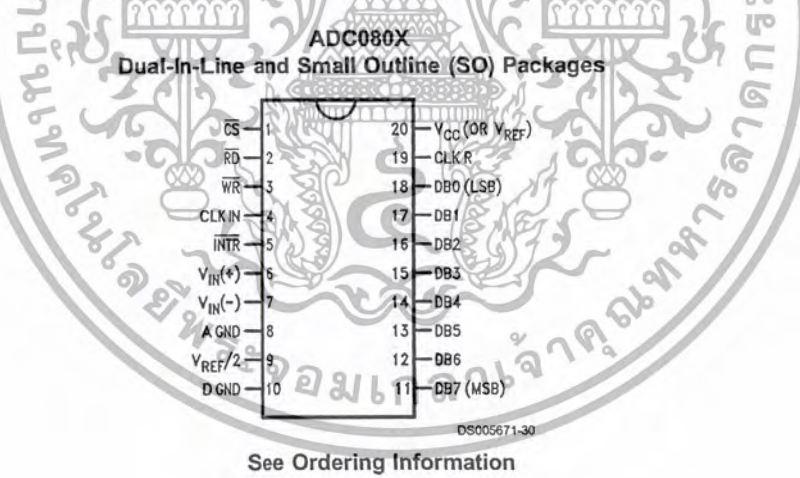
- Compatible with 8080 μ P derivatives—no interfacing logic needed - access time - 135 ns
- Easy interface to all microprocessors, or operates "stand alone"

- Differential analog voltage inputs
- Logic inputs and outputs meet both MOS and TTL voltage level specifications
- Works with 2.5V (LM336) voltage reference
- On-chip clock generator
- 0V to 5V analog input voltage range with single 5V supply
- No zero adjust required
- 0.3" standard width 20-pin DIP package
- 20-pin molded chip carrier or small outline package
- Operates ratiometrically or with 5 V_{DC} , 2.5 V_{DC} , or analog span adjusted voltage reference

Key Specifications

- Resolution 8 bits
- Total error $\pm 1/4$ LSB, $\pm 1/2$ LSB and ± 1 LSB
- Conversion time 100 μ s

Connection Diagram



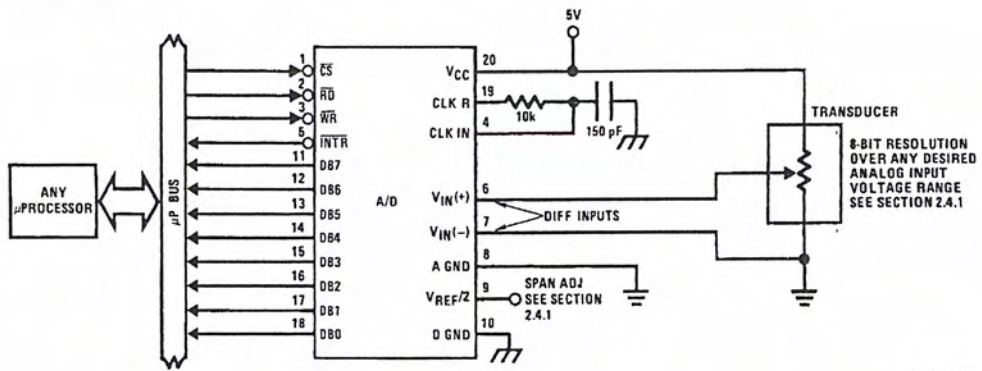
Ordering Information

TEMP RANGE		0°C TO 70°C	0°C TO 70°C	-40°C TO +85°C
ERROR	$\pm 1/4$ Bit Adjusted			ADC0801LCN
	$\pm 1/2$ Bit Unadjusted	ADC0802LCWM		ADC0802LCN
	$\pm 1/2$ Bit Adjusted			ADC0803LCN
	± 1 Bit Unadjusted	ADC0804LCWM	ADC0804LCN	ADC0805LCN/ADC0804LCJ
PACKAGE OUTLINE		M20B—Small Outline	N20A—Molded DIP	

Z-80® is a registered trademark of Zilog Corp.

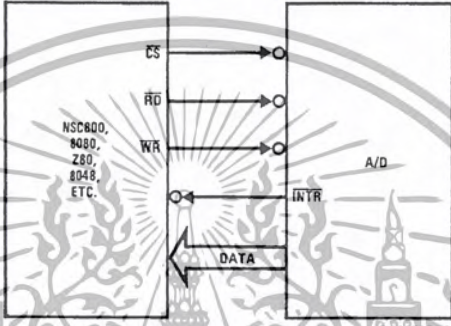
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications



DS005671-1

8080 Interface



DS005671-31

Error Specification (Includes Full-Scale, Zero Error, and Non-Linearity)

Part Number	Full-Scale Scaled Adjusted	$V_{REF}/2=2.500 V_{DC}$ (No Adjustments)	$V_{REF}/2=No\ Connection$ (No Adjustments)
ADC0801	$\pm 1/4$ LSB		
ADC0802		$\pm 1/2$ LSB	
ADC0803	$\pm 1/2$ LSB		
ADC0804		± 1 LSB	
ADC0805			± 1 LSB

Absolute Maximum Ratings (Notes 1, 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage (V_{CC}) (Note 3)	6.5V
Voltage	
Logic Control Inputs	-0.3V to +18V
At Other Input and Outputs	-0.3V to ($V_{CC}+0.3V$)
Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)	
Dual-In-Line Package (plastic)	260°C
Dual-In-Line Package (ceramic)	300°C
Surface Mount Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C

Infrared (15 seconds)	220°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Package Dissipation at $T_A=25^\circ\text{C}$	875 mW
ESD Susceptibility (Note 10)	800V

Operating Ratings (Notes 1, 2)

Temperature Range	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$
ADC0804LCJ	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$
ADC0801/02/03/05LCN	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$
ADC0804LCN	$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$
ADC0802/04LCWM	$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$
Range of V_{CC}	$4.5 V_{DC}$ to $6.3 V_{DC}$

Electrical Characteristics

The following specifications apply for $V_{CC}=5 V_{DC}$, $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ and $f_{CLK}=640$ kHz unless otherwise specified.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
ADC0801: Total Adjusted Error (Note 8)	With Full-Scale Adj. (See Section 2.5.2)			$\pm 1/4$	LSB
ADC0802: Total Unadjusted Error (Note 8)	$V_{REF}/2=2.500 V_{DC}$			$\pm 1/2$	LSB
ADC0803: Total Adjusted Error (Note 8)	With Full-Scale Adj. (See Section 2.5.2)			$\pm 1/2$	LSB
ADC0804: Total Unadjusted Error (Note 8)	$V_{REF}/2=2.500 V_{DC}$			± 1	LSB
ADC0805: Total Unadjusted Error (Note 8)	$V_{REF}/2$ -No Connection			± 1	LSB
$V_{REF}/2$ Input Resistance (Pin 9)	ADC0801/02/03/05	2.5	8.0		k Ω
	ADC0804 (Note 9)	0.75	1.1		k Ω
Analog Input Voltage Range	(Note 4) $V(+)$ or $V(-)$	Gnd-0.05		$V_{CC}+0.05$	V_{DC}
DC Common-Mode Error	Over Analog Input Voltage Range		$\pm 1/16$	$\pm 1/8$	LSB
Power Supply Sensitivity	$V_{CC}=5 V_{DC} \pm 10\%$ Over Allowed $V_{IN}(+)$ and $V_{IN}(-)$ Voltage Range (Note 4)		$\pm 1/16$	$\pm 1/8$	LSB

AC Electrical Characteristics

The following specifications apply for $V_{CC}=5 V_{DC}$ and $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
T_C	Conversion Time	$f_{CLK}=640$ kHz (Note 6)	103		114	μs
T_C	Conversion Time	(Notes 5, 6)	66		73	$1/f_{CLK}$
f_{CLK}	Clock Frequency	$V_{CC}=5V$, (Note 5)	100	640	1460	kHz
	Clock Duty Cycle		40		60	%
CR	Conversion Rate in Free-Running Mode	INTR tied to WR with $\overline{CS}=0 V_{DC}$, $f_{CLK}=640$ kHz	8770		9708	conv/s
$t_{W(WR)L}$	Width of WR Input (Start Pulse Width)	$\overline{CS}=0 V_{DC}$ (Note 7)	100			ns
t_{ACC}	Access Time (Delay from Falling Edge of RD to Output Data Valid)	$C_L=100$ pF		135	200	ns
t_{1H}, t_{0H}	TRI-STATE Control (Delay from Rising Edge of RD to Hi-Z State)	$C_L=10$ pF, $R_L=10k$ (See TRI-STATE Test Circuits)		125	200	ns
t_{WI}, t_{RI}	Delay from Falling Edge of WR or RD to Reset of INTR			300	450	ns
C_{IN}	Input Capacitance of Logic Control Inputs			5	7.5	pF

AC Electrical Characteristics (Continued)

The following specifications apply for $V_{CC}=5 V_{DC}$ and $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
C_{OUT}	TRI-STATE Output Capacitance (Data Buffers)			5	7.5	pF
CONTROL INPUTS [Note: CLK IN (Pin 4) is the input of a Schmitt trigger circuit and is therefore specified separately]						
$V_{IN}(1)$	Logical "1" Input Voltage (Except Pin 4 CLK IN)	$V_{CC}=5.25 V_{DC}$	2.0		15	V_{DC}
$V_{IN}(0)$	Logical "0" Input Voltage (Except Pin 4 CLK IN)	$V_{CC}=4.75 V_{DC}$			0.8	V_{DC}
$I_{IN}(1)$	Logical "1" Input Current (All Inputs)	$V_{IN}=5 V_{DC}$		0.005	1	μA_{DC}
$I_{IN}(0)$	Logical "0" Input Current (All Inputs)	$V_{IN}=0 V_{DC}$	-1	-0.005		μA_{DC}
CLOCK IN AND CLOCK R						
V_{T+}	CLK IN (Pin 4) Positive Going Threshold Voltage		2.7	3.1	3.5	V_{DC}
V_{T-}	CLK IN (Pin 4) Negative Going Threshold Voltage		1.5	1.8	2.1	V_{DC}
V_H	CLK IN (Pin 4) Hysteresis ($V_{T+} - V_{T-}$)		0.6	1.3	2.0	V_{DC}
$V_{OUT}(0)$	Logical "0" CLK R Output Voltage	$I_O=360 \mu A$ $V_{CC}=4.75 V_{DC}$			0.4	V_{DC}
$V_{OUT}(1)$	Logical "1" CLK R Output Voltage	$I_O=-360 \mu A$ $V_{CC}=4.75 V_{DC}$	2.4			V_{DC}
DATA OUTPUTS AND INTR						
$V_{OUT}(0)$	Logical "0" Output Voltage Data Outputs INTR Output	$I_{OUT}=1.6 mA, V_{CC}=4.75 V_{DC}$ $I_{OUT}=1.0 mA, V_{CC}=4.75 V_{DC}$			0.4	V_{DC}
					0.4	V_{DC}
$V_{OUT}(1)$	Logical "1" Output Voltage	$I_O=-360 \mu A, V_{CC}=4.75 V_{DC}$	2.4			V_{DC}
$V_{OUT}(1)$	Logical "1" Output Voltage	$I_O=-10 \mu A, V_{CC}=4.75 V_{DC}$	4.5			V_{DC}
I_{OUT}	TRI-STATE Disabled Output Leakage (All Data Buffers)	$V_{OUT}=0 V_{DC}$ $V_{OUT}=5 V_{DC}$	-3		3	μA_{DC}
I_{SOURCE}		V_{OUT} Short to Gnd, $T_A=25^\circ C$	4.5	6		mA_{DC}
I_{SINK}		V_{OUT} Short to V_{CC} , $T_A=25^\circ C$	9.0	16		mA_{DC}
POWER SUPPLY						
I_{CC}	Supply Current (Includes Ladder Current) ADC0801/02/03/04LCJ/05 ADC0804LCN/LCWM	$f_{CLK}=640 kHz$, $V_{REF}/2=NC$, $T_A=25^\circ C$ and $CS=5V$				
					1.1	1.8
				1.9	2.5	mA

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.

Note 2: All voltages are measured with respect to Gnd, unless otherwise specified. The separate A Gnd point should always be wired to the D Gnd.

Note 3: A zener diode exists, internally, from V_{CC} to Gnd and has a typical breakdown voltage of $7 V_{DC}$.

Note 4: For $V_{IN(-)} \geq V_{IN(+)}$ the digital output code will be 0000 0000. Two on-chip diodes are tied to each analog input (see block diagram) which will forward conduct for analog input voltages one diode drop below ground or one diode drop greater than the V_{CC} supply. Be careful, during testing at low V_{CC} levels (4.5V), as high level analog inputs (5V) can cause this input diode to conduct—especially at elevated temperatures, and cause errors for analog inputs near full-scale. The spec allows 50 mV forward bias of either diode. This means that as long as the analog V_{IN} does not exceed the supply voltage by more than 50 mV, the output code will be correct. To achieve an absolute 0 V_{DC} to 5 V_{DC} input voltage range will therefore require a minimum supply voltage of $4.950 V_{DC}$ over temperature variations, initial tolerance and loading.

Note 5: Accuracy is guaranteed at $f_{CLK} = 640 kHz$. At higher clock frequencies accuracy can degrade. For lower clock frequencies, the duty cycle limits can be extended so long as the minimum clock high time interval or minimum clock low time interval is no less than 275 ns.

Note 6: With an asynchronous start pulse, up to 8 clock periods may be required before the internal clock phases are proper to start the conversion process. The start request is internally latched, see Figure 4 and section 2.0.

AC Electrical Characteristics (Continued)

Note 7: The \overline{CS} input is assumed to bracket the \overline{WR} strobe input and therefore timing is dependent on the \overline{WR} pulse width. An arbitrarily wide pulse width will hold the converter in a reset mode and the start of conversion is initiated by the low to high transition of the \overline{WR} pulse (see timing diagrams).

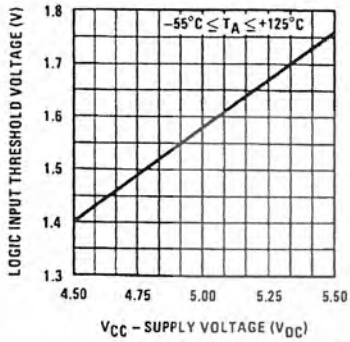
Note 8: None of these A/Ds requires a zero adjust (see section 2.5.1). To obtain zero code at other analog input voltages see section 2.5 and Figure 7.

Note 9: The $V_{REF/2}$ pin is the center point of a two-resistor divider connected from V_{CC} to ground. In all versions of the ADC0801, ADC0802, ADC0803, and ADC0805, and in the ADC0804LCJ, each resistor is typically 16 k Ω . In all versions of the ADC0804 except the ADC0804LCJ, each resistor is typically 2.2 k Ω .

Note 10: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 k Ω resistor.

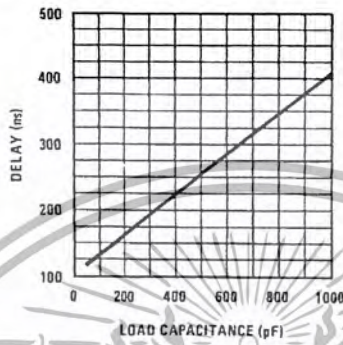
Typical Performance Characteristics

Logic Input Threshold Voltage vs. Supply Voltage



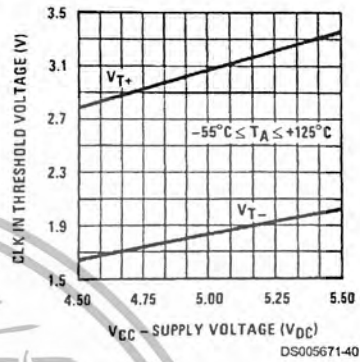
DS005671-38

Delay From Falling Edge of RD to Output Data Valid vs. Load Capacitance



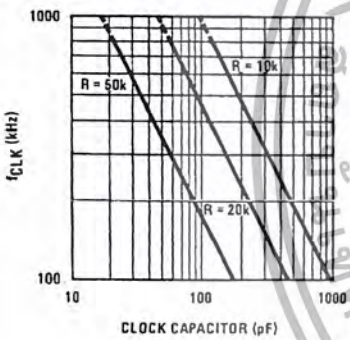
DS005671-39

CLK IN Schmitt Trip Levels vs. Supply Voltage



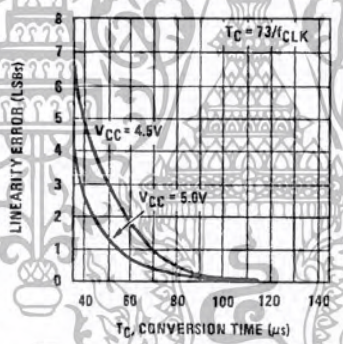
DS005671-40

fCLK vs. Clock Capacitor



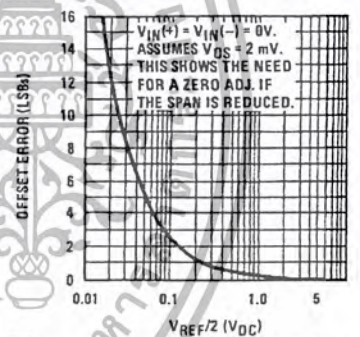
DS005671-41

Full-Scale Error vs Conversion Time



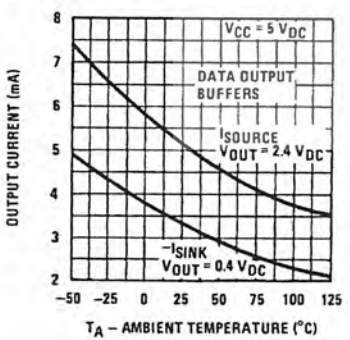
DS005671-42

Effect of Unadjusted Offset Error vs. VREF/2 Voltage



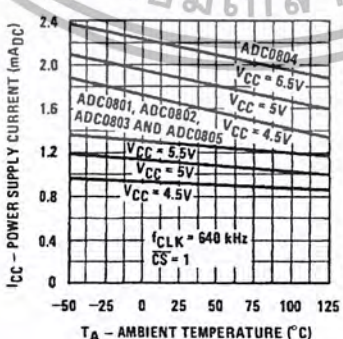
DS005671-43

Output Current vs Temperature



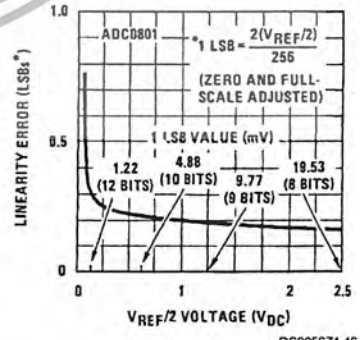
DS005671-44

Power Supply Current vs Temperature (Note 9)



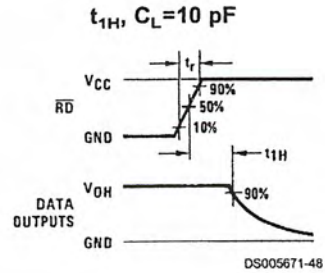
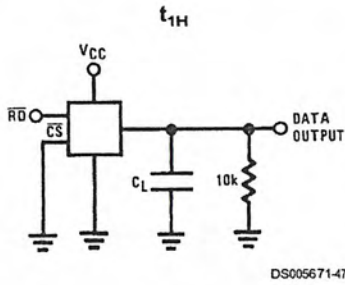
DS005671-45

Linearity Error at Low VREF/2 Voltages

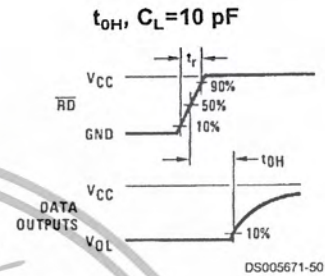
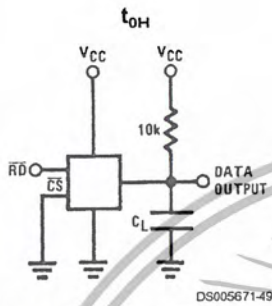


DS005671-46

TRI-STATE Test Circuits and Waveforms

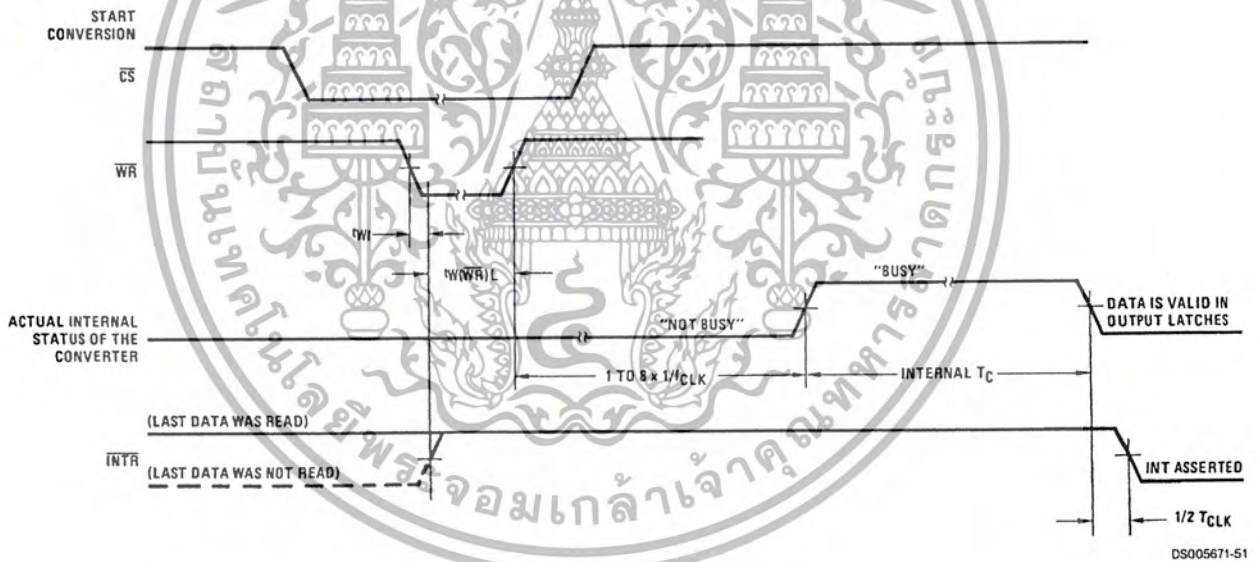


$t_r=20\text{ ns}$

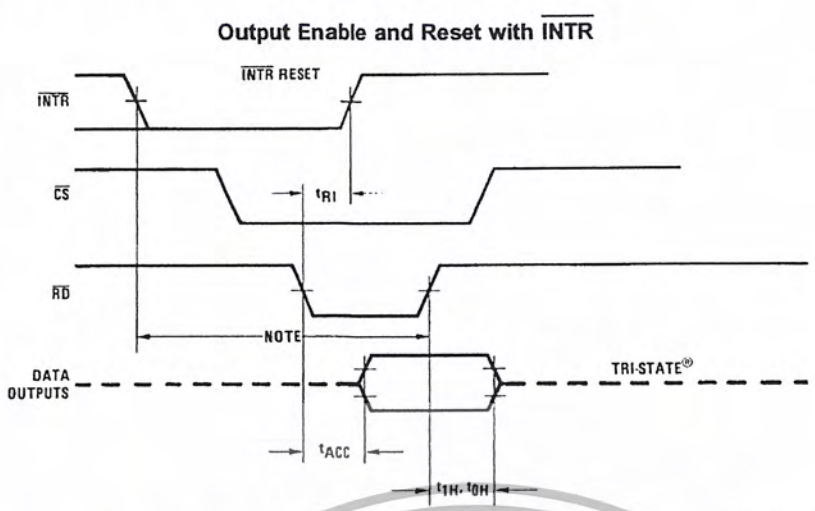


$t_r=20\text{ ns}$

Timing Diagrams (All timing is measured from the 50% voltage points)



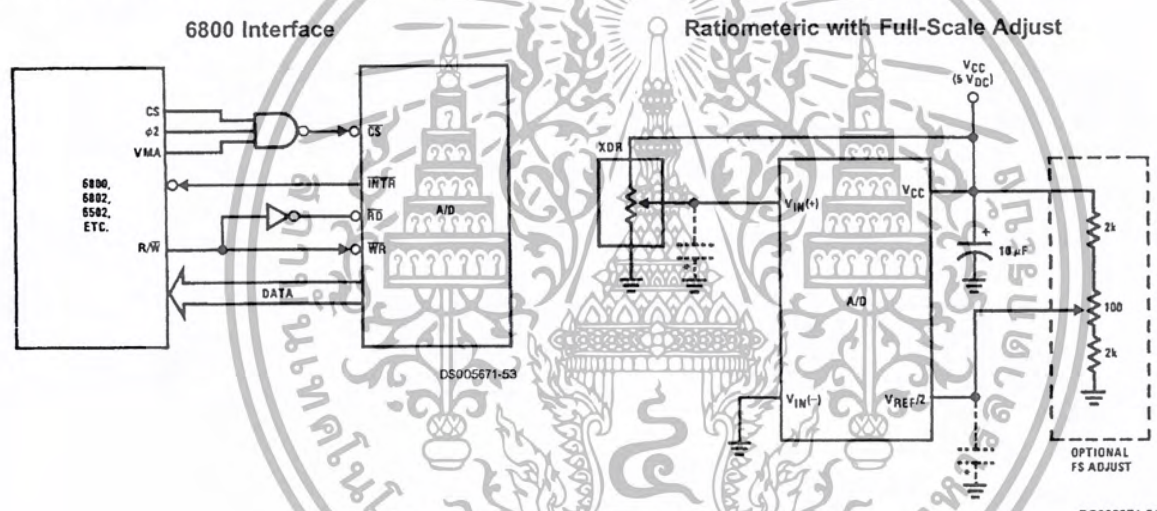
Timing Diagrams (All timing is measured from the 50% voltage points) (Continued)



DS005671-52

Note: Read strobe must occur 8 clock periods ($8/f_{\text{CLK}}$) after assertion of interrupt to guarantee reset of $\overline{\text{INTR}}$.

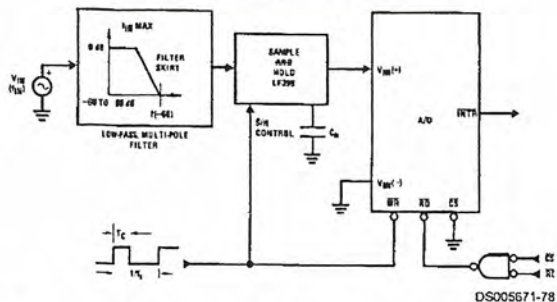
Typical Applications



Note: before using caps at V_{IN} or $V_{\text{REF}/2}$, see section 2.3.2 Input Bypass Capacitors.

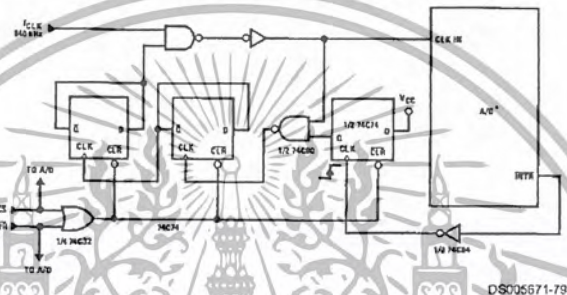
Typical Applications (Continued)

Sampling an AC Input Signal



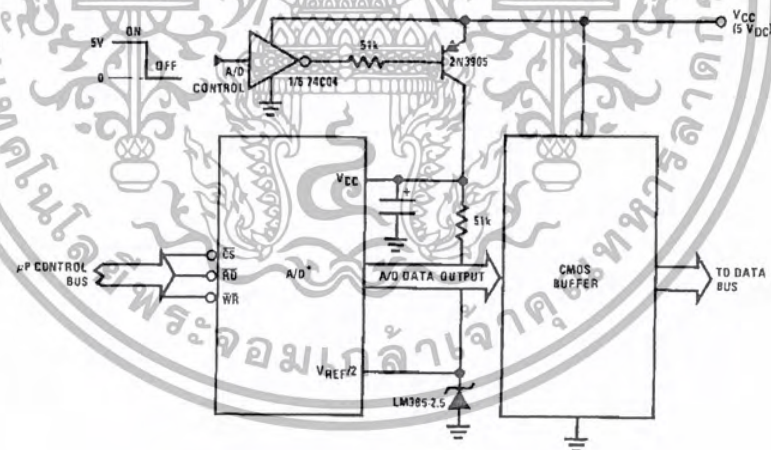
Note 11: Oversample whenever possible [keep $f_s > 2f(-60)$] to eliminate input frequency folding (aliasing) and to allow for the skirt response of the filter.
 Note 12: Consider the amplitude errors which are introduced within the passband of the filter.

70% Power Savings by Clock Gating



(Complete shutdown takes \approx 30 seconds.)

Power Savings by A/D and V_{REF} Shutdown



*Use ADC0801, 02, 03 or 05 for lowest power consumption.
 Note: Logic inputs can be driven to V_{CC} with A/D supply at zero volts.
 Buffer prevents data bus from overdriving output of A/D when in shutdown mode.

Functional Description

1.0 UNDERSTANDING A/D ERROR SPECS

A perfect A/D transfer characteristic (staircase waveform) is shown in Figure 1. The horizontal scale is analog input voltage and the particular points labeled are in steps of 1 LSB (19.53 mV with 2.5V tied to the $V_{REF}/2$ pin). The digital output codes that correspond to these inputs are shown as

D-1, D, and D+1. For the perfect A/D, not only will center-value (A-1, A, A+1, . . .) analog inputs produce the correct output digital codes, but also each riser (the transitions between adjacent output codes) will be located $\pm 1/2$ LSB away from each center-value. As shown, the risers are ideal and have no width. Correct digital output codes will be provided for a range of analog input voltages that extend

Functional Description (Continued)

$\pm 1/2$ LSB from the ideal center-values. Each tread (the range of analog input voltage that provides the same digital output code) is therefore 1 LSB wide.

Figure 2 shows a worst case error plot for the ADC0801. All center-valued inputs are guaranteed to produce the correct output codes and the adjacent risers are guaranteed to be no closer to the center-value points than $\pm 1/4$ LSB. In other words, if we apply an analog input equal to the center-value $\pm 1/4$ LSB, we guarantee that the A/D will produce the correct digital code. The maximum range of the position of the code transition is indicated by the horizontal arrow and it is guaranteed to be no more than $1/2$ LSB.

The error curve of Figure 3 shows a worst case error plot for the ADC0802. Here we guarantee that if we apply an analog input equal to the LSB analog voltage center-value the A/D will produce the correct digital code.

Next to each transfer function is shown the corresponding error plot. Many people may be more familiar with error plots than transfer functions. The analog input voltage to the A/D is provided by either a linear ramp or by the discrete output steps of a high resolution DAC. Notice that the error is continuously displayed and includes the quantization uncertainty of the A/D. For example the error at point 1 of Figure 1 is $+1/2$ LSB because the digital code appeared $1/2$ LSB in advance of the center-value of the tread. The error plots always have a constant negative slope and the abrupt up-side steps are always 1 LSB in magnitude.

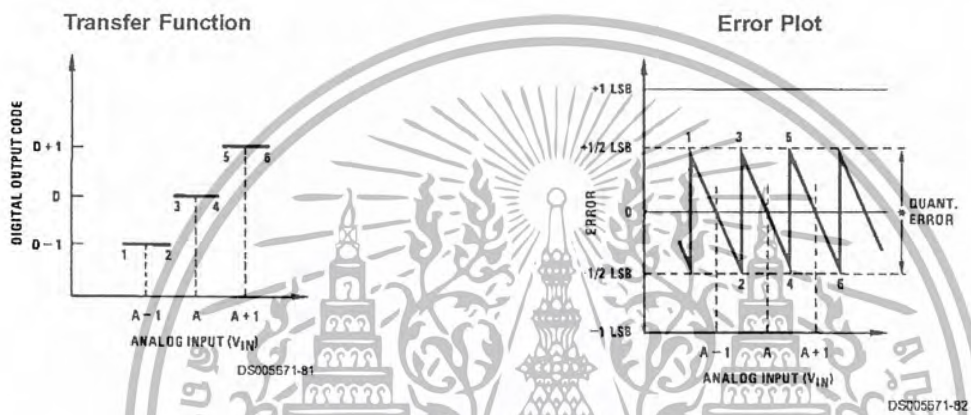


FIGURE 1. Clarifying the Error Specs of an A/D Converter Accuracy = ± 0 LSB: A Perfect A/D



FIGURE 2. Clarifying the Error Specs of an A/D Converter Accuracy = $\pm 1/4$ LSB

Functional Description (Continued)

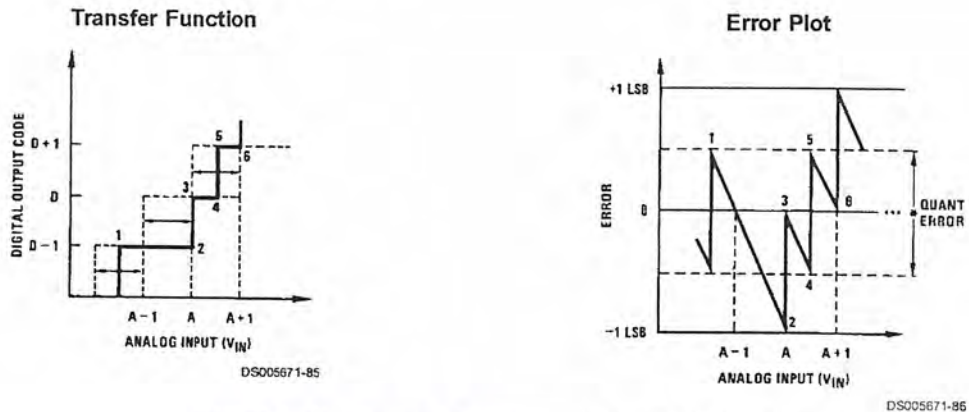


FIGURE 3. Clarifying the Error Specs of an A/D Converter
Accuracy = $\pm 1/2$ LSB

2.0 FUNCTIONAL DESCRIPTION

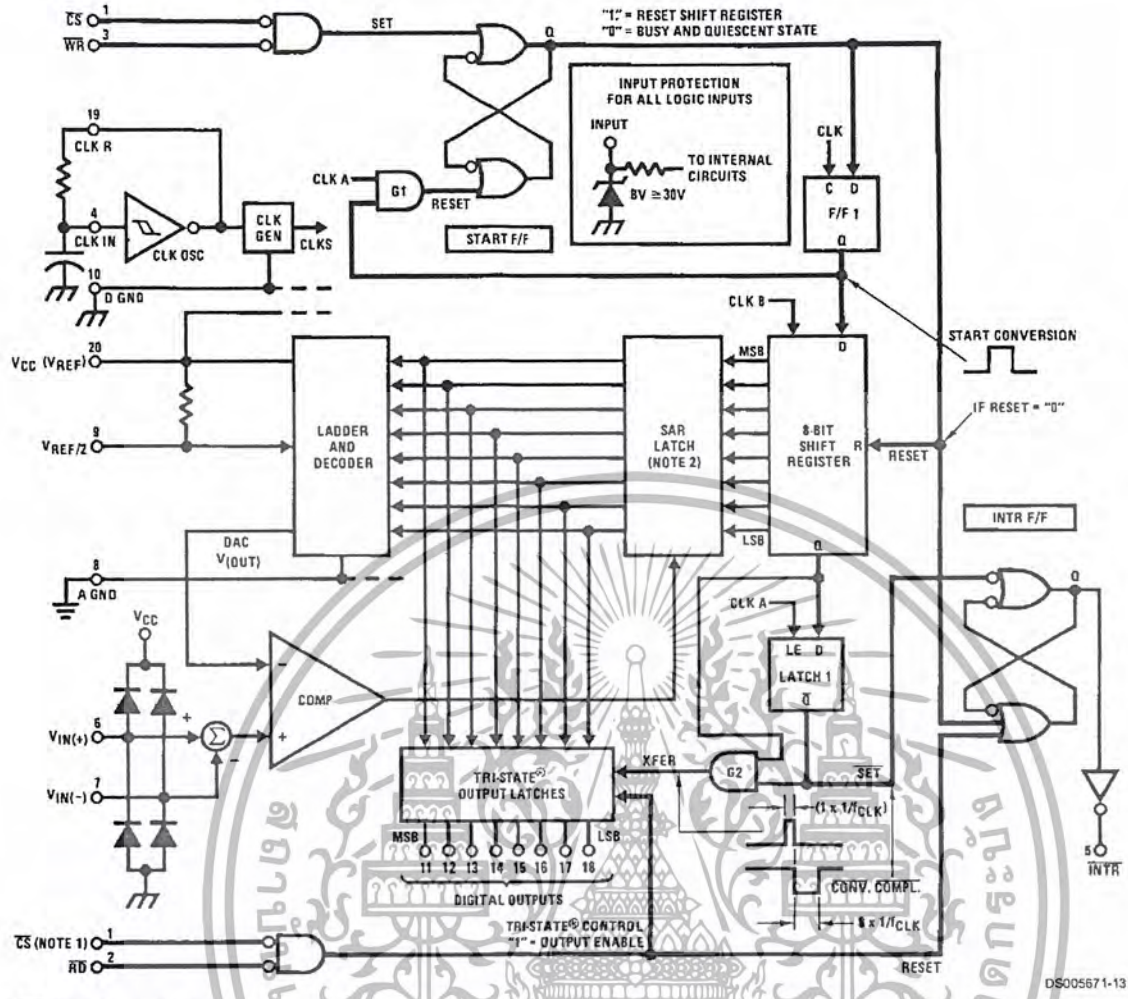
The ADC0801 series contains a circuit equivalent of the 256R network. Analog switches are sequenced by successive approximation logic to match the analog difference input voltage $[V_{IN(+)} - V_{IN(-)}]$ to a corresponding tap on the R network. The most significant bit is tested first and after 8 comparisons (64 clock cycles) a digital 8-bit binary code (1111 1111 = full-scale) is transferred to an output latch and then an interrupt is asserted (INTR makes a high-to-low transition). A conversion in process can be interrupted by issuing a second start command. The device may be operated in the free-running mode by connecting INTR to the WR input with CS = 0. To ensure start-up under all possible conditions, an external WR pulse is required during the first power-up cycle.

On the high-to-low transition of the WR input the internal SAR latches and the shift register stages are reset. As long as the CS input and WR input remain low, the A/D will remain in a reset state. Conversion will start from 1 to 8 clock periods after at least one of these inputs makes a low-to-high transition.

A functional diagram of the A/D converter is shown in Figure 4. All of the package pinouts are shown and the major logic control paths are drawn in heavier weight lines.

The converter is started by having CS and WR simultaneously low. This sets the start flip-flop (F/F) and the resulting "1" level resets the 8-bit shift register, resets the Interrupt (INTR) F/F and inputs a "1" to the D flop, F/F1, which is at the input end of the 8-bit shift register. Internal clock signals then transfer this "1" to the Q output of F/F1. The AND gate, G1, combines this "1" output with a clock signal to provide a reset signal to the start F/F. If the set signal is no longer present (either WR or CS is a "1") the start F/F is reset and the 8-bit shift register then can have the "1" clocked in, which starts the conversion process. If the set signal were to still be present, this reset pulse would have no effect (both outputs of the start F/F would momentarily be at a "1" level) and the 8-bit shift register would continue to be held in the reset mode. This logic therefore allows for wide CS and WR signals and the converter will start after at least one of these signals returns high and the internal clocks again provide a reset signal for the start F/F.

Functional Description (Continued)



Note 13: \overline{CS} shown twice for clarity.
 Note 14: SAR = Successive Approximation Register.

FIGURE 4. Block Diagram

After the "1" is clocked through the 8-bit shift register (which completes the SAR search) it appears as the input to the D-type latch, LATCH 1. As soon as this "1" is output from the shift register, the AND gate, G2, causes the new digital word to transfer to the TRI-STATE output latches. When LATCH 1 is subsequently enabled, the Q output makes a high-to-low transition which causes the INTR F/F to set. An inverting buffer then supplies the \overline{INTR} input signal.

which causes the input to the D-type latch, LATCH 1, to go low. As the latch enable input is still present, the \overline{Q} output will go high, which then allows the INTR F/F to be RESET. This reduces the width of the resulting \overline{INTR} output pulse to only a few propagation delays (approximately 300 ns).

Note that this \overline{SET} control of the INTR F/F remains low for 8 of the external clock periods (as the internal clocks run at 1/8 of the frequency of the external clock). If the data output is continuously enabled (\overline{CS} and \overline{RD} both held low), the \overline{INTR} output will still signal the end of conversion (by a high-to-low transition), because the \overline{SET} input can control the Q output of the INTR F/F even though the RESET input is constantly at a "1" level in this operating mode. This \overline{INTR} output will therefore stay low for the duration of the \overline{SET} signal, which is 8 periods of the external clock frequency (assuming the A/D is not started during this interval).

When data is to be read, the combination of both \overline{CS} and \overline{RD} being low will cause the INTR F/F to be reset and the TRI-STATE output latches will be enabled to provide the 8-bit digital outputs.

When operating in the free-running or continuous conversion mode (INTR pin tied to WR and CS wired low—see also section 2.8), the START F/F is SET by the high-to-low transition of the \overline{INTR} signal. This resets the SHIFT REGISTER

2.1 Digital Control Inputs

The digital control inputs (\overline{CS} , \overline{RD} , and \overline{WR}) meet standard T²L logic voltage levels. These signals have been renamed when compared to the standard A/D Start and Output Enable labels. In addition, these inputs are active low to allow an easy interface to microprocessor control busses. For non-microprocessor based applications, the \overline{CS} input (pin 1) can be grounded and the standard A/D Start function is obtained by an active low pulse applied at the \overline{WR} input (pin 3) and the Output Enable function is caused by an active low pulse at the \overline{RD} input (pin 2).

Functional Description (Continued)

2.2 Analog Differential Voltage Inputs and Common-Mode Rejection

This A/D has additional applications flexibility due to the analog differential voltage input. The $V_{IN(-)}$ input (pin 7) can be used to automatically subtract a fixed voltage value from the input reading (tare correction). This is also useful in 4 mA–20 mA current loop conversion. In addition, common-mode noise can be reduced by use of the differential input.

The time interval between sampling $V_{IN(+)}$ and $V_{IN(-)}$ is $4\frac{1}{2}$ clock periods. The maximum error voltage due to this slight time difference between the input voltage samples is given by:

$$\Delta V_e(\text{MAX}) = (V_P) (2\pi f_{cm}) \left(\frac{4.5}{f_{CLK}} \right)$$

where:

- ΔV_e is the error voltage due to sampling delay
- V_P is the peak value of the common-mode voltage
- f_{cm} is the common-mode frequency

As an example, to keep this error to $\frac{1}{4}$ LSB (~ 5 mV) when operating with a 60 Hz common-mode frequency, f_{cm} , and using a 640 kHz A/D clock, f_{CLK} , would allow a peak value of the common-mode voltage, V_P , which is given by:

$$V_P = \frac{[\Delta V_e(\text{MAX}) (f_{CLK})]}{(2\pi f_{cm}) (4.5)}$$

or

$$V_P = \frac{(5 \times 10^{-3}) (640 \times 10^3)}{(6.28) (60) (4.5)}$$

which gives

$$V_P = 1.9V.$$

The allowed range of analog input voltages usually places more severe restrictions on input common-mode noise levels.

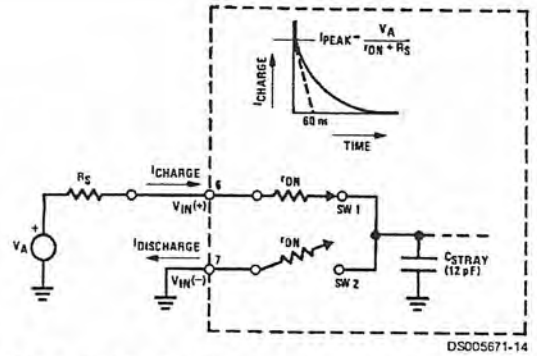
An analog input voltage with a reduced span and a relatively large zero offset can be handled easily by making use of the differential input (see section 2.4 Reference Voltage).

2.3 Analog Inputs

2.3.1 Input Current

Normal Mode

Due to the internal switching action, displacement currents will flow at the analog inputs. This is due to on-chip stray capacitance to ground as shown in Figure 5.



$$r_{ON} \text{ of SW 1 and SW 2} = 5 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ON} C_{STRAY} = 5 \text{ k}\Omega \times 12 \text{ pF} = 60 \text{ ns}$$

FIGURE 5. Analog Input Impedance

The voltage on this capacitance is switched and will result in currents entering the $V_{IN(+)}$ input pin and leaving the $V_{IN(-)}$ input which will depend on the analog differential input voltage levels. These current transients occur at the leading edge of the internal clocks. They rapidly decay and *do not* cause errors as the on-chip comparator is strobed at the end of the clock period.

Fault Mode

If the voltage source applied to the $V_{IN(+)}$ or $V_{IN(-)}$ pin exceeds the allowed operating range of $V_{CC} + 50$ mV, large input currents can flow through a parasitic diode to the V_{CC} pin. If these currents can exceed the 1 mA max allowed spec, an external diode (1N914) should be added to bypass this current to the V_{CC} pin (with the current bypassed with this diode, the voltage at the $V_{IN(+)}$ pin can exceed the V_{CC} voltage by the forward voltage of this diode).

2.3.2 Input Bypass Capacitors

Bypass capacitors at the inputs will average these charges and cause a DC current to flow through the output resistances of the analog signal sources. This charge pumping action is worse for continuous conversions with the $V_{IN(+)}$ input voltage at full-scale. For continuous conversions with a 640 kHz clock frequency with the $V_{IN(+)}$ input at 5V, this DC current is at a maximum of approximately 5 μ A. Therefore, *bypass capacitors should not be used at the analog inputs or the $V_{REF/2}$ pin for high resistance sources ($> 1 \text{ k}\Omega$).* If input bypass capacitors are necessary for noise filtering and high source resistance is desirable to minimize capacitor size, the detrimental effects of the voltage drop across this input resistance, which is due to the average value of the input current, can be eliminated with a full-scale adjustment while the given source resistor and input bypass capacitor are both in place. This is possible because the average value of the input current is a precise linear function of the differential input voltage.

2.3.3 Input Source Resistance

Large values of source resistance where an input bypass capacitor is not used, *will not cause errors* as the input currents settle out prior to the comparison time. If a low pass filter is required in the system, use a low valued series resistor ($\leq 1 \text{ k}\Omega$) for a passive RC section or add an op amp RC active low pass filter. For low source resistance applications, ($\leq 1 \text{ k}\Omega$), a 0.1 μ F bypass capacitor at the inputs will prevent noise pickup due to series lead inductance of a long

Functional Description (Continued)

wire. A 100Ω series resistor can be used to isolate this capacitor—both the R and C are placed outside the feedback loop—from the output of an op amp, if used.

2.3.4 Noise

The leads to the analog inputs (pins 6 and 7) should be kept as short as possible to minimize input noise coupling. Both noise and undesired digital clock coupling to these inputs can cause system errors. The source resistance for these inputs should, in general, be kept below $5\text{ k}\Omega$. Larger values of source resistance can cause undesired system noise pickup. Input bypass capacitors, placed from the analog inputs to ground, will eliminate system noise pickup but can create analog scale errors as these capacitors will average the transient input switching currents of the A/D (see section 2.3.1.). This scale error depends on both a large source resistance and the use of an input bypass capacitor. This error can be eliminated by doing a full-scale adjustment of the A/D (adjust $V_{REF/2}$ for a proper full-scale reading—see section 2.5.2 on Full-Scale Adjustment) with the source resistance and input bypass capacitor in place.

2.4 Reference Voltage

2.4.1 Span Adjust

For maximum applications flexibility, these A/Ds have been designed to accommodate a $5V_{DC}$, $2.5V_{DC}$ or an adjusted voltage reference. This has been achieved in the design of the IC as shown in Figure 6.

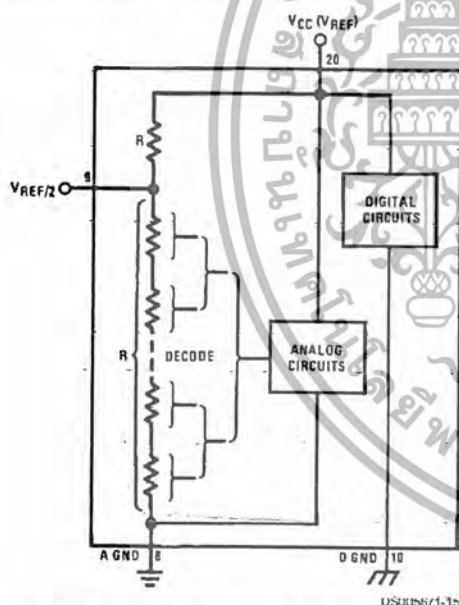


FIGURE 6. The $V_{REFERENCE}$ Design on the IC

Notice that the reference voltage for the IC is either $\frac{1}{2}$ of the voltage applied to the V_{CC} supply pin, or is equal to the voltage that is externally forced at the $V_{REF/2}$ pin. This allows for a ratiometric voltage reference using the V_{CC} supply, a $5V_{DC}$ reference voltage can be used for the V_{CC} supply or a voltage less than $2.5V_{DC}$ can be applied to the $V_{REF/2}$ input for increased application flexibility. The internal gain to the $V_{REF/2}$ input is 2, making the full-scale differential input voltage twice the voltage at pin 9.

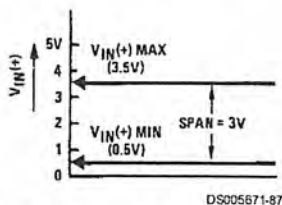
An example of the use of an adjusted reference voltage is to accommodate a reduced span—or dynamic voltage range of the analog input voltage. If the analog input voltage were to range from $0.5V_{DC}$ to $3.5V_{DC}$, instead of $0V$ to $5V_{DC}$, the span would be $3V$ as shown in Figure 7. With $0.5V_{DC}$ applied to the $V_{IN(-)}$ pin to absorb the offset, the reference voltage can be made equal to $\frac{1}{2}$ of the $3V$ span or $1.5V_{DC}$. The A/D now will encode the $V_{IN(+)}$ signal from $0.5V$ to $3.5V$ with the $0.5V$ input corresponding to zero and the $3.5V_{DC}$ input corresponding to full-scale. The full 8 bits of resolution are therefore applied over this reduced analog input voltage range.

2.4.2 Reference Accuracy Requirements

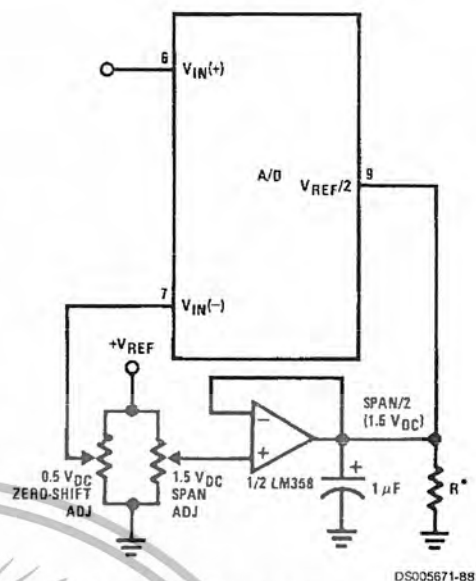
The converter can be operated in a ratiometric mode or an absolute mode. In ratiometric converter applications, the magnitude of the reference voltage is a factor in both the output of the source transducer and the output of the A/D converter and therefore cancels out in the final digital output code. The ADC0805 is specified particularly for use in ratiometric applications with no adjustments required. In absolute conversion applications, both the initial value and the temperature stability of the reference voltage are important factors in the accuracy of the A/D converter. For $V_{REF/2}$ voltages of $2.4V_{DC}$ nominal value, initial errors of $\pm 10\text{ mV}_{DC}$ will cause conversion errors of $\pm 1\text{ LSB}$ due to the gain of 2 of the $V_{REF/2}$ input. In reduced span applications, the initial value and the stability of the $V_{REF/2}$ input voltage become even more important. For example, if the span is reduced to $2.5V$, the analog input LSB voltage value is correspondingly reduced from 20 mV ($5V$ span) to 10 mV and 1 LSB at the $V_{REF/2}$ input becomes 5 mV . As can be seen, this reduces the allowed initial tolerance of the reference voltage and requires correspondingly less absolute change with temperature variations. Note that spans smaller than $2.5V$ place even tighter requirements on the initial accuracy and stability of the reference source.

In general, the magnitude of the reference voltage will require an initial adjustment. Errors due to an improper value of reference voltage appear as full-scale errors in the A/D transfer function. IC voltage regulators may be used for references if the ambient temperature changes are not excessive. The LM336B $2.5V$ IC reference diode (from National Semiconductor) has a temperature stability of 1.8 mV typ (6 mV max) over $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$. Other temperature range parts are also available.

Functional Description (Continued)



a) Analog Input Signal Example



*Add if $V_{REF/2} \leq 1 V_{DC}$ with LM358 to draw 3 mA to ground.

b) Accommodating an Analog Input from 0.5V (Digital Out = 00_{HEX}) to 3.5V (Digital Out = FF_{HEX})

FIGURE 7. Adapting the A/D Analog Input Voltages to Match an Arbitrary Input Signal Range

2.5 Errors and Reference Voltage Adjustments

2.5.1 Zero Error

The zero of the A/D does not require adjustment. If the minimum analog input voltage value, $V_{IN(MIN)}$, is not ground, a zero offset can be done. The converter can be made to output 0000 0000 digital code for this minimum input voltage by biasing the A/D $V_{IN(-)}$ input at this $V_{IN(MIN)}$ value (see Applications section). This utilizes the differential mode operation of the A/D.

The zero error of the A/D converter relates to the location of the first riser of the transfer function and can be measured by grounding the $V_{IN(-)}$ input and applying a small magnitude positive voltage to the $V_{IN(+)}$ input. Zero error is the difference between the actual DC input voltage that is necessary to just cause an output digital code transition from 0000 0000 to 0000 0001 and the ideal $\frac{1}{2}$ LSB value ($\frac{1}{2}$ LSB = 9.8 mV for $V_{REF/2} = 2.500 V_{DC}$).

2.5.2 Full-Scale

The full-scale adjustment can be made by applying a differential input voltage that is $\frac{1}{2}$ LSB less than the desired analog full-scale voltage range and then adjusting the magnitude of the $V_{REF/2}$ input (pin 9 or the V_{CC} supply if pin 9 is not used) for a digital output code that is just changing from 1111 1110 to 1111 1111.

2.5.3 Adjusting for an Arbitrary Analog Input Voltage Range

If the analog zero voltage of the A/D is shifted away from ground (for example, to accommodate an analog input signal that does not go to ground) this new zero reference should be properly adjusted first. A $V_{IN(+)}$ voltage that equals this desired zero reference plus $\frac{1}{2}$ LSB (where the LSB is calculated for the desired analog span, 1 LSB = analog span/

256) is applied to pin 6 and the zero reference voltage at pin 7 should then be adjusted to just obtain the 00_{HEX} to 01_{HEX} code transition.

The full-scale adjustment should then be made (with the proper $V_{IN(-)}$ voltage applied) by forcing a voltage to the $V_{IN(+)}$ input which is given by:

$$V_{IN(+)} \text{ fs adj} = V_{MAX} - 1.5 \left[\frac{(V_{MAX} - V_{MIN})}{256} \right]$$

where:

V_{MAX} = The high end of the analog input range

and

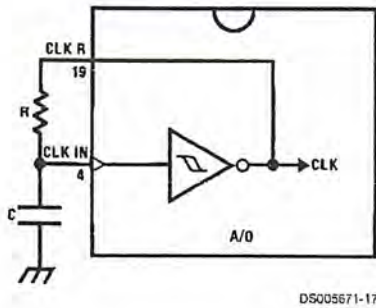
V_{MIN} = the low end (the offset zero) of the analog range. (Both are ground referenced.)

The $V_{REF/2}$ (or V_{CC}) voltage is then adjusted to provide a code change from FE_{HEX} to FF_{HEX}. This completes the adjustment procedure.

2.6 Clocking Option

The clock for the A/D can be derived from the CPU clock or an external RC can be added to provide self-clocking. The CLK IN (pin 4) makes use of a Schmitt trigger as shown in Figure 8.

Functional Description (Continued)



D5005571-17

$$f_{\text{CLK}} \approx \frac{1}{1.1 RC}$$

$$R \approx 10 \text{ k}\Omega$$

FIGURE 8. Self-Clocking the A/D

Heavy capacitive or DC loading of the clock R pin should be avoided as this will disturb normal converter operation. Loads less than 50 pF, such as driving up to 7 A/D converter clock inputs from a single clock R pin of 1 converter, are allowed. For larger clock line loading, a CMOS or low power TTL buffer or PNP input logic should be used to minimize the loading on the clock R pin (do not use a standard TTL buffer).

2.7 Restart During a Conversion

If the A/D is restarted ($\overline{\text{CS}}$ and $\overline{\text{WR}}$ go low and return high) during a conversion, the converter is reset and a new conversion is started. The output data latch is not updated if the conversion in process is not allowed to be completed, therefore the data of the previous conversion remains in this latch. The $\overline{\text{INTR}}$ output simply remains at the "1" level.

2.8 Continuous Conversions

For operation in the free-running mode an initializing pulse should be used, following power-up, to ensure circuit operation. In this application, the $\overline{\text{CS}}$ input is grounded and the $\overline{\text{WR}}$ input is tied to the $\overline{\text{INTR}}$ output. This $\overline{\text{WR}}$ and $\overline{\text{INTR}}$ node should be momentarily forced to logic low following a power-up cycle to guarantee operation.

2.9 Driving the Data Bus

This MOS A/D, like MOS microprocessors and memories, will require a bus driver when the total capacitance of the data bus gets large. Other circuitry, which is tied to the data bus, will add to the total capacitive loading, even in TRI-STATE (high impedance mode). Backplane bussing also greatly adds to the stray capacitance of the data bus.

There are some alternatives available to the designer to handle this problem. Basically, the capacitive loading of the data bus slows down the response time, even though DC specifications are still met. For systems operating with a relatively slow CPU clock frequency, more time is available in which to establish proper logic levels on the bus and therefore higher capacitive loads can be driven (see typical characteristics curves).

At higher CPU clock frequencies time can be extended for I/O reads (and/or writes) by inserting wait states (8080) or using clock extending circuits (6800).

Finally, if time is short and capacitive loading is high, external bus drivers must be used. These can be TRI-STATE buffers

(low power Schottky such as the DM74LS240 series is recommended) or special higher drive current products which are designed as bus drivers. High current bipolar bus drivers with PNP inputs are recommended.

2.10 Power Supplies

Noise spikes on the V_{CC} supply line can cause conversion errors as the comparator will respond to this noise. A low inductance tantalum filter capacitor should be used close to the converter V_{CC} pin and values of 1 μF or greater are recommended. If an unregulated voltage is available in the system, a separate LM340LAZ-5.0, TO-92, 5V voltage regulator for the converter (and other analog circuitry) will greatly reduce digital noise on the V_{CC} supply.

2.11 Wiring and Hook-Up Precautions

Standard digital wire wrap sockets are not satisfactory for breadboarding this A/D converter. Sockets on PC boards can be used and all logic signal wires and leads should be grouped and kept as far away as possible from the analog signal leads. Exposed leads to the analog inputs can cause undesired digital noise and hum pickup, therefore shielded leads may be necessary in many applications.

A single point analog ground that is separate from the logic ground points should be used. The power supply bypass capacitor and the self-clocking capacitor (if used) should both be returned to digital ground. Any $V_{\text{REF}}/2$ bypass capacitors, analog input filter capacitors, or input signal shielding should be returned to the analog ground point. A test for proper grounding is to measure the zero error of the A/D converter. Zero errors in excess of $1/4$ LSB can usually be traced to improper board layout and wiring (see section 2.5.1 for measuring the zero error).

3.0 TESTING THE A/D CONVERTER

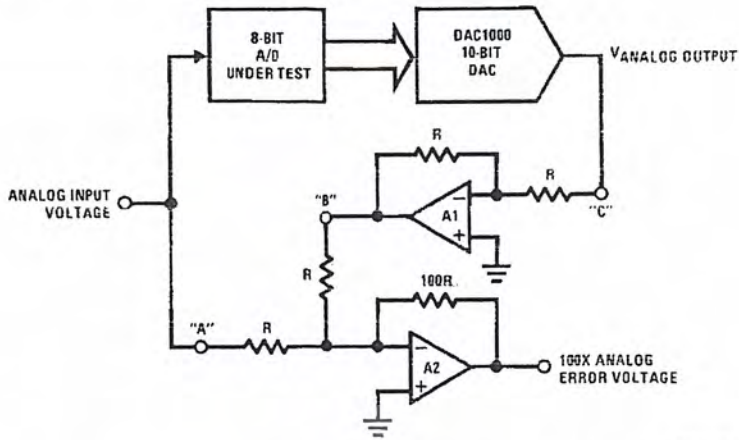
There are many degrees of complexity associated with testing an A/D converter. One of the simplest tests is to apply a known analog input voltage to the converter and use LEDs to display the resulting digital output code as shown in Figure 9.

For ease of testing, the $V_{\text{REF}}/2$ (pin 9) should be supplied with $2.560 V_{\text{DC}}$ and a V_{CC} supply voltage of $5.12 V_{\text{DC}}$ should be used. This provides an LSB value of 20 mV.

If a full-scale adjustment is to be made, an analog input voltage of $5.090 V_{\text{DC}}$ ($5.120 - 1/2$ LSB) should be applied to the $V_{\text{IN}}(+)$ pin with the $V_{\text{IN}}(-)$ pin grounded. The value of the $V_{\text{REF}}/2$ input voltage should then be adjusted until the digital output code is just changing from 1111 1110 to 1111 1111. This value of $V_{\text{REF}}/2$ should then be used for all the tests.

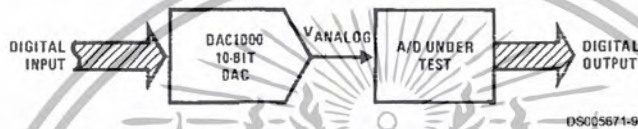
The digital output LED display can be decoded by dividing the 8 bits into 2 hex characters, the 4 most significant (MS) and the 4 least significant (LS). Table 1 shows the fractional binary equivalent of these two 4-bit groups. By adding the voltages obtained from the "VMS" and "VLS" columns in Table 1, the nominal value of the digital display (when $V_{\text{REF}}/2 = 2.560\text{V}$) can be determined. For example, for an output LED display of 1011 0110 or B6 (in hex), the voltage values from the table are $3.520 + 0.120$ or $3.640 V_{\text{DC}}$. These voltage values represent the center-values of a perfect A/D converter. The effects of quantization error have to be accounted for in the interpretation of the test results.

Functional Description (Continued)



DS005671-89

FIGURE 10. A/D Tester with Analog Error Output



DS005671-90

FIGURE 11. Basic "Digital" A/D Tester

TABLE 1. DECODING THE DIGITAL OUTPUT LEDS

HEX	BINARY	FRACTIONAL BINARY VALUE FOR		OUTPUT VOLTAGE CENTER VALUES WITH $V_{REF}/2 = 2.560 V_{DC}$	
		MS GROUP	LS GROUP	VMS GROUP (Note 15)	VLS GROUP (Note 15)
		F	1 1 1 1	15/16	15/256
E	1 1 1 0	7/8	7/128	4.480	0.280
D	1 1 0 1	13/16	13/256	4.160	0.260
C	1 1 0 0	3/4	3/64	3.840	0.240
B	1 0 1 1	11/16	11/256	3.520	0.220
A	1 0 1 0	5/8	5/128	3.200	0.200
9	1 0 0 1	9/16	9/256	2.880	0.180
8	1 0 0 0	1/2	1/32	2.560	0.160
7	0 1 1 1	7/16	7/256	2.240	0.140
6	0 1 1 0	3/8	3/128	1.920	0.120
5	0 1 0 1	5/16	2/256	1.600	0.100
4	0 1 0 0	1/4	1/64	1.280	0.080
3	0 0 1 1	3/16	3/256	0.960	0.060
2	0 0 1 0	1/8	1/128	0.640	0.040
1	0 0 0 1	1/16	1/256	0.320	0.020
0	0 0 0 0			0	0

Note 15: Display Output = VMS Group + VLS Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6-Pin DIP Optoisolators Transistor Output

The 4N35, 4N36 and 4N37 devices consist of a gallium arsenide infrared emitting diode optically coupled to a monolithic silicon phototransistor detector.

- Current Transfer Ratio — 100% Minimum @ Specified Conditions
- Guaranteed Switching Speeds
- Meets or Exceeds all JEDEC Registered Specifications
- *To order devices that are tested and marked per VDE 0884 requirements, the suffix "V" must be included at end of part number. VDE 0884 is a test option.*

Applications

- General Purpose Switching Circuits
- Interfacing and coupling systems of different potentials and impedances
- Regulation Feedback Circuits
- Monitor & Detection Circuits
- Solid State Relays

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
INPUT LED			
Reverse Voltage	V_R	6	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
LED Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ with Negligible Power in Output Detector Derate above 25°C	P_D	120 1.41	mW mW/°C
OUTPUT TRANSISTOR			
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	30	Volts
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	7	Volts
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	70	Volts
Collector Current — Continuous	I_C	150	mA
Detector Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ with Negligible Power in Input LED Derate above 25°C	P_D	150 1.76	mW mW/°C
TOTAL DEVICE			
Isolation Source Voltage ⁽¹⁾ (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 sec Duration)	V_{ISO}	7500	Vac(pk)
Total Device Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	250 2.94	mW mW/°C
Ambient Operating Temperature Range ⁽²⁾	T_A	-55 to +100	°C
Storage Temperature Range ⁽²⁾	T_{stg}	-55 to +150	°C
Soldering Temperature (10 sec, 1/16" from case)	T_L	260	°C

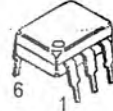
1. Isolation surge voltage is an internal device dielectric breakdown rating.
For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.
 2. Refer to Quality and Reliability Section in Opto Data Book for information on test conditions.
Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.
- GlobalOptoisolator is a trademark of Motorola, Inc.

4N35*
4N36
4N37

[CTR = 100% Min]

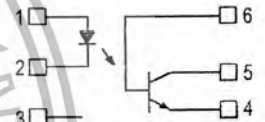
*Motorola Preferred Device

STYLE 1 PLASTIC



STANDARD THRU HOLE
CASE 730A-04

SCHEMATIC



- PIN 1. LED ANODE
2. LED CATHODE
3. N.C.
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

4N35 4N36 4N37

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)⁽¹⁾

Characteristic	Symbol	Min	Typ ⁽¹⁾	Max	Unit	
INPUT LED						
Forward Voltage ($I_F = 10\text{ mA}$)	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = -55^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$	V_F	0.8 0.9 0.7	1.15 1.3 1.05	1.5 1.7 1.4	V
Reverse Leakage Current ($V_R = 6\text{ V}$)		I_R	—	—	10	μA
Capacitance ($V = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$)		C_J	—	18	—	pF

OUTPUT TRANSISTOR

Collector-Emitter Dark Current ($V_{CE} = 10\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$) ($V_{CE} = 30\text{ V}$, $T_A = 100^\circ\text{C}$)		I_{CEO}	— —	1 —	50 500	nA μA
Collector-Base Dark Current ($V_{CB} = 10\text{ V}$)	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$	I_{CBO}	—	0.2 100	20 —	nA
Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 1\text{ mA}$)		$V_{(BR)CEO}$	30	45	—	V
Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$)		$V_{(BR)CBO}$	70	100	—	V
Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = 100\text{ }\mu\text{A}$)		$V_{(BR)EBO}$	7	7.8	—	V
DC Current Gain ($I_C = 2\text{ mA}$, $V_{CE} = 5\text{ V}$)		h_{FE}	—	400	—	—
Collector-Emitter Capacitance ($f = 1\text{ MHz}$, $V_{CE} = 0$)		C_{CE}	—	7	—	pF
Collector-Base Capacitance ($f = 1\text{ MHz}$, $V_{CB} = 0$)		C_{CB}	—	19	—	pF
Emitter-Base Capacitance ($f = 1\text{ MHz}$, $V_{EB} = 0$)		C_{EB}	—	9	—	pF

COUPLED

Output Collector Current ($I_F = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$)	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = -55^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$	I_C (CTR) ⁽²⁾	10 (100) 4 (40) 4 (40)	30 (300) — —	— — —	mA (%)
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 0.5\text{ mA}$, $I_F = 10\text{ mA}$)		$V_{CE(sat)}$	—	0.14	0.3	V
Turn-On Time	$(I_C = 2\text{ mA}$, $V_{CC} = 10\text{ V}$, $R_L = 100\text{ }\Omega$) ⁽³⁾	t_{on}	—	7.5	10	μs
Turn-Off Time		t_{off}	—	5.7	10	
Rise Time		t_r	—	3.2	—	
Fall Time		t_f	—	4.7	—	
Isolation Voltage ($f = 60\text{ Hz}$, $t = 1\text{ sec}$)		V_{ISO}	7500	—	—	Vac(pk)
Isolation Current ⁽⁴⁾ ($V_{I-O} = 3550\text{ Vpk}$) ($V_{I-O} = 2500\text{ Vpk}$) ($V_{I-O} = 1500\text{ Vpk}$)	4N35 4N36 4N37	I_{ISO}	— — —	— — 8	100 100 100	μA
Isolation Resistance ($V = 500\text{ V}$) ⁽⁴⁾		R_{ISO}	10^{11}	—	—	Ω
Isolation Capacitance ($V = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$) ⁽⁴⁾		C_{ISO}	—	0.2	2	pF

1. Always design to the specified minimum/maximum electrical limits (where applicable).
2. Current Transfer Ratio (CTR) = $I_C/I_F \times 100\%$.
3. For test circuit setup and waveforms, refer to Figure 11.
4. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

TYPICAL CHARACTERISTICS

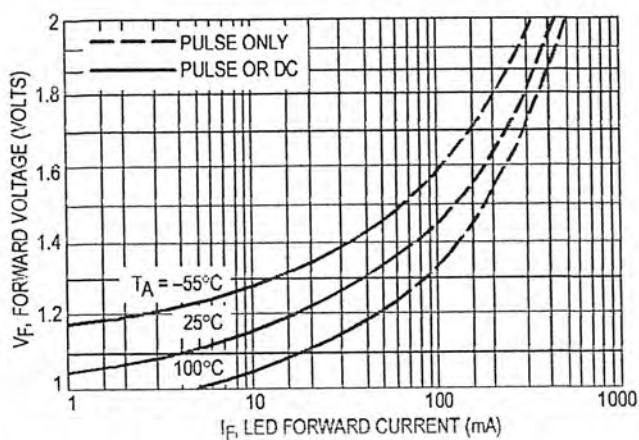


Figure 1. LED Forward Voltage versus Forward Current

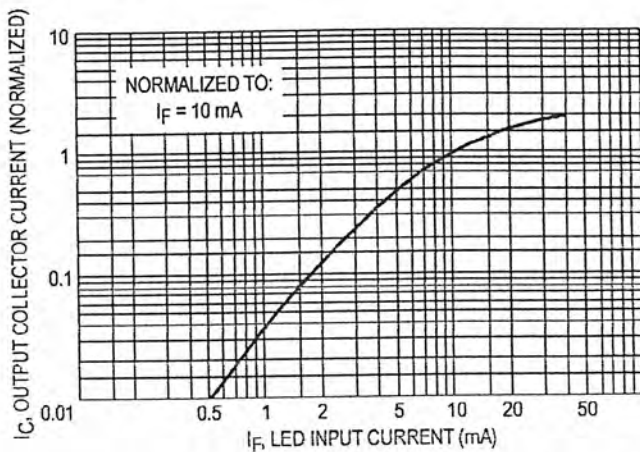


Figure 2. Output Current versus Input Current

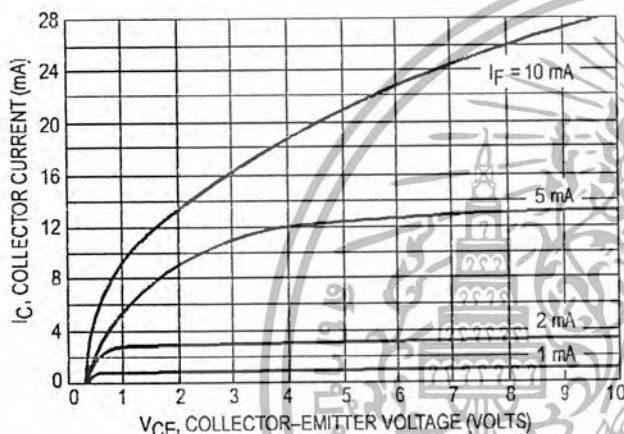


Figure 3. Collector Current versus Collector-Emitter Voltage

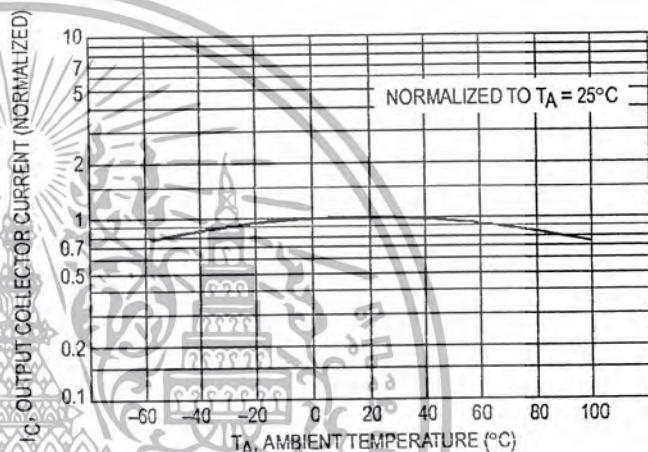


Figure 4. Output Current versus Ambient Temperature

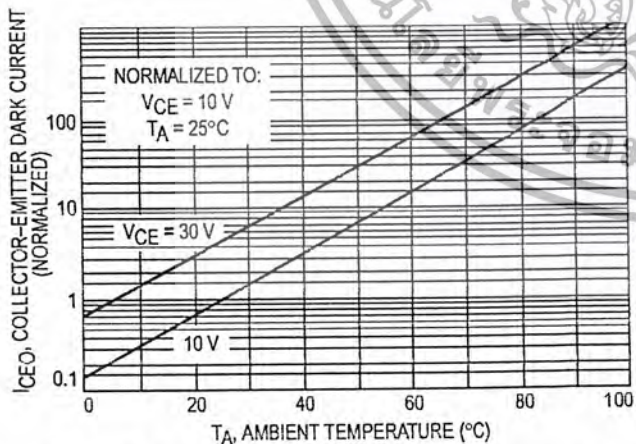


Figure 5. Dark Current versus Ambient Temperature

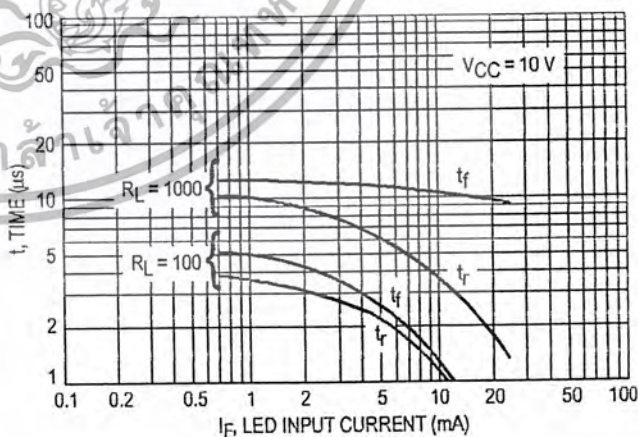


Figure 6. Rise and Fall Times (Typical Values)

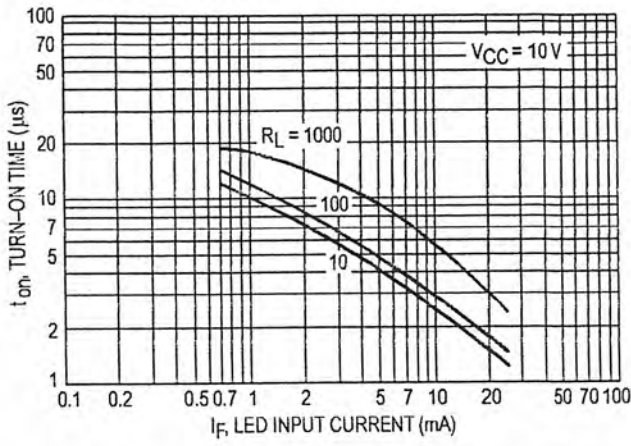


Figure 7. Turn-On Switching Times

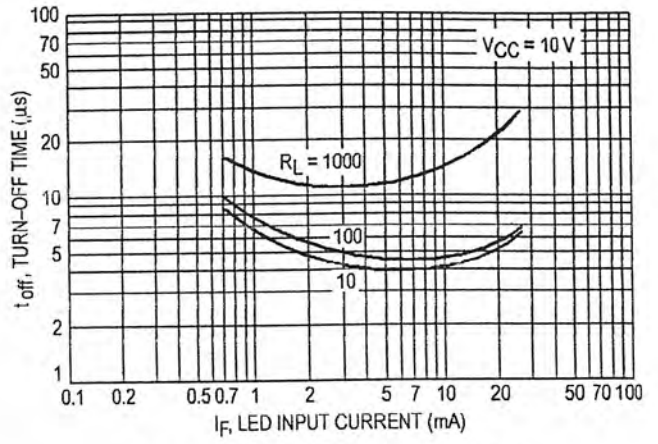


Figure 8. Turn-Off Switching Times

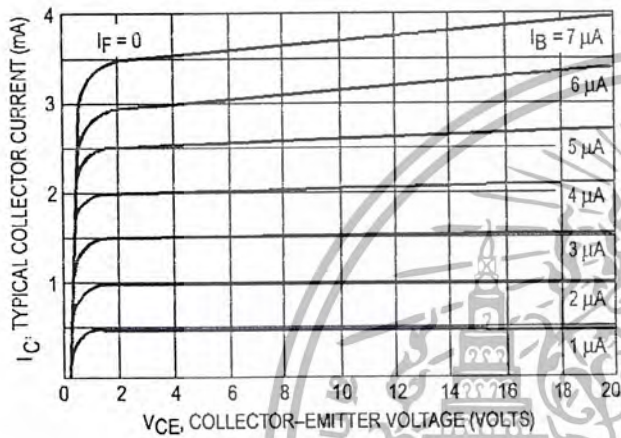


Figure 9. DC Current Gain (Detector Only)

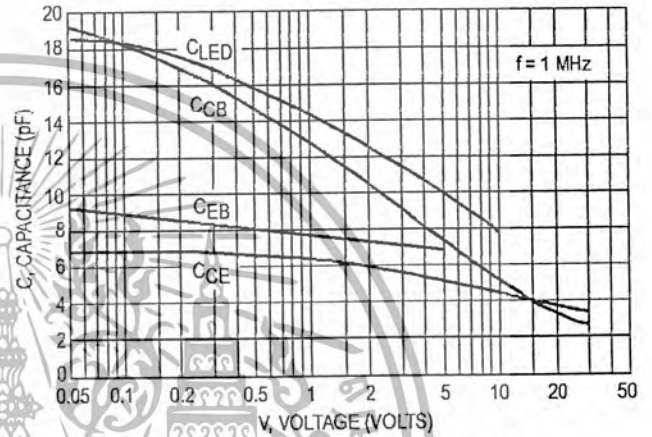


Figure 10. Capacitances versus Voltage

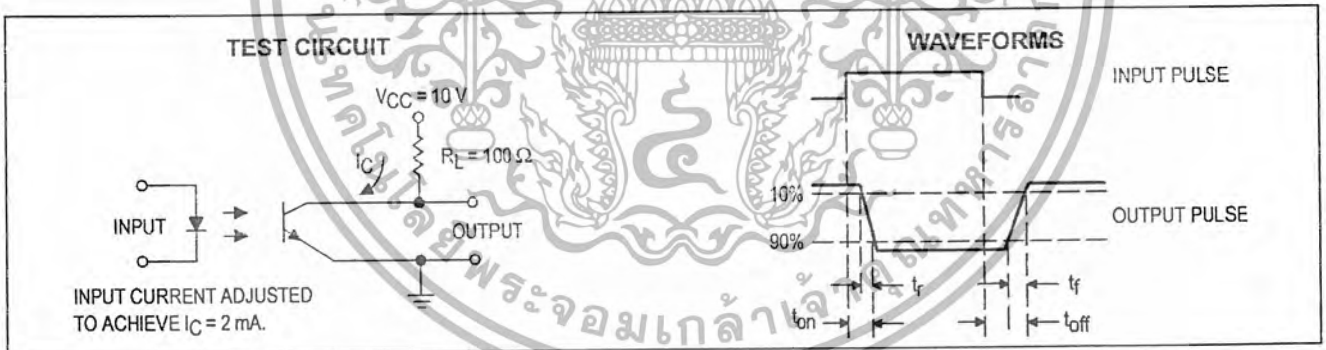


Figure 11. Switching Time Test Circuit and Waveforms

**15 DEVICES COVER MILITARY, INDUSTRIAL,
 AND COMMERCIAL TEMPERATURE RANGES**

- Very Low Power Consumption
- Typical Supply Current . . . 200 μ A (per Amplifier)
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias and Offset Currents
- Common-Mode Input Voltage Range Includes V_{CC+}
- Output Short-Circuit Protection
- High Input impedance . . . JFET-Input Stage
- Internal Frequency Compensation
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate . . . 3.5 V/ μ s Typ

description

The JFET-input operational amplifiers of the TL06_ series are designed as low-power versions of the TL08_ series amplifiers. They feature high input impedance, wide bandwidth, high slew rate, and low input offset and bias currents. The TL06_ series feature the same terminal assignments as the TL07_ and TL08_ series. Each of these JFET-input operational amplifiers incorporates well-matched, high-voltage JFET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The C-suffix devices are characterized for operation from 0°C to 70°C. The I-suffix devices are characterized for operation from -40°C to 85°C, and the M-suffix devices are characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1996, Texas Instruments Incorporated

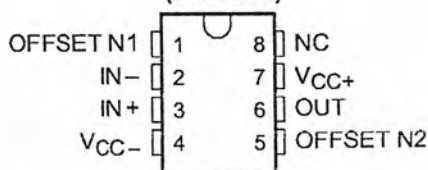
**TEXAS
 INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

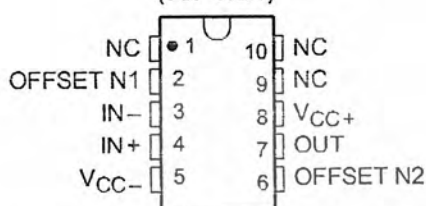
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในองค์กรของบริษัทเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TL061, TL061A, TL061B, TL061Y, TL062, TL062A
 TL062B, TL062Y, TL064, TL064A, TL064B, TL64Y**
LOW-POWER JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS
 SLOS078C - NOVEMBER 1978 - REVISED AUGUST 1996

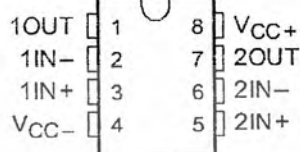
TL061, TL061A, TL061B
D, JG, P, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



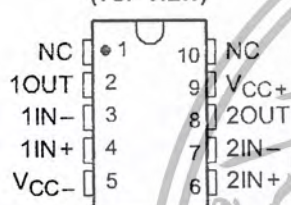
TL061 ... U PACKAGE
(TOP VIEW)



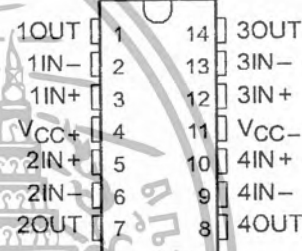
TL062, TL062A, TL062B
D, JG, P, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



TL062 ... U PACKAGE
(TOP VIEW)

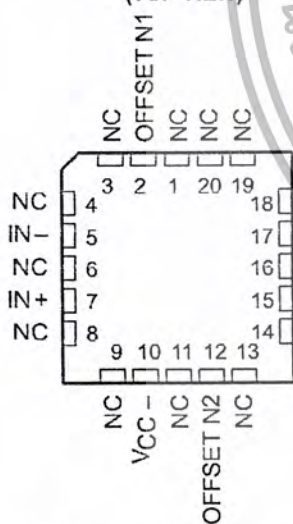


TL064 ... D, J, N, PW, OR W PACKAGE
TL064A, TL064B ... D OR N PACKAGE
(TOP VIEW)

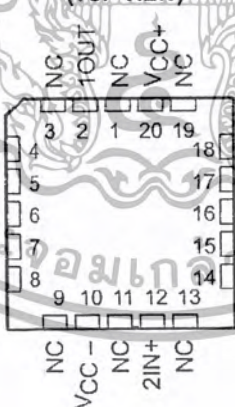


NC - No internal connection

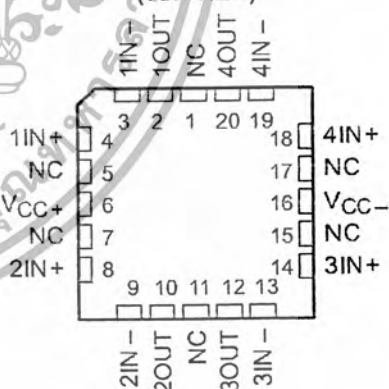
TL061 ... FK PACKAGE
(TOP VIEW)



TL062 ... FK PACKAGE
(TOP VIEW)



TL064 ... FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC - No internal connection



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานภายในบริษัท กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TL061, TL061A, TL061B, TL061Y, TL062, TL062A
TL062B, TL062Y, TL064, TL064A, TL064B, TL64Y
LOW-POWER JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS**
SLOS078C – NOVEMBER 1978 – REVISED AUGUST 1996

AVAILABLE OPTIONS

T _A	V _{IO} max AT 25°C	PACKAGED DEVICES					CHIP FORM (Y)
		SMALL OUTLINE (D008)†	SMALL OUTLINE (D014)†	PLASTIC DIP (N)	PLASTIC DIP (P)	TSSOP (PW)	
0°C to 70°C	15mV 6mV 3mV	TL061CD TL061ACD TL061BCD			TL061CP TL061ACP TL061BCP	TL061CPW	TL061Y
	15mV 6mV 3mV	TL062CD TL062ACD TL062BCD			TL062CP TL062ACP TL062BCP	TL062CPW	TL062Y
	15mV 6mV 3mV		TL064CD TL064ACD TL064BCD	TL064CN TL064ACN TL064BCN		TL064CPW	TL064Y

T _A	V _{IO} max AT 25°C	PACKAGE								
		SMALL OUTLINE (D008)†	SMALL OUTLINE (D014)†	CHIP CARRIER (FK)	CERAMIC DIP (J)	CERAMIC DIP (JG)	PLASTIC DIP (N)	PLASTIC DIP (P)	FLAT PACK (U)	FLAT PACK (W)
-40°C to 85°C	6mV	TL061ID TL062ID	TL064ID				TL064IN	TL061IP TL062IP		
-55°C to 125°C	6mV 6mV 9mV			TL061MFK TL062MFK TL064MFK	TL064MJ	TL061MJG TL062MJG			TL061MU TL062MU	TL064MW

† The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type (e.g., TL061CDR).



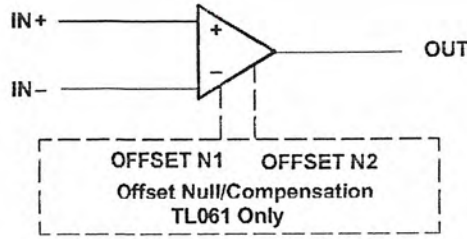
**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

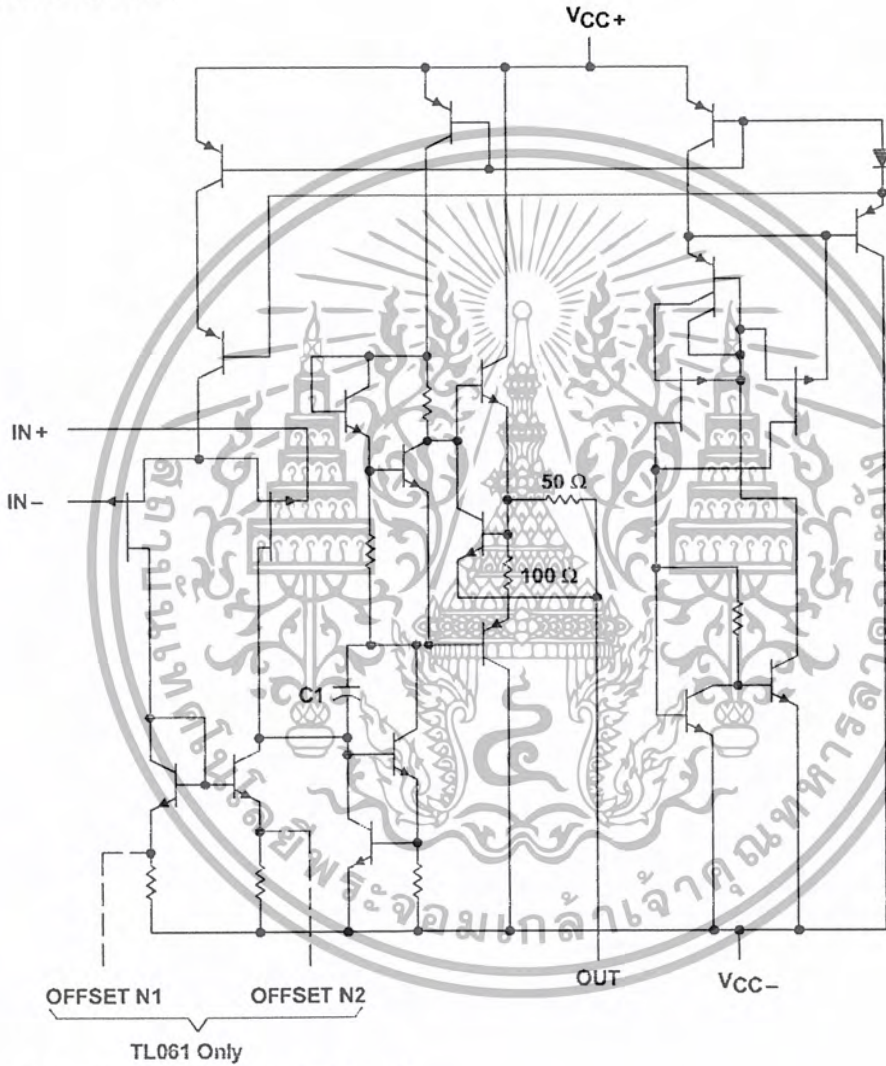
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในสหรัฐอเมริกาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL061, TL061A, TL061B, TL061Y, TL062, TL062A
 TL062B, TL062Y, TL064, TL064A, TL064B, TL64Y
LOW-POWER JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS
 SLOS078C – NOVEMBER 1978 – REVISED AUGUST 1998

symbol (each amplifier)



schematic (each amplifier)



C1 = 10 pF on TL061, TL062, and TL064
 Component values shown are nominal.



**TL061, TL061A, TL061B, TL061Y, TL062, TL062A
TL062B, TL062Y, TL064, TL064A, TL064B, TL64Y**
LOW-POWER JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS
SLOS078C – NOVEMBER 1978 – REVISED AUGUST 1996

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)[†]

	TL06_C TL06_AC TL06_BC	TL06_I	TL06_M	UNIT
Supply voltage, V _{CC+} (see Note 1)	18	18	18	V
Supply voltage, V _{CC-} (see Note 1)	-18	-18	-18	V
Differential input voltage, V _{ID} (see Note 2)	±30	±30	±30	V
Input voltage, V _I (see Notes 1 and 3)	±15	±15	±15	V
Duration of output short circuit (see Note 4)	unlimited	unlimited	unlimited	
Continuous total dissipation	See Dissipation Rating Table			
Operating free-air temperature range	0 to 70	-40 to 85	-55 to 125	°C
Storage temperature range	-65 to 150	-65 to 150	-65 to 150	°C
Case temperature for 60 seconds	FK package		260	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds	J, JG, U, or W package		300	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	D, N, P, or PW package	260	260	°C

[†] Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES: 1. All voltage values except differential voltages are with respect to the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-}.
2. Differential voltages are at IN+ with respect to IN-.
3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 V, whichever is less.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

DISSIPATION RATING TABLE

PACKAGE	T _A ≤ 25°C POWER RATING	DERATING FACTOR	DERATE ABOVE T _A	T _A = 70°C POWER RATING	T _A = 85°C POWER RATING	T _A = 125°C POWER RATING
D (8 pin)	680 mW	5.8 mW/°C	33°C	465 mW	378 mW	N/A
D (14 pin)	680 mW	7.6 mW/°C	60°C	604 mW	490 mW	N/A
FK	680 mW	11.0 mW/°C	88°C	680 mW	680 mW	273 mW
J	680 mW	11.0 mW/°C	88°C	680 mW	680 mW	273 mW
JG	680 mW	8.4 mW/°C	69°C	672 mW	546 mW	210 mW
N	680 mW	9.2 mW/°C	76°C	680 mW	597 mW	N/A
P	680 mW	8.0 mW/°C	65°C	640 mW	520 mW	N/A
PW (8 pin)	525 mW	4.2 mW/°C	25°C	336 mW	N/A	N/A
PW (14 pin)	700 mW	5.6 mW/°C	25°C	448 mW	N/A	N/A
U	675 mW	5.4 mW/°C	25°C	432 mW	351 mW	135 mW
W	680 mW	8.0 mW/°C	65°C	640 mW	520 mW	200 mW



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electrical characteristics, $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†		TL061C TL062C TL064C			TL061AC TL062AC TL064AC			TL061BC TL062BC TL064BC			TL061I TL062I TL064I			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO}	Input offset voltage	$V_O = 0,$ $R_S = 50\ \Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3	15	3	6	2	3	3	6	mV		
			$T_A = \text{Full range}$		20			7.5			5			9	
αV_{IO}	Temperature coefficient of input offset voltage	$V_O = 0,$ $T_A = \text{Full range}$	$R_S = 50\ \Omega,$		10			10			10			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
I_{IO}	Input offset current	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		5	200	5	100	5	100	5	100	pA		
			$T_A = \text{Full range}$		5			3			3			10	
I_{IB}	Input bias current‡	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	400	30	200	30	200	30	200	pA		
			$T_A = \text{Full range}$		10			7			7			20	
V_{ICR}	Common-mode input voltage range	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 11	-12 to 15	± 11	-12 to 15	± 11	-12 to 15	± 11	-12 to 15	± 11	-12 to 15	V		
V_{OM}	Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\ \text{k}\Omega,$ $R_L \geq 10\ \text{k}\Omega,$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		± 10	± 13.5	± 10	± 13.5	± 10	± 13.5	± 10	± 13.5	V		
			$T_A = \text{Full range}$		± 10			± 10			± 10				
A_{VD}	Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10\ \text{V},$ $R_L \geq 10\ \text{k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3	6	4	6	4	6	4	6	V/mV		
			$T_A = \text{Full range}$		3			4			4				
B_1	Unity-gain bandwidth	$R_L = 10\ \text{k}\Omega,$ $T_A = 25^\circ\text{C}$	1			1			1			1			MHz
r_i	Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$	10^{12}			10^{12}			10^{12}			10^{12}			Ω
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin},$ $R_S = 50\ \Omega,$ $V_O = 0,$ $T_A = 25^\circ\text{C}$	70	86	80	86	80	86	80	86	80	86	dB		
kSVR	Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC\pm}/\Delta V_{IO}$)	$V_{CC} = \pm 9\ \text{V to } \pm 15\ \text{V},$ $V_O = 0,$ $R_S = 50\ \Omega,$ $T_A = 25^\circ\text{C}$	70	95	80	95	80	95	80	95	80	95	dB		
P_D	Total power dissipation (each amplifier)	$V_O = 0,$ No load	$T_A = 25^\circ\text{C},$		6	7.5	6	7.5	6	7.5	6	7.5	mW		
I_{CC}	Supply current (each amplifier)	$V_O = 0,$ No load	$T_A = 25^\circ\text{C},$		200	250	200	250	200	250	200	250	μA		
V_{O1}/V_{O2}	Crosstalk attenuation	$A_{VD} = 100,$ $T_A = 25^\circ\text{C}$	120			120			120			120			dB

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. Full range for T_A is 0°C to 70°C for TL06_C, TL06_AC, and TL06_BC and -40°C to 85°C for TL06_I.

‡ Input bias currents of a FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive as shown in Figure 15. Pulse techniques must be used that will maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible.

TL061, TL061A, TL061B, TL061Y, TL062, TL062A
 TL062B, TL062Y, TL064, TL064A, TL064B, TL64Y
LOW-POWER JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS
 SLOS078C – NOVEMBER 1978 – REVISED AUGUST 1996

electrical characteristics, $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†		TL061M TL062M			TL064M			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0,$ $R_S = 50\ \Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = -55^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	3	6		3	9		mV
α_{VIO} Temperature coefficient of input offset voltage	$V_O = 0,$ $T_A = -55^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	$R_S = 50\ \Omega,$	10			10			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
I_{IO} Input offset current	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = -55^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	5	100		5	100		pA
I_{IB} Input bias current‡	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = -55^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	30	200		30	200		pA
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$T_A = 25^\circ\text{C}$		± 11.5	-12 to 15		± 11.5	-12 to 15		V
V_{OM} Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\ \text{k}\Omega,$ $R_L \geq 10\ \text{k}\Omega,$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = -55^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	± 10	± 13.5		± 10	± 13.5		V
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10\ \text{V},$ $R_L \geq 10\ \text{k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = -55^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	4	6		4	6		V/mV
B_1 Unity-gain bandwidth	$R_L = 10\ \text{k}\Omega,$	$T_A = 25^\circ\text{C}$							MHz
r_i Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$			1012			1012		Ω
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin},$ $V_O = 0,$ $T_A = 25^\circ\text{C}$	$R_S = 50\ \Omega,$	80	86		80	86		dB
k_{SVR} Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC\pm}/\Delta V_{IO}$)	$V_{CC} = \pm 9\ \text{V to } \pm 15\ \text{V},$ $R_S = 50\ \Omega,$	$V_O = 0,$ $T_A = 25^\circ\text{C}$	80	95		80	95		dB
P_D Total power dissipation (each amplifier)	$V_O = 0,$ No load	$T_A = 25^\circ\text{C}$		6	7.5		6	7.5	mW
I_{CC} Supply current (each amplifier)	$V_O = 0,$ No load	$T_A = 25^\circ\text{C}$		200	250		200	250	μA
V_{O1}/V_{O2} Crosstalk attenuation	$A_{VD} = 100,$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		120			120		dB

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode voltage unless otherwise specified.

‡ Input bias currents of a FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive as shown in Figure 15. Pulse techniques must be used that maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible.

operating characteristics, $V_{CC\pm} = \pm 15\ \text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
SR Slew rate at unity gain (see Note 5)	$V_I = 10\ \text{V},$ $R_L = 10\ \text{k}\Omega,$ $C_L = 100\ \text{pF},$ See Figure 1	1.5	3.5		V/ μs
t_r Rise time	$V_I = 20\ \text{V},$ $R_L = 10\ \text{k}\Omega,$ $C_L = 100\ \text{pF},$ See Figure 1		0.2		μs
Overshoot factor			10%		
V_n Equivalent input noise voltage	$R_S = 20\ \Omega,$ $f = 1\ \text{kHz}$		42		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

NOTE 5: Slew rate at $-55^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$ is 0.7 V/ μs min.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอกสารอ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TL061, TL061A, TL061B, TL061Y, TL062, TL062A
TL062B, TL062Y, TL064, TL064A, TL064B, TL064Y
LOW-POWER JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS**
SLOS078C – NOVEMBER 1978 – REVISED AUGUST 1996

electrical characteristics, $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITION [†]	TL061Y TL062Y TL064Y			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$		3	15	mV
αV_{IO} Temperature coefficient of input offset voltage	$V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$		10		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
I_{IO} Input offset current	$V_O = 0$		5	200	μA
I_{IB} Input bias current [‡]	$V_O = 0$		30	400	μA
V_{ICR} Common-mode input voltage range		± 11	-12 to 15		V
V_{OM} Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\ \text{k}\Omega$	± 10	± 13.5		V
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10\ \text{V}$, $R_L \geq 2\ \text{k}\Omega$	3	6		V/mV
B_1 Unity-gain bandwidth	$R_L = 10\ \text{k}\Omega$		1		MHz
r_i Input resistance			10^{12}		Ω
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR\min}$, $V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$	70	86		dB
KSVR Supply voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC\pm} / \Delta V_{IO}$)	$V_{CC} = \pm 9\ \text{V}$ to $\pm 15\ \text{V}$, $V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$	70	95		dB
P_D Total power dissipation (each amplifier)	$V_O = 0$, No load		6	7.5	mW
I_{CC} Supply current (per amplifier)	$V_O = 0$, No load		200	250	μA
V_{O1}/V_{O2} Crosstalk attenuation	$A_{VD} = 100$		120		dB

[†] All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode voltage unless otherwise specified.

[‡] Input bias currents of a FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive as shown in Figure 15. Pulse techniques must be used that maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible.

operating characteristics, $V_{CC\pm} = \pm 15\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL061Y TL062Y TL064Y			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
SR Slew rate at unity gain	$V_I = 10\ \text{mV}$, $R_L = 10\ \text{k}\Omega$, $C_L = 100\ \text{pF}$, See Figure 1	1.5	3.5		V/ μs
t_r Rise time	$V_I = 20\ \text{V}$, $R_L = 10\ \text{k}\Omega$, $C_L = 100\ \text{pF}$, See Figure 1		0.2		μs
Overshoot factor			10%		
V_n Equivalent input noise voltage	$R_S = 20\ \Omega$, $f = 1\ \text{kHz}$		42		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในสหรัฐอเมริกาเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้