



ปีการศึกษา 2532

วงจรรักษาบริังสี่เอ็กซ์และการแปลงข้อมูลเป็นเชิงเลขสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะ
(X-RAY SIGNAL DETECTION CIRCUITS AND DATA ACQUISITION FOR CT-SCANNER)

โดย

นาย นพพร โชติภักขร

นาย อาริน แสงอรุณ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศจ.คร. ไพรซ์ วุฒิชัยพงษ์

อ. พลผดุง ผดุงกุล

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2532


เรื่อง วงจรภาครับรังสีเอ็กซ์และการแปลงข้อมูลเป็นเชิง เลขสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะ
(X-RAY DETECTOR CIRCUIT AND DATA ACQUISITION FOR CT-SCANNER)

ผู้จัดทำ

1. นาย นพพร โชติภักดิ์ เลขประจำตัว 29.1092

2. นาย อาริน แสงอรุณ เลขประจำตัว 29.1303


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศจ.ดร. ไพรัช ธิชัยพงษ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. พลผดุง ผดุงกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

026842

วงจรรักษาบริ้งสี เอ็กซ์และระบบการแปลงข้อมูลเป็นเชิง เลข-
สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะ

นายนพพร โชติภักดิ์ รหัส 29.1092

นายอาวิน แสงอรุณ รหัส 29.1303

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร.ไพรัช อึ้งยงษ์

อ.พลผดุง ผดุงกุล

บทคัดย่อ

ปริญญาพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการวิจัยและพัฒนา ส่วนหนึ่งของเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพ
ตัดขวางอวัยวะรุ่นที่ 3 โดยมีเนื้อหาเกี่ยวกับ

- การออกแบบและผลการทดลองของวงจรรักษาบริ้งสัญญาณเอ็กซ์เรย์ ซึ่งประกอบค้วย Pre-amplifier, Multiplexer ,Receiver และส่วนระบบการควบคุมสัญญาณนาฬิกา รวมทั้งได้สร้างแผ่นวงจรต้นแบบขึ้นด้วย
- ส่วนระบบการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล A/D BOARD (DT-2827) โดยได้เขียนโปรแกรมขึ้นควบคุมการทำงาน



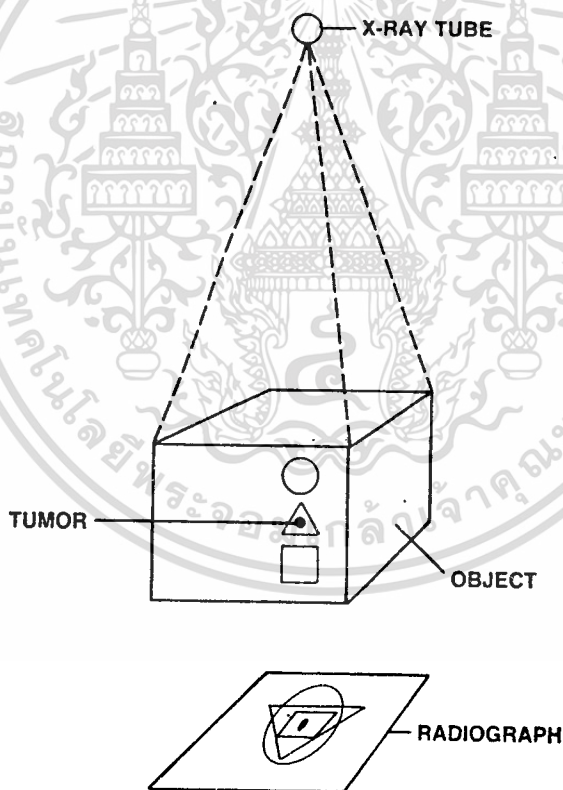
สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1-1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทบทวนวงจรภาครับรังสี เอ็กซ์และส่วนการแปลงข้อมูล.....	2-1
2.1 ส่วนวงจรขยายและมัลติเพล็กซ์.....	2-2
- วงจรทรานส์อิมพีแดนซ์แอมป์.....	2-3
- วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสาม.....	2-4
- วงจรชดเชยความผิดพลาด.....	2-7
- วงจรแซมเปิ้ลแอนด์โฮล.....	2-10
2.2 ส่วนวงจรรีบ.....	2-18
- วงจรแปลงกระแสเป็นโวลเตจแบบดิฟเฟอเรนเชียล.....	2-19
- วงจรขยายปรับค่าได้.....	2-20
- วงจรเลื่อนระดับสัญญาณ.....	2-22
2.3 หน่วยวงจรควบคุม.....	2-23
2.4 ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล.....	2-32
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง.....	3-1
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	4-1
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์.....	5-1
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะ (Computed Tomography) หรือชื่อในทางการค้าว่าเครื่อง เอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ช่วยในการวินิจฉัยของแพทย์ได้มาก โดยทำให้สามารถมองเห็นภาพตัดขวางร่างกายผู้ป่วยในแนวต่าง ๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่ไม่มีในเครื่อง เอ็กซ์เรย์ธรรมดา ทำให้สามารถแก้ไขจุดบอดของเครื่อง เอ็กซ์เรย์ปกติที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของอวัยวะที่ซ้อนกันตามแนวขวางของลำตัวได้ ดังแสดงในภาพ



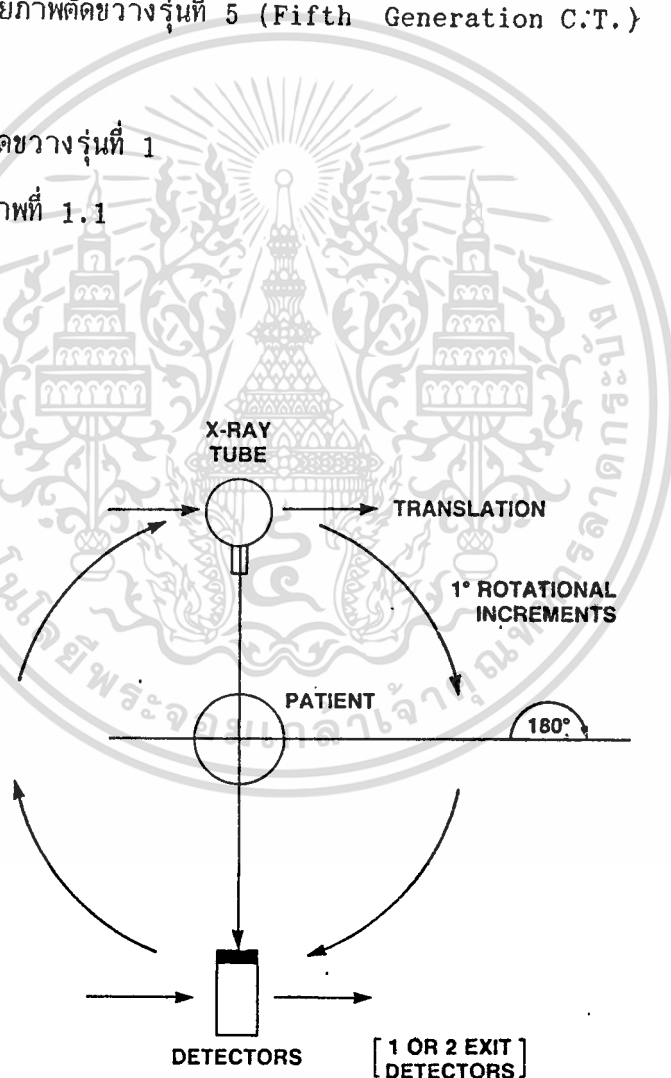
จากภาพจะเห็นได้ว่า ในเครื่องเอ็กซ์เรย์ปกติไม่สามารถมองเห็นสามเหลี่ยม , วงกลม และสี่เหลี่ยม ซึ่งซ้อนกันอยู่นี้ได้ แต่เครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ได้แก้ปัญหานี้ได้อย่างสิ้นเชิง นอกจากนี้เครื่องถ่ายภาพตัดขวางยังให้ความละเอียดของภาพสูงกว่ามาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปสามารถแยกประเภทของเครื่องถ่ายภาพตัดขวางออกได้ ตามลักษณะตัวรับสัญญาณและรูปแบบการสแกน ได้เป็น 5 ประเภท คือ

- 1.1) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 1 (First Generation C.T.)
- 1.2) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 2 (Second Generation C.T.)
- 1.3) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 3 (Third Generation C.T.)
- 1.4) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 4 (Forth Generation C.T.)
- 1.5) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 5 (Fifth Generation C.T.)

1.1) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 1

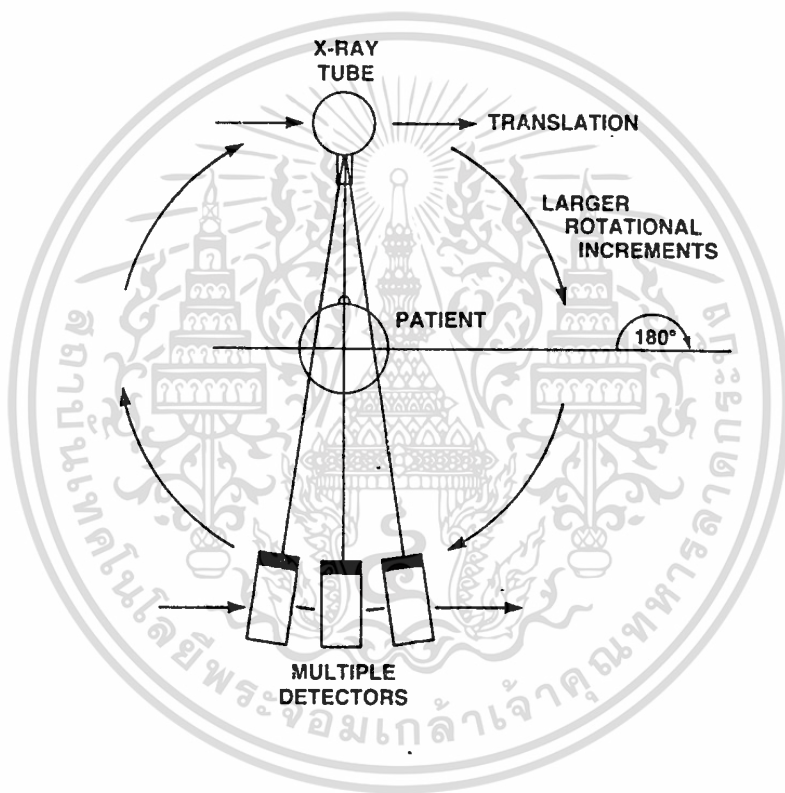
มีโครงสร้างดังภาพที่ 1.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 1.1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 2 ในการสร้างภาพ หลอดรังสีเอ็กซ์จะ เคลื่อนที่ไปพร้อมกับ หัววัดรังสี โดยมีการสแกนทั้งในแนว เส้นตรงและสแกนแบบหมุน โดยระบบนี้จะใช้หัววัดรังสี ตัวเดียว และลำรังสีเอ็กซ์เป็นเส้นตรง เดี่ยว

1.2) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 2



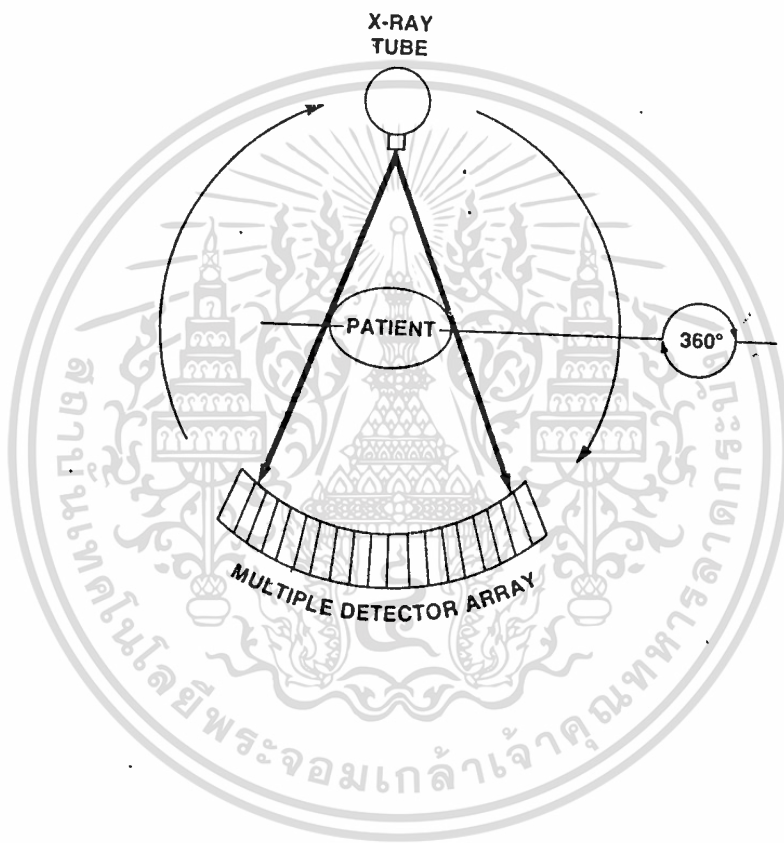
ภาพที่ 1.2

านรุ่นที่ 2 นี้ ลักษณะการสแกนจะเป็นเช่นเดียวกับานรุ่นที่ 1 แต่เพิ่มจำนวนหัววัดจาก 1 ตัว เป็น 30-50 ตัว และลำรังสีเอ็กซ์จะปล่อยออกมาเป็นแถบตรง ทำให้เวลาที่ใช้ในการสแกนน้อยลงกว่าแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 3

เป็นเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง รุ่นที่ทำการวิจัยและพัฒนาในปริญานิพนธ์ฉบับนี้ มีโครงสร้างดังภาพที่ 1.3

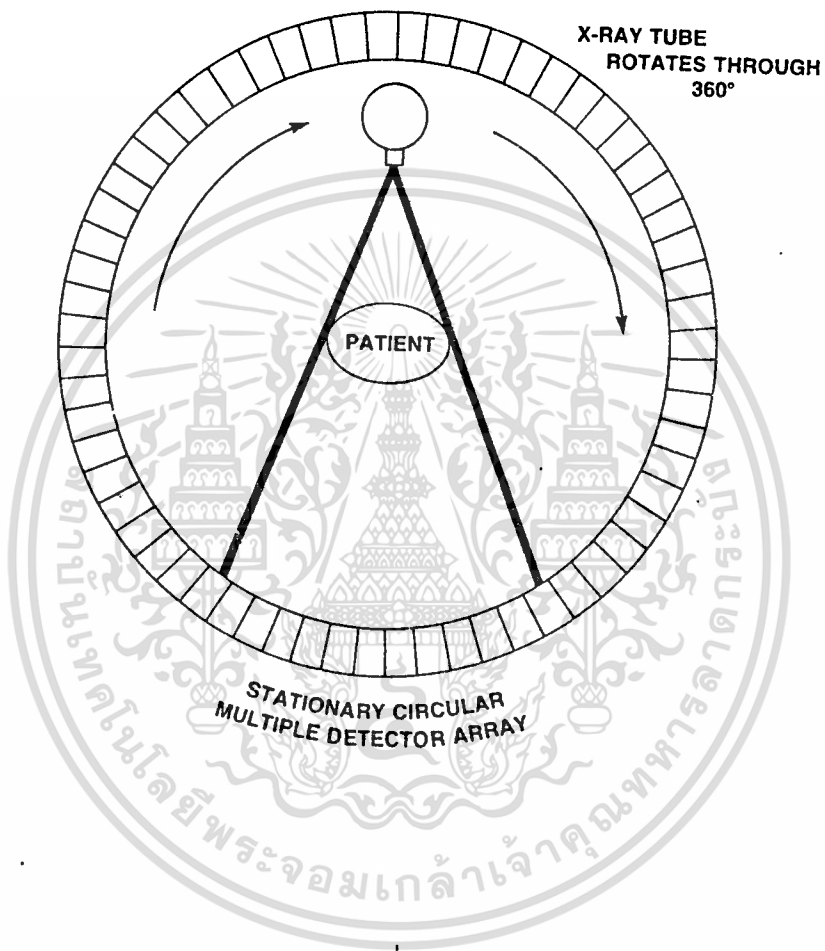


ภาพที่ 1.3

ในรุ่นนี้ ลำรังสีเอ็กซ์จะมีลักษณะเป็นลำแบบกระจายออก (Fan Beam) มีความกว้างประมาณ 30-50 องศา เป็นรุ่นแรกที่ไม่มีการสแกนตามแนวเส้นตรง โดยมีการสแกนแบบหมุนอย่างเดียว ทำให้เวลาในการสแกนลดลงไปอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 4



ภาพที่ 1.4

จากภาพที่ 1.4) หัววัดรังสีจะติดตั้งอยู่โดยรอบตัวหมุน (มากกว่า 600 ตัว) โดยในการสแกนจะให้หลอดรังสีเอ็กซ์เคลื่อนที่แต่เพียงอย่างเดียว ใช้เวลาในการสแกนน้อยลงไปอีก

1.5) เครื่องถ่ายภาพตัดขวางรุ่นที่ 5

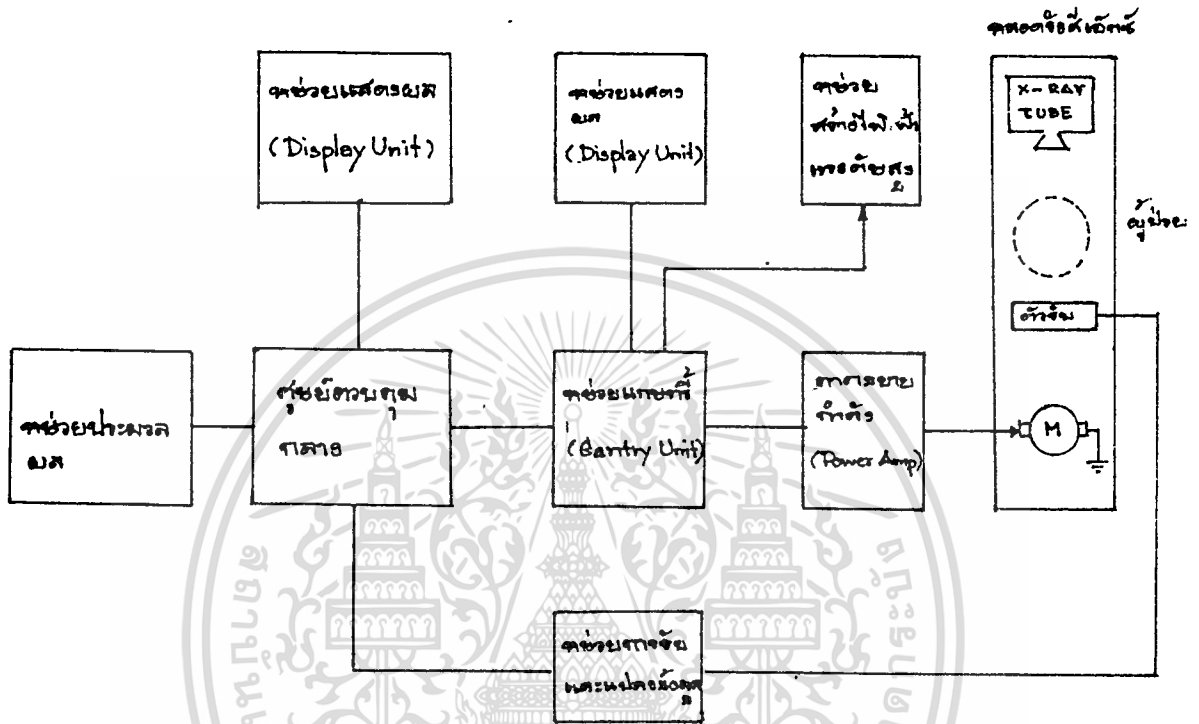
เป็นรุ่นที่ทันสมัยที่มากในปัจจุบัน และเป็นรุ่นเดียวที่ไม่มีส่วนประกอบใดเคลื่อนที่เลยใน

การสแกน โดยการเรียงหัววัดรังสีไว้โดยรอบตัวหมุนเช่นเดียวกับรุ่นที่ 4 และใช้หลอดรังสี

เอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าหลายตัว วางในตำแหน่งที่สามารถฉายผู้ป่วยได้โดยรอบ ทว่าใช้เวลาในการสแกนสั้นมาก ไม่วุ่นวายใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของระบบ

ประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ในภาพที่ 1.5

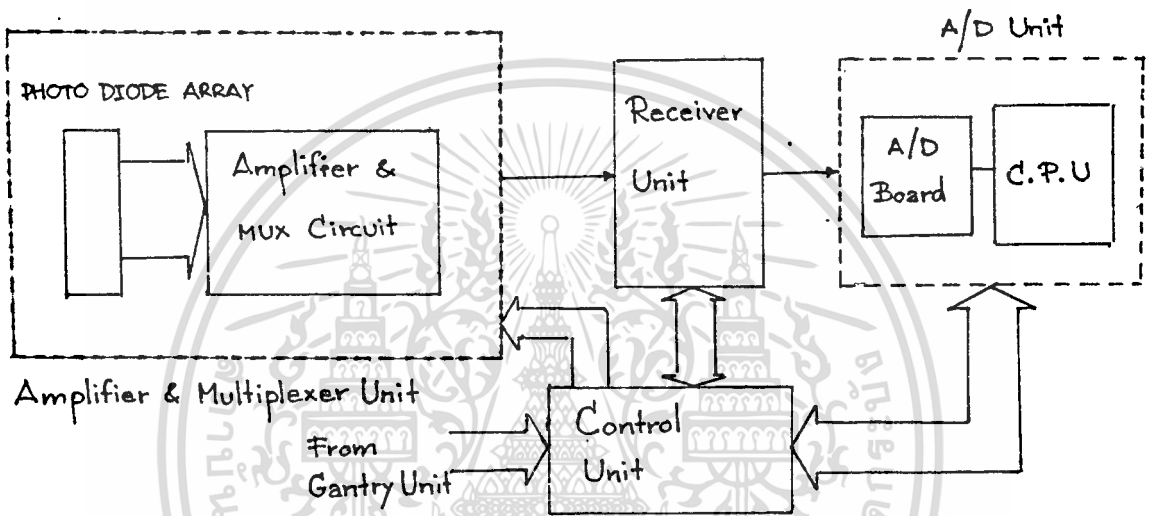


ภาพที่ 1.5

ในส่วนของบริษัทนี้ จะกล่าวถึง เฉพาะส่วนวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ ส่วนการรับและแปลงข้อมูลจากอนาล็อกเป็นข้อมูลเชิงเลข

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทํางานของวงจรรีบรับรังสีเอ็กซ์และส่วนการแปลงข้อมูล



ภาพแสดงโครงสร้างของระบบรับและจัดเก็บข้อมูล

ระบบประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

2.1 ส่วนวงจขยายและมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (Amplifier and Multiplexer Unit)

2.2 ส่วนวงจรับ (Receiver Unit)

2.3 ส่วนวงจควบคุม (Control Unit)

2.4 ส่วนแปลงสัญญาณเป็นเชิงเลข (A/D Converter Unit)

2.1 ส่วนวงจขยายและมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

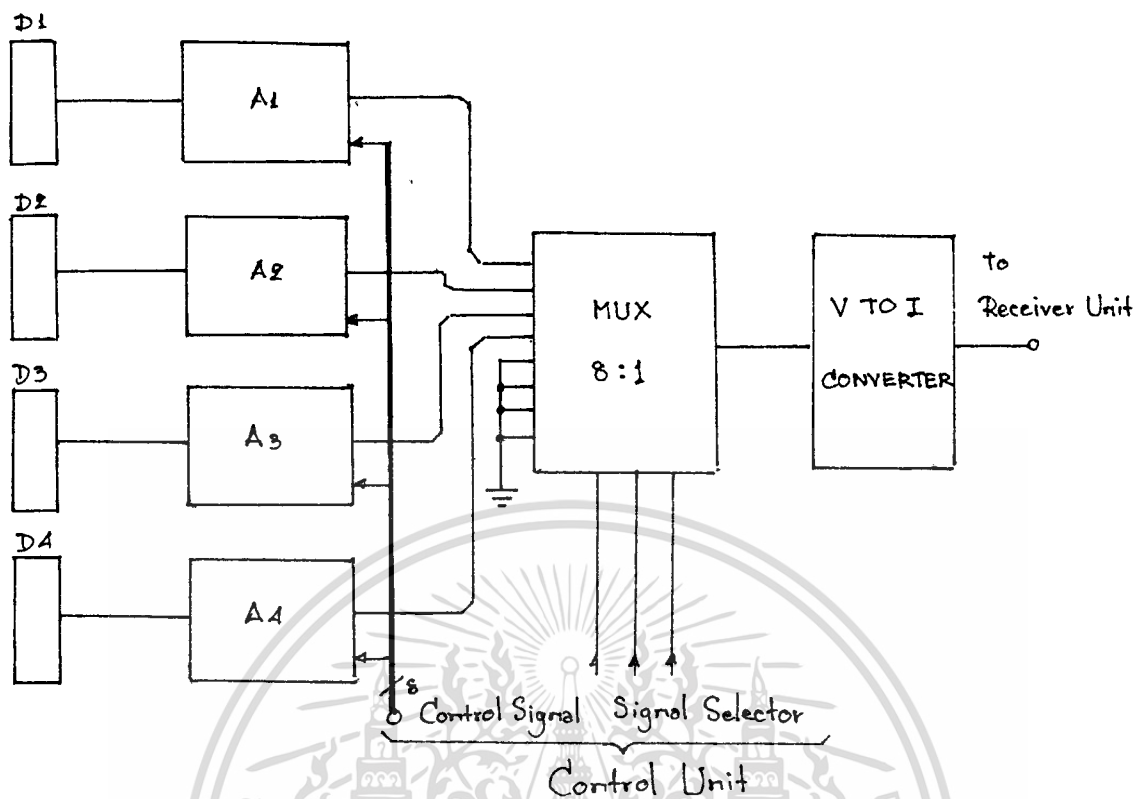
เป็นภาครับสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด (Photo Diode) ซึ่งแปรตามความเข้มรังสีเอ็กซ์เรย์ที่ตกกระทบ. เพื่อทำการขยายและจัดการข้อมูล โดยส่วนประกอบทั้งหมดของภาคจะอยู่

บน Amplifier & Multiplexer Circuit Board (AMC-Board) ซึ่งมีส่วนประกอบภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ในดังภาพ ที่ 2.1.1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1.1 ส่วนประกอบภายในของ AMC Board

สำหรับระบบเบื้องต้น ได้ออกแบบให้ใช้โฟโตไดโอดอาร์เรย์ (Photo Diode Array) จำนวน 128 ตัว โดยแบ่งเป็นแผ่นวงจร 32 แผ่น จะมีตัวดีเทคเตอร์อยู่บนแผ่นวงจร แผ่นละ 4 ตัว

จากบล็อกไดอะแกรม ในแต่ละบอร์ดจะประกอบไปด้วย

- 2.1.1 วงจรภาครับและขยายสัญญาณรังสีเอ็กซ์ (Detector & X-Ray Amplifier Cct.)
- 2.1.2 วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (Multiplexer Circuit)
- 2.1.3 วงจรแปลงสัญญาณโวลเตจเป็นกระแส (V to I Converter)

2.1.1 วงจรภาครับและขยายสัญญาณรังสีเอ็กซ์

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่ง เครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะ ตามลักษณะการปล่อยรังสีออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

ก) แบบต่อเนื่อง (Continuous radiation)

เป็นแบบที่ใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ ที่ปล่อยรังสีออกมาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ทำการ

เอกซเรย์ มีข้อดีในแง่อุปกรณ์ควบคุมรังสีเอ็กซ์ ไม่ยุ่งยาก แต่จะทำให้ผู้ป่วยได้รับรังสีเอ็กซ์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

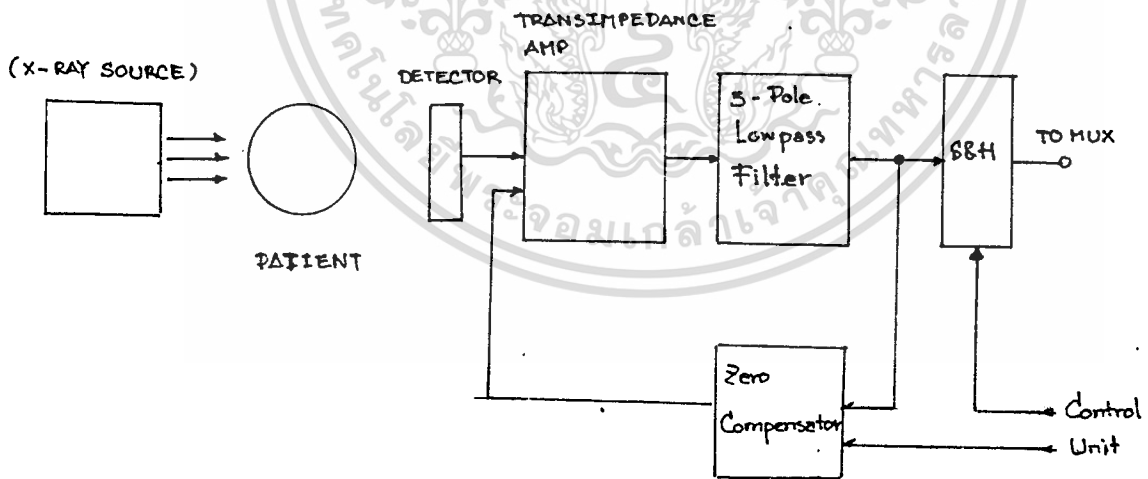
มากกว่าแบบ ข

ข) แบบเป็นช่วง ๆ (Pulse - Radiation)

เป็นแบบที่ทันสมัยกว่าแบบที่ 1 โดยจะทำการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ออกมาเป็นช่วง ๆ เฉพาะตำแหน่งที่จะทำการเก็บข้อมูล จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ปิดเปิดรังสีเอ็กซ์ที่มีประสิทธิภาพ แต่มีข้อดีคือผู้ป่วยได้รับรังสีในปริมาณที่ต่ำ ทากัณฑ์ผลข้างเคียงที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ลดน้อยลง

และโดยลักษณะการปล่อยรังสีที่แตกต่างกันนี้ ทากัณฑ์วงจรตรวจวัดและขยายสัญญาณที่ใช้นั้น แต่ละกรณีแตกต่างกันไปด้วย ในส่วนของรายงานฉบับนี้ จะได้กล่าวถึง เฉพาะวงจรถ่ายที่ใช้นั้น สำหรับแบบ ก) เนื่องจากมีความเหมาะสมกับอุปกรณ์เอ็กซ์เรย์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ส่วนวงจรถ่ายที่ใช้นั้น ผู้สนใจสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [2] ซึ่งเป็นรายงานการวิจัยที่ผู้จัดทำได้ทำไว้เช่นกัน

วงจรถ่ายรับและขยายรังสีเอ็กซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-Ray detector cct.) ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังบล็๊อคไดอะแกรมภาพที่ 2.1.2

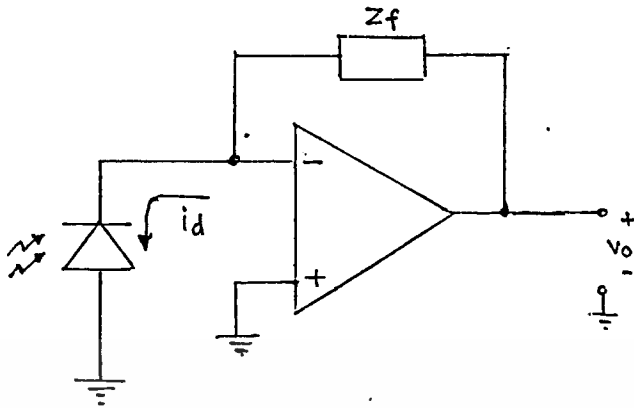


ภาพที่ 2.1.2

โดยมีรายละเอียดของวงจรถ่ายดังนี้

1) วงจรถ่ายรับสัญญาณที่แอมป์ (Transimpedance Amp.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หรือวงจร I to V Converter แสดงได้ดังภาพที่ 2.1.3 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1.3

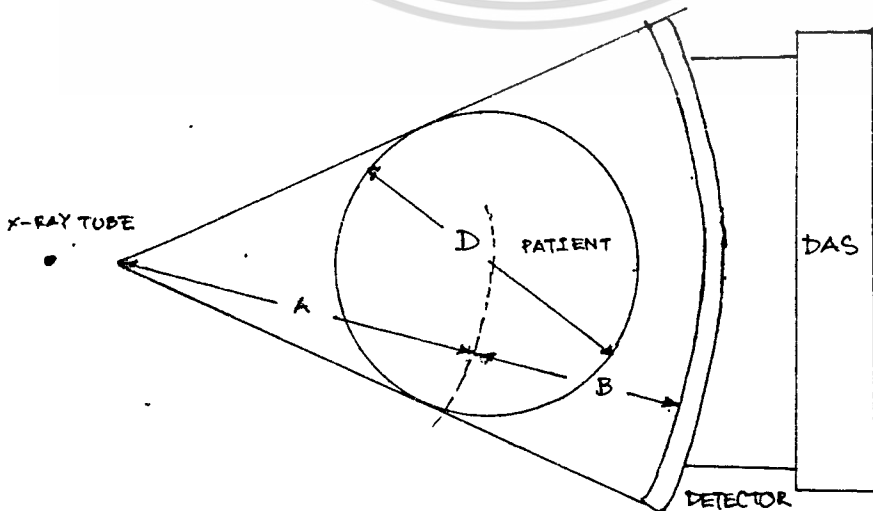
จากภาพ i_d คือกระแสอันเกิดจากรังสีเอ็กซ์เรย์ ตกกระทบบ Photo Diode โดยมีขนาดแปรผันตามความเข้มรังสีที่ตกกระทบบ โดยมีความสัมพันธ์กับ Output ดังสมการ 2.1.1)

$$V_o/i_d = Z_f \quad \text{2.1.1)}$$

กรณี Z_f เป็นรีซิสแตนซ์ ค่ายิ่งมากจะยิ่งทำให้ S/N มีค่ามากขึ้น ตรวจจับที่ดียังไม่มีผลต่อเสถียรภาพของวงจร

2) 3-Pole Lowpass Filter

สัญญาณที่เกิดขึ้นขณะ เครื่องถ่ายภาพตัดขวางทางการแพทย์ มีความถี่ที่ปรากฏขึ้นกับค่าต่าง ๆ ซึ่งได้รับการออกแบบมาสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะ ในแต่ละรุ่นหรือบริษัท



ภาพที่ 2.1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพ จะสามารถหาค่าแบนด์วิดธ์ของสัญญาณ (Signal Bandwidth) ได้จากสมการ

$$F_t = (F_g) (\pi D/T_s) \quad 2.1.2$$

โดยที่ F_t = Temporal frequency (Hz.)

F_s = Spatial frequency (cycle/mm.)

$$= 1/2(\text{pixel resolutions})$$

T_s = เวลาสำหรับ 1 resolution (sec.)

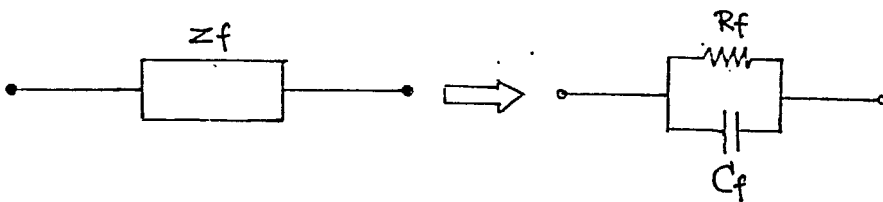
D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนทรี (cm.)

ดังนั้นวงจรที่ขยายสัญญาณจึงควรมี แบนด์วิดธ์เท่ากับ F_t เพื่อกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการทิ้งไป โดยการใช่วงจรกรองความถี่ต่ำ และกำหนดความถี่คutoffให้เท่ากับ F_t

ในการเลือกใช่วงจรกรองความถี่ พบว่าการใช้บัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth Approximation) ให้ผลดีที่สุดต่อระบบ เนื่องจากอัตราขยายราบเรียบที่สุดที่ตีซี (Maximally flat) ทำให้อัตราขยายตลอดย่านความถี่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด แต่เนื่องจากความชันในการลดลงของเกณฑ์ความถี่คutoffค่อนข้างต่ำ จึงใช่วงจรกรองความถี่อันดับ 3 (3-pole lowpass filter) เพื่อให้ขจัดความถี่ที่ไม่ต้องการได้ดีขึ้น สำหรับสมการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ของวงจรถองความถี่ต่ำดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

$$G(s) = 1/(s+1)(s^2+s+1) \quad 2.1.3$$

ในการสังเคราะห์วงจรได้เลือกเอาค่าคาสเคดวงจรถองความถี่ต่ำสองวงจร ซึ่งมีอันดับ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยวงจรอันดับ 1 ใช่วงจร I to V Converter ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยแทน Z_f ด้วย R_f และ C_f ขนานกันดังภาพ 2.1.5



ทำให้ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันขึ้นกับความถี่ ดังสมการ

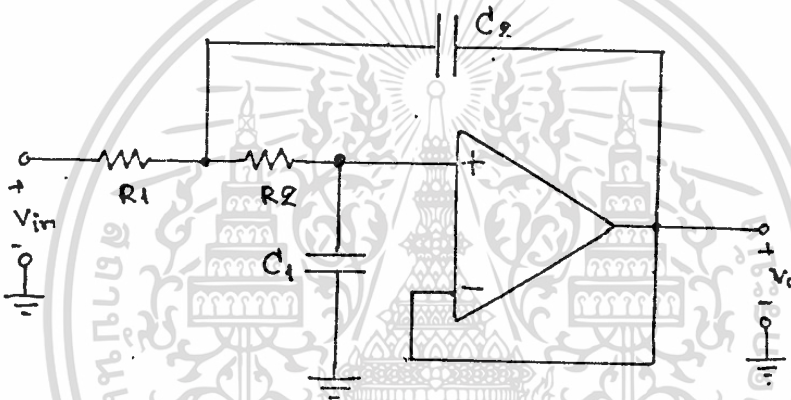
$$V_o/i_d = R_f/(1+sR_fC_f) \quad 2.1.4)$$

ที่ความถี่นอร์มัลไลซ์ (Normalize Frequency) $\omega_o = 1$

ฉะนั้น $R_f = 1/C_f$

โดยที่ R_f เป็นตัวกำหนดอัตราขยายที่ ดีซี

ในส่วนของวงจรอันดับที่ 2 ซึ่งใช้สังเคราะห์เทอม $1/(s^2+s+1)$ เป็นวงจร Sallen & Key (Design I) ดังภาพที่ 2.1.6



ภาพที่ 2.1.6

โดยกำหนดให้อุปกรณ์ต่าง ๆ มีค่าดังนี้

$$R1 = R2 = 1$$

$$C1 = 1/(2\omega_p Q_p)$$

$$C2 = 2Q_p/\omega_p$$

ซึ่งการกำหนดค่าเหล่านี้ รวมทั้งการให้อัตราขยายของออปแอมป์เท่ากับ 1 ทำให้วงจรนี้ มีความไว (Sensitivity) ต่ออุปกรณ์พาสซีฟ (Passive) ซึ่งมีผลสำคัญที่ความถี่ค่า มีค่าต่ำ ที่สุดและจากสมการ $1/(s^2+s+1)$ เทียบกับสมการมาตรฐานคือ $1/(s^2+(\omega_p/Q_p)s+\omega_p^2)$

พบว่า $\omega_p = 1$ และ $Q_p = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

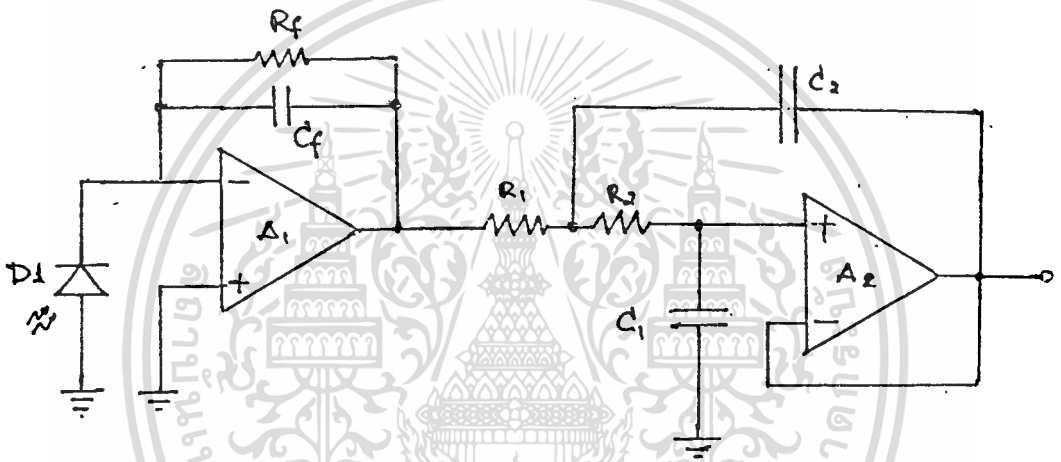
ดังนั้น $R1 = R2 = 1 \ \Omega$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C1 = 1/2 \text{ ฟารัด (F)}$$

$$C2 = 2 \text{ ฟารัด}$$

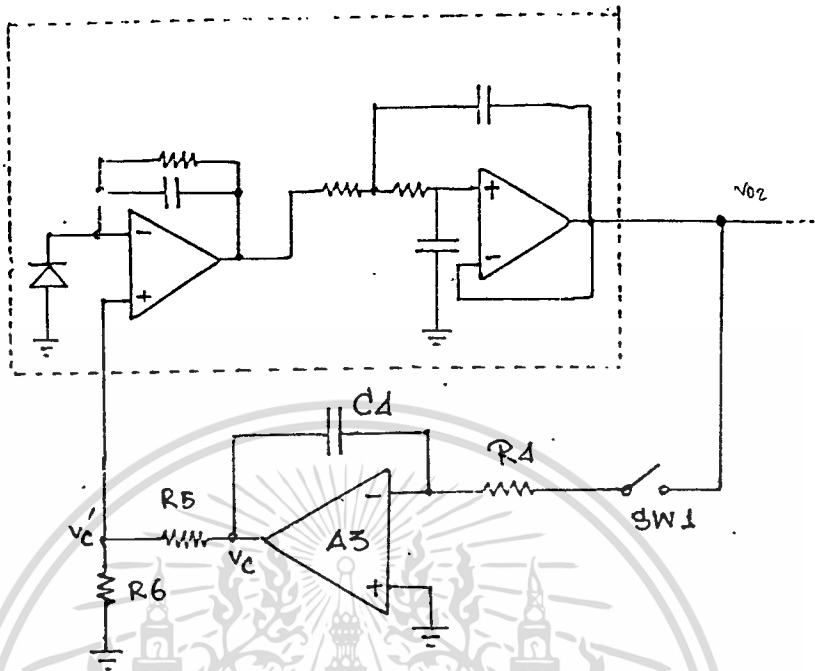
เมื่อนำเอาวงจรทั้งสองมาคาส่กัน ก็จะได้วงจรที่มีคุณสมบัติตามต้องการ โดยจะต้องทำการแปลงอัตราส่วนทางความถี่ (Frequency Scaling) เพื่อให้ได้ความถี่คutoff ที่พ้าน และทำการแปลงอัตราส่วนค่าอุปกรณ์ (RC Scaling) เพื่อให้ได้ค่า R,C ที่เหมาะสมทางปฏิบัติ



ภาพที่ 2.1.7 แสดงวงจรที่สมบูรณ์ของ 3-Pole LP Filter

3) วงจรชดเชยความผิดพลาด (Zero Compensator Circuit)

โดยเหตุที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรขยายและกรองความถี่ มีค่าออฟเซตต่าง ๆ เกิดขึ้นเสมอทั้งกระแสและโวลเตจ ประกอบกับตัวโฟโตรีโอดซึ่งมีกระแสจนวนหนึ่งที่เกิดขึ้นแม้ไม่มีแสงตกกระทบ (Dark Current) เมื่อผ่านวงจรที่มีอัตราขยายสูง ทำให้มีขนาดของสัญญาณที่มีนัยสำคัญ อันอาจทำให้ข้อมูลคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีวงจรชดเชยผลของออฟเซตต่าง ๆ เหล่านี้ ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2.1.8



ภาพที่ 2.1.8

จากภาพ V_{02} เป็นโวลเตจ ณ จุดเอ๊าท์พุทอันเนื่องมาจากออปเซตต่าง ๆ ภาพในวงจร ส่วนขยายและกรองสัญญาณ ซึ่ง V_{02} นี้จะถูกส่งผ่าน SW1 (ซึ่งจะ "ON" ในช่วงการชดเชยนี้) ไปเป็นอินพุทของวงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator) อันประกอบด้วย A3, R4 และ C4 ซึ่งสามารถแสดงได้ว่า

$$\Delta V_c \Big|_{t_0} = (-1/RC)V_{02} \Big|_{t_0} \Delta t \quad 2.1.5$$

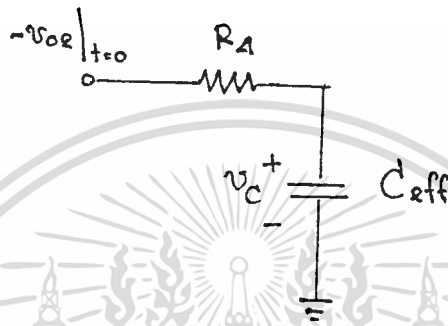
ค่า V_c นี้จะถูกส่งผ่านวงจรแบ่งโวลเตจ R5 และ R6

ฉะนั้น
$$V'_c = (V_c / (R5+R6)) * R6 \quad 2.1.6$$

V_c นี้จะต่อเข้ากับจุดนอนอินเวอร์ตติ้ง (Noninverting) ของวงจรแปลงกระแสเป็น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โวลเตจ คั่น ณ เวลาใด ๆ จะได้ว่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(-v_{o2}|_{t=0} - v_c')/R4 = C4 * (dv_c/dt) \quad 2.1.7)$$

ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่ามีรูปสมการเช่นเดียวกับวงจร RC ดังภาพที่ 2.1.9



ภาพที่ 2.1.9

โดยที่
จะนั้น

$$C_{eff} = C4(R5+R6)/R6$$

$$v_c = v_{o2}|_{t=0} (1 - e^{(-t/R4C_{eff})})$$

ที่อนันต์ v_c จะเท่ากับ $v_{o2}|_{t=0}$ นั่นคือ

$$v_{o2} = 0$$

อันแสดงว่าออฟเซตได้ถูกชดเชยอย่างสมบูรณ์แล้ว สำหรับในทางปฏิบัติในทางองเดียว
กับวงจร RC ช่างต้นในภาพที่ จะถือว่าวงจรได้เข้าสู่ภาวะคงตัวที่ 3RC

กำหนดให้

t_c = เวลาที่ใช้ในการชดเชยความผิดพลาด

$$t_c = 3R * C_{eff}$$

$$= (3R4 * C4)(R5+R6)/R6$$

ส่วนเหตุผลของการใส่วงจรแบ่งโวลเตจ $R5, R6$ ก็เพื่อลดผลการคายประจุของคาปาซิ-

เตอร์ $C4$ ซึ่งจะทำให้วงจรคลาดเคลื่อนน้อยลง ผลอันนี้สามารถเห็นผลได้ชัดเจนจากค่า C_{eff}

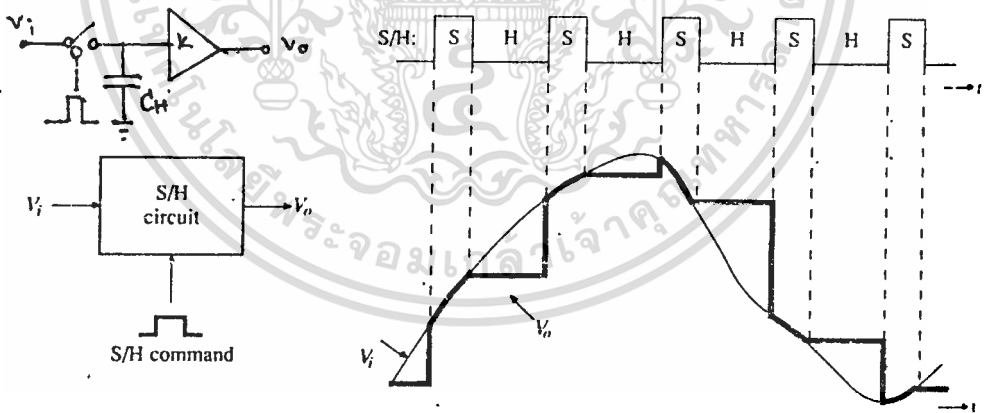
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมากกว่า C_4 เท่ากับ $(R_5+R_6) \cdot 1/R_6$ เท่า ดังนั้นเทอม $(R_5+R_6) \cdot 1/R_6$ ควรจะมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยต้องคำนึงถึงโวลเตจสูงสุดของออปแอมป์ A3 และค่าออฟเซตสูงสุดที่เป็นได้ของระบบด้วย

สำหรับสัญญาณที่ใช้ควบคุมการปิด-เปิดของอนาล็อกสวิตช์ (Analog Switch) SW1 จะถูกส่งออกมาจากหน่วยวงจรควบคุม

4) วงจรจับและพักสัญญาณ (Sample & Hold Circuit, S/H)

วงจรมีหน้าที่รับค่าสัญญาณอินพุต เมื่อได้รับสัญญาณควบคุมมาให้แซมปลิง (Sampling) และพักค่าสุดท้ายไว้หลังจากได้รับสัญญาณควบคุมมาให้โฮลด์ (Hold) จนกว่าสัญญาณแซมปลิงครั้งต่อไปจะเกิดขึ้น บล็อกไดอะแกรมและผลการตอบสนองกรณีอุดมคติของวงจรแซมเปิลแอนด์โฮลด์ แสดงไว้ดังภาพที่ 2.1.10

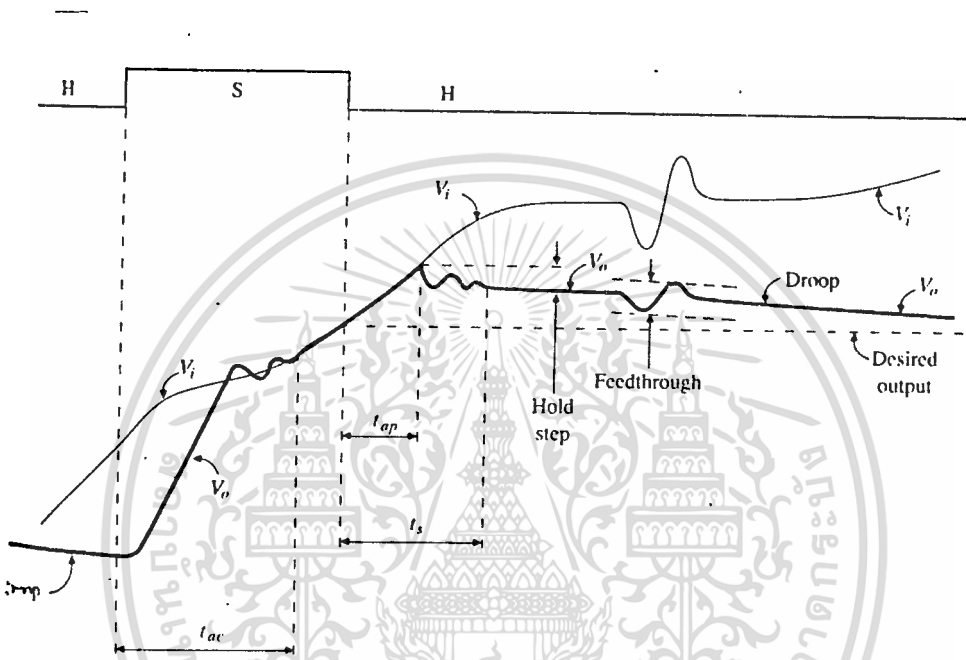


ภาพที่ 2.1.10

ก) บล็อกไดอะแกรมและวงจรพื้นฐาน ข) ผลการตอบสนองกรณีอุดมคติ

เมื่ออยู่ในแซมเปิลโหมด (Sample Mode) วงจรแซมเปิลแอนด์โฮลด์จะทำงานเหมือนเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วงจรขยายตัวหนึ่ง เพียงแต่มีการตอบสนองที่ช้าลงอันเนื่องมาจากคาปาซิเตอร์ C_H ส่วนในไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการเปลี่ยนแปลงจากการแอมป์เป็นโวลต์หรือกลับกัน คุณสมบัติของวงจรจะเป็นตัวกำหนดการตอบสนองในช่วงเวลาดังกล่าว เช่น เวลาในการเข้าถึง (Acquisition Time) , เวลาอเพอเจอร์ (Aperture Time) ฯลฯ ดังจะกล่าวในรายละเอียดถึงคุณสมบัติของแต่ละค่าโดยอ้างอิงตามภาพที่ 2.1.11



ภาพที่ 2.1.11

ค่าเวลาการเข้าถึง (Acquisition Time, t_{ac}) เมื่อมีสัญญาณแอมป์เข้ามา V_o จะเริ่มเปลี่ยนค่าไปสู่ V_i หลังจากได้รับคำสั่งแอมป์ ค่าเวลานี้ขึ้นอยู่กับเวลาหน่วง (Delay Time) อันเกิดจากวงจรขับสวิตช์และตัวสวิตช์เอง รวมทั้งอัตราการใช้ของออปแอมป์

นอกจากนี้ค่าเวลา t_{ac} ยังเพิ่มขึ้นตามขนาดของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นด้วย ปกติค่า t จะระบุตามโวลต์เตจที่เพิ่มขึ้น 10 โวลต์ และช่วงความผิดพลาดที่ยอมรับ (Error Band) 1%, 0.1% และ 0.01% แล้วแต่กรณี โดยช่วงเวลานี้ต้องเสร็จสิ้นก่อนที่สวิตช์จะเปลี่ยนไปเป็นโวลต์โหมด

ค่าเวลาอเพอเจอร์ (Aperture Time, t_a) เมื่อสวิตช์เปลี่ยนไปอยู่ในช่วงการโวลต์ โดยเหตุที่มีช่วงเวลาหน่วงในวงจรขับสวิตช์เอง ทว่าที่ V_o ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงไปตาม V_i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานที่อาจารย์ทุกท่าน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เช่นเดียวกับในช่วงเวลาการแอมป์อยู่เป็นระยะเวลาหนึ่ง เรียกว่า เวลาอเพอเจอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเวลาความไม่แน่นอนอเพเจอร์ (Aperture Uncertainty, Δt_{ap}) เป็นค่าที่แสดงถึงความไม่แน่นอนในค่า t_{ap} ในแต่ละการคาบการทำงาน โดยปกติค่า t มีขนาดน้อยกว่า t_{ap} ประมาณหนึ่งเท่าตัว

ค่าเวลาเข้าสู่ภาวะคงที่ในโฮลโหมด (Hold Mode Settling Time, t_s) เป็นช่วงเวลาที่ใช้นับจากจุดเปลี่ยนโหมดจากช่วงการชาร์จไปถึงช่วงการโฮล จนกระทั่ง V_o เข้าสู่ภาวะคงตัว ภายในช่วงผิดพลาด 1 %, 0.1 % หรือ 0.01 %

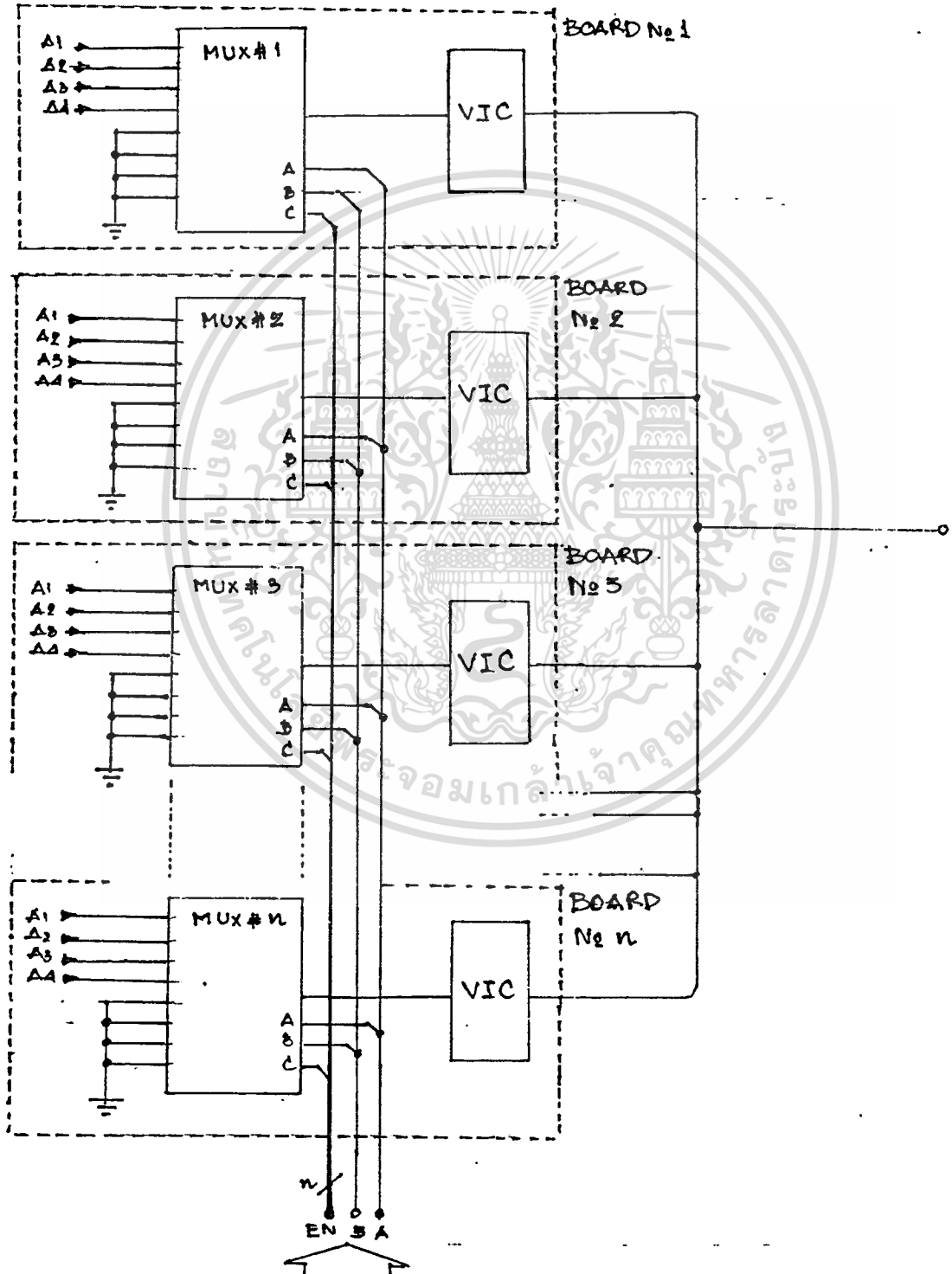
ขั้นการโฮล (Hold Step) เป็นผลมาจากค่าพาราซิติกคาปาซิแตนซ์ (Parasitic Capacitance) ของตัวสวิตช์ เมื่อสวิตช์เปลี่ยนไปสู่โหมดการโฮล โวลเตจคร่อมพาราซิติกคาปาซิแตนซ์จะเปลี่ยนไป ทำให้มีการส่งผ่านประจุจาก C_H ไปชาร์จพาราซิติกคาปาซิแตนซ์ ทำให้ V_o เปลี่ยนไปจากเดิมได้

การฟีดทรู (Feedthrough) ในช่วงโหมดการโฮล V_o จะมีค่าคงที่ไม่แปรตาม V_i แต่ในความเป็นจริง สเตรย์คาปาซิแตนซ์ที่คร่อมสวิตช์จะทำให้เกิดการส่งผ่านโวลเตจจากทางด้านอินพุตไปชาร์จ C_H ทำให้ V_o มีค่าเปลี่ยนไปตาม V_i ได้

โวลเตจครู่ (Voltage Droop) เป็นอาการลดลงของค่า V_o ในภาวะการโฮล อันเนื่องมาจากการดิสชาร์จของ C_H

2.1.2 วงจรมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing-Circuit)

ประกอบด้วยอนาล็อกมัลติเพล็กซ์เซอร์ชนิด 8 ออก 1 (CD4051) อยู่บนแต่ละบอร์ดโดยมีโครงสร้างทั้งระบบ ดังภาพที่ 2.1.12



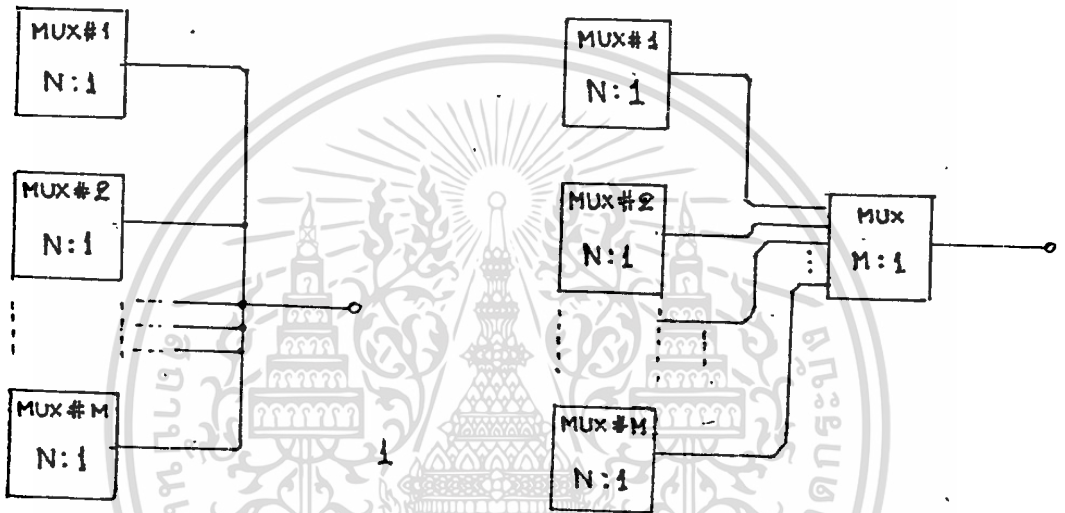
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ FROM CONTROL UNIT ศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.1.12

จากภาพขาคควบคุมการมัลติเพล็กซ์ A และ B ถูกต่อถึงกันตลอดทั้ง n บอร์ด โดยที่มีขา C#1 ถึง C#n เป็นขาอินพุตเส้นแต่ละบอร์ด ซึ่งจะถูกลเลือกเมื่อขา C ของบอร์ดนั้นแอกทีฟต่ำ (Active Low) ส่วนขาอื่น ๆ จะมีค่าลอจิกเป็น "1" ซึ่งจะทาให้เอาต์พุตของมัลติเพลกเซอร์ในบอร์ดที่ไม่ได้ถูกลเลือกมีค่าเป็นศูนย์

สำหรับโครงสร้างการมัลติเพล็กซ์แบบนี้ โดยปกติแล้วจะมีข้อด้อยกว่าอีกวิธีซึ่งมีลักษณะดังวงจรแบบที่ 2 ของภาพที่ 2.1.13



ภาพที่ 2.1.13

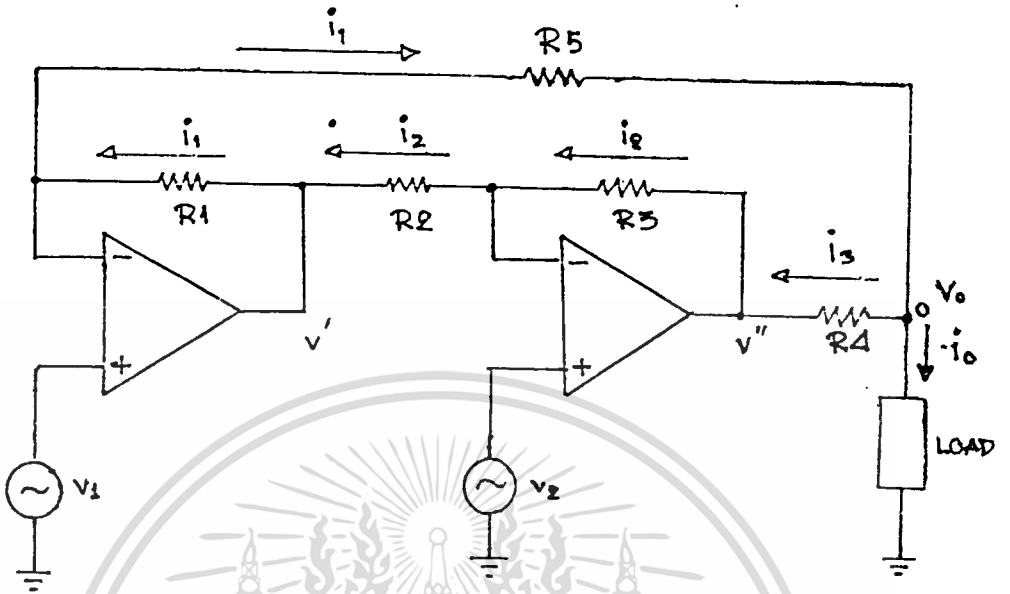
โดยวงจรที่ใช้งานอยู่เป็นวงจรแบบที่ 1 ซึ่งมีข้อเสียสำคัญคือมี กระแสรั่ว (Leakage Current) มากกว่าแบบที่ 2 แต่เนื่องจากลักษณะการใช้งานที่เอาต์พุตจากวงจรมัลติเพลกเซอร์ จะผ่านเข้าสู่วงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส (V to I Converter) ทาให้จำเป็นต้องใช้วงจรแบบที่ 1 เพื่อไม่ให้เอาต์พุต (ของวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส) จากบอร์ดที่ไม่ได้ถูกลเลือกในขณะ เวลาใด ๆ อิ่มตัว และนอกจากนี้ ค่ากระแสรั่ว ที่เกิดขึ้นแม้จะมากกว่าแบบที่ 2 แต่สามารถชดเชยได้โดยง่ายด้วยการปรับค่าอเพเซชันในส่วนวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส

2.1.3 วงจรแปลงสัญญาณโวลเตจเป็นกระแส

จากเอาต์พุตของวงจรมัลติเพลกเซอร์ จะ เข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณโวลเตจเป็นกระแส เพื่อเปลี่ยนสัญญาณโวลเตจไปเป็นกระแส เพื่อส่งออกไปสู่วงจรรับ (Receiver) ต่อไป วงจรที่ใช้

มีลักษณะ ดังภาพที่ 2.1.14

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1.14

เนื่องจากวงจรเป็นเชิงเส้น จึงสามารถใช้ทฤษฎี Superposition ได้ โดยตอนแรกจะกำหนดให้ $v_2=0$ และ $v_1=0$ ตามลำดับ

เพื่อความสะดวกในขั้นแรก กำหนดให้ $R_2 = R_3$ และ $R_4+R_5 = R_1$

ฉะนั้น I. กรณีที่ $v_2 = 0$

$$v' = v_1 \cdot (1 + (R_1/R_5)) - v_o \cdot (R_1/R_5) \quad 2.1.8)$$

และ $v'' = -v' \quad 2.1.9)$

ณ จุด 0 ผลรวมกระแสเท่ากับศูนย์

ฉะนั้น

$$i_1 = i_{o1} + i_3$$

$$(v_1 - v_{o1})/R_5 = (v_{o1} - v)/R_4 + i_{o1}$$

แทนค่าจาก (1) และ (2) ได้

$$v_1/R_5 = (v_{o1}/R_4) + (v_{o1}/R_5) + (1/R_4)(v_1(1+R_1/R_5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{o1} = v_1 * (R_4 - R_5 - R_1) / R_4 R_5$$

ฉะนั้น

$$i_{o1} = -2v_1 / R_4$$

2.1.10)

II. กรณีที่ $v_1 = 0$

$$v'' = v_2(1 + R_3/R_2) - v'(R_3/R_2)$$

2.1.11)

$$v_o = -v'$$

2.1.12)

$$i_1 = i_3 + i_{o2}$$

2.1.13)

จากสมการทั้งสาม แก้สมการจะได้ว่า

$$i_{o2} = 2v_2 / R_4$$

2.1.14)

ฉะนั้น กรณีที่ v_1 และ v_2 ไม่เท่ากับศูนย์

$$i_o = i_{o1} + i_{o2}$$

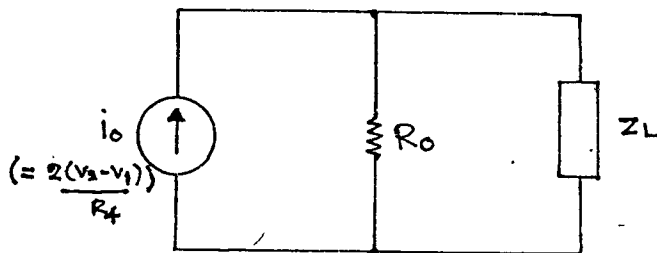
$$= 2 * (v_2 - v_1) / R_4$$

2.1.15)

สมการ (2.1.15) เป็นกรณีอุดมคติ คือ $R_1 = R_4 + R_5$ และ $R_2 = R_3$ รวมทั้งค่า

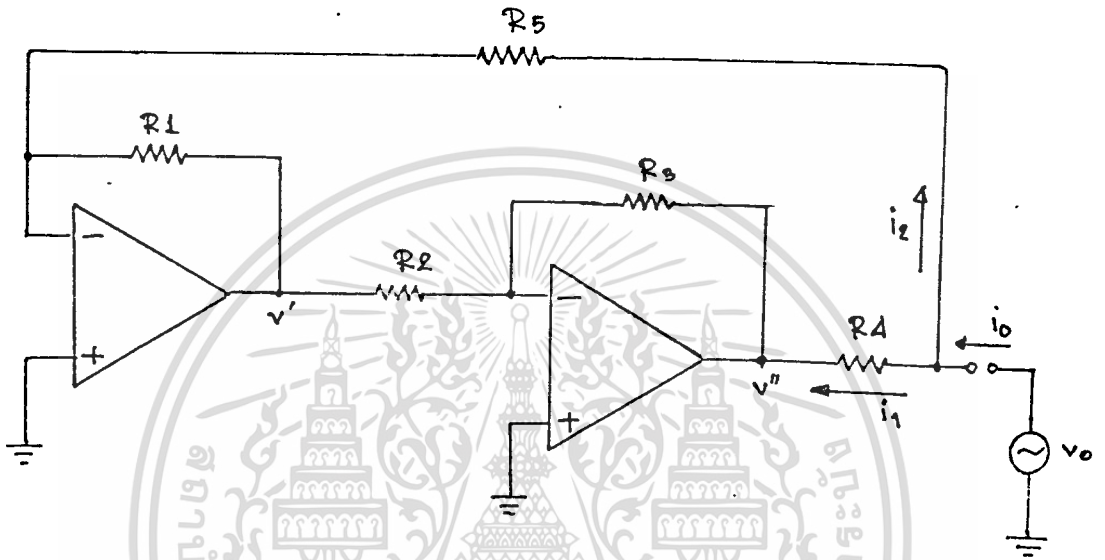
ออฟเซตต่าง ๆ เป็นศูนย์ ซึ่งในกรณีที่เงื่อนไขต่าง ๆ ไม่เป็นจริง จะทำให้วงจรมีค่าเกณฑ์แตกต่างไปจากสมการ (2.1.15)

คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของวงจรเปลี่ยนสัญญาณโวลเตจเป็นกระแส คือ ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าเป็นอนันต์ในกรณีอุดมคติ โดยสามารถแสดงวงจรสมมูลย์ของเอาต์พุตของวงจรได้ดังภาพที่ (2.1.15)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า R_o สามารถคำนวณได้ด้วยการบ่อนโวลเตจเข้าที่จุดเอาต์พุต (โดยอินพุตต่อลงกราวด์) แล้ววัดค่ากระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป



ภาพที่ 2.1.16

จากภาพที่ 2.1.16

โดยที่ $i_o = i_1 + i_2$

และ $i_2 = v_o/R_5$

แต่ $i_1 = (v_o - v'')/R_4$

ฉะนั้น $v'' = v_o * (R_1/R_5) * (R_3/R_2)$

และ $i_1 = (1 - (R_1R_3/R_2R_5)) * (v_o/R_4)$

และ $i_o = ((1/R_5) - (R_1R_3/R_2R_4R_5) + (1/R_4)) * v_o$

$R_o = v_o/i_o$

$= (R_2R_4R_5) / (R_2R_4 - R_1R_3 + R_2R_5)$

$= (R_2R_4R_5) / (R_2(R_4 + R_5) - R_1R_3) \quad 2.1.16)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ในกรณีฉุกเฉิน $R_4 + R_5 = R_1$ และ $R_2 = R_3$ ฉะนั้นจะได้ว่า

$$R_0 = R_4 * R_5 / 0 = \infty$$

แต่ในทางปฏิบัติ $R_4 + R_5 = R_1$ และ $R_2 = R_3$ ดังนั้นค่า R_0 จึงมีค่าไม่เป็นอนันต์ซึ่งในบางกรณีที่โหลดมีค่าสูง จะทำให้วงจรทำงานผิดพลาดได้ และข้อควรระวังอีกประการหนึ่งก็คือการที่วงจรมีการย้อนกลับแบบบวกอยู่ด้วย ทำให้ R_0 อาจมีค่าเป็นลบได้ และหากค่าของโหลดอิมพีแดนซ์พอเหมาะ วงจรอาจจะเกิดออสซิลเลชันเองได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่า R_0 ที่เหมาะสม สามารถแทนตัวต้านทานในวงจรด้วยตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ทำให้สามารถปรับจนค่าส่วนในสมการ (2.1.16) ใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด และเป็นบวก โดยอาจเลือกปรับได้ทั้ง R_1, R_2, R_3 หรือ R_5 แต่ควรเลือกปรับ R_1 เนื่องจากไม่มีผลต่ออัตราขยายของวงจร โดยสามารถแสดงได้ว่า สำหรับวงจรในทางปฏิบัติ ซึ่งปรับค่า R_0 แล้ว

$$i_o = (v_2 - v_1) * (1 + (R_3/R_2)) * (1/R_4) \quad 2.1.17$$

จากสมการ (2.1.17) จะเห็นว่าถ้าอัตราขยายวงจรไม่ขึ้นกับ R_1 เลย ดังนั้นการปรับค่า R_0 ด้วย R_1 จะเป็นอิสระต่ออัตราขยายของวงจร

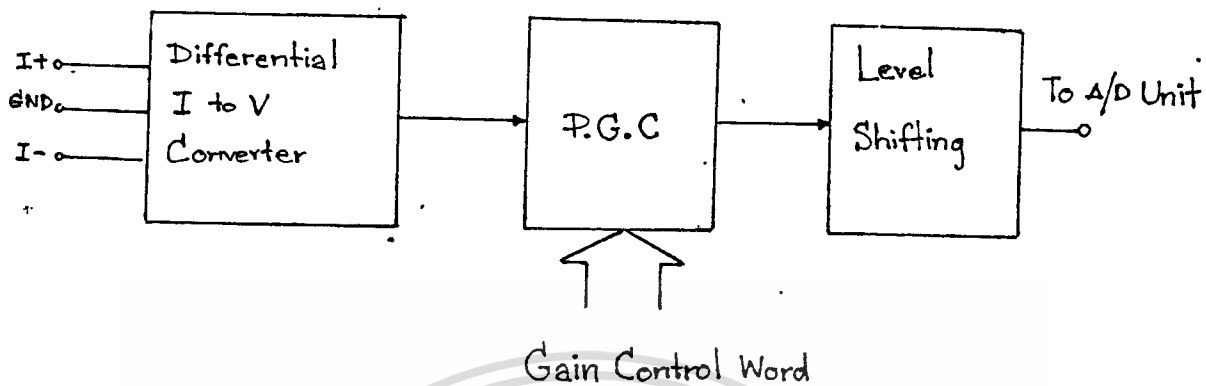
จากเอาท์พุทของวงจรของวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส จะถูกส่งออกไปรวมเข้ากับเอาท์พุทจากบอร์ดอื่น ๆ เพื่อส่งต่อไปยังส่วนวงจรรับต่อไป

การส่งสัญญาณข้อมูล

สำหรับระบบการส่งสัญญาณข้อมูลจากบอร์ดต่าง ๆ ไปยังวงจรส่วนรับใช้วิธีการส่งเป็นแบบกระแสดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งจะหลีกเลี่ยงผลของสัญญาณรบกวนได้ และการส่งสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล จะลดสัญญาณคอมมอนโหมดและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

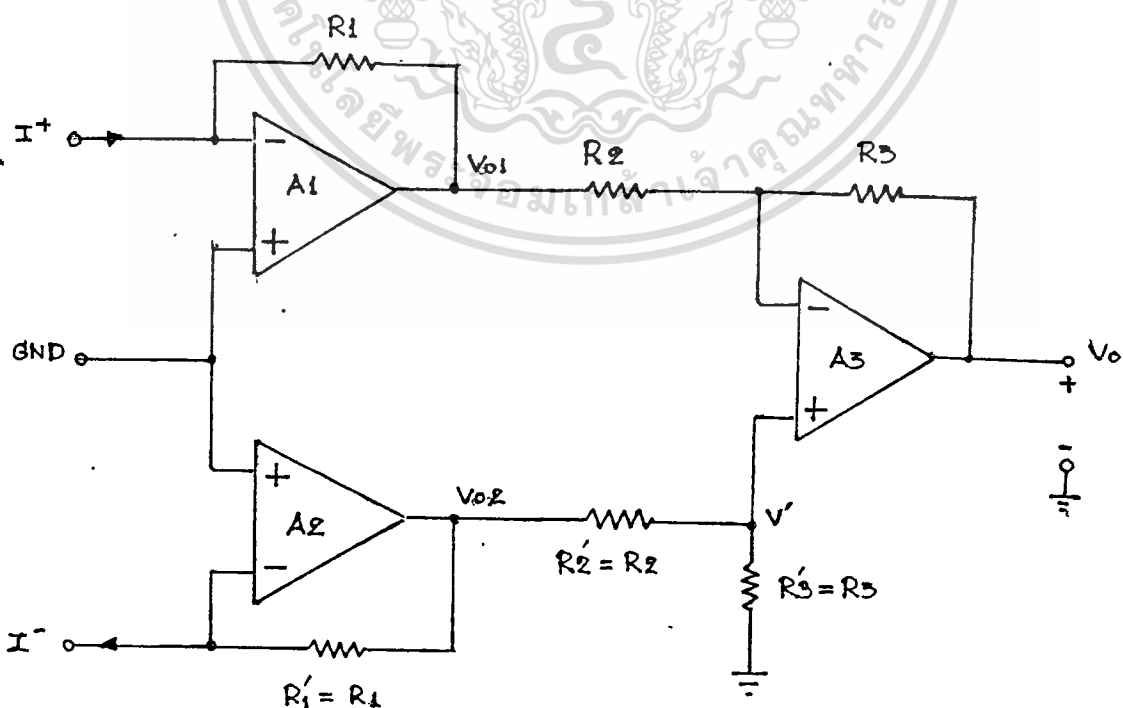
2.2 ส่วนวงจรรับ (Receiver Unit)

ประกอบด้วยส่วนย่อยดังบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 2.2.1)



ภาพที่ 2.2.1

2.2.1 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential I to V Converter)



ภาพที่ 2.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.2.2) วงจรประกอบไปด้วยออปแอมป์ 3 ตัว ซึ่งมีค่าอัตราส่วนลดสัญญาณคอมมอนโหมด (CMRR) สูง โดยมีการทํานานดังนี้

A1 ,R1 และ A2 ,R1 ทํานานที่เป็นวงจรเปลี่ยนกระแสอินพุตมาเป็น โวลเตจ v_{o1} และ v_{o2} ตามลำดับ โดยที่

$$v_{o1} = -(I^+)R1 + V_{cm} \quad 2.2.1)$$

$$v_{o2} = (I^-)R1 + V_{cm} \quad 2.2.2)$$

โดยที่ V_{cm} เป็นความต่างศักย์ของกราวด์ที่วงจรส่งและวงจรรับ

และจากภาพ

$$v' = v_{o2} * R3 / (R2 + R3) \quad 2.2.3)$$

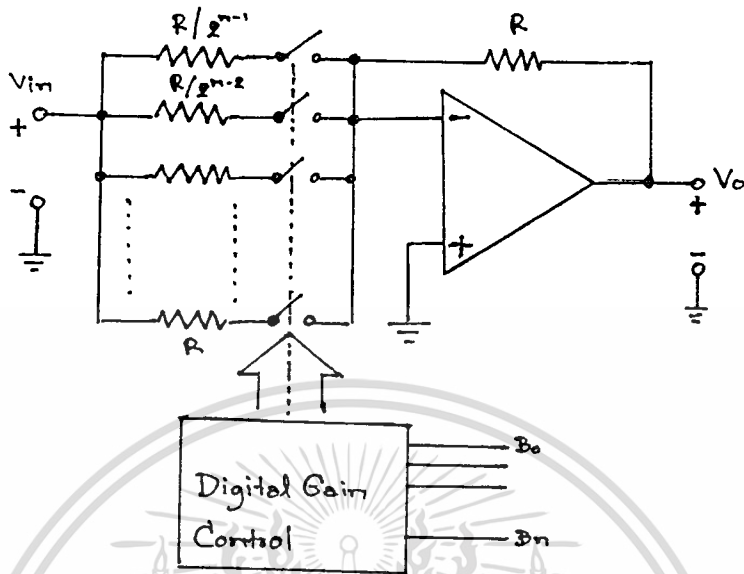
$$(v_o - v') / R2 = (v' - v_3) / R3 \quad 2.2.4)$$

จากสมการ 2.2.3 และ 2.2.4

$$v_{o3} = (R3/R2) * (v_{o2} - v_{o1}) \quad 2.2.5)$$

2.2.2 วงจรขยายปรับค่าได้ (Programable Gain Control, P.G.C.)

เนื่องจากเนื้อเยื่อของผู้ป่วยในแต่ละส่วนของร่างกายที่ทำการตรวจมีการดูดซับรังสีเอ็กซ์ในระดับที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้งานอุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรขยายปรับค่าได้จะเป็นตัวปรับขนาดสัญญาณให้พอเหมาะกับช่วงกว้างของสัญญาณที่อินพุตของส่วนแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลจะรับได้ โดยวงจรแบบหนึ่งที่ใช้งานเป็นวงจรขยายปรับค่าได้ แสดงได้ดังภาพที่ 2.2.3)



ภาพที่ 2.2.3

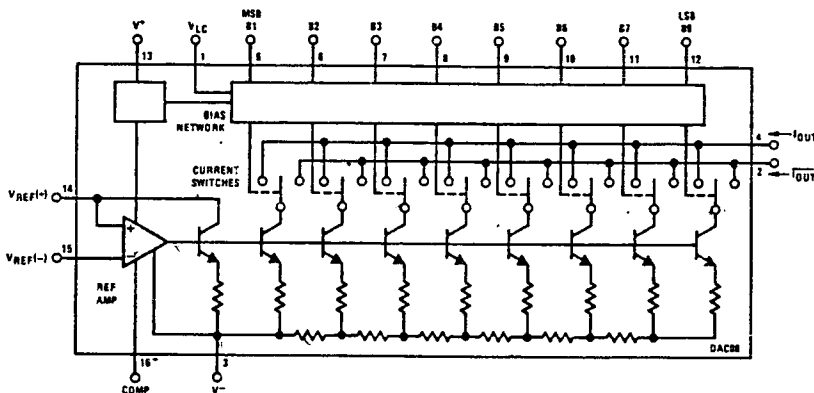
ซึ่งจากภาพจะ เห็นได้ว่า

$$V_o = -V_{in} (B_0 + 2B_1 + \dots + 2^{n-1}B_n)$$

2.2.1)

$B_0 - B_n$ = สัญญาณไบนารีควบคุมอัตราขยาย

สำหรับในโครงการครั้งนี้ ได้นำอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกมาใช้งานในกรณีพิเศษ เพื่อให้สามารถทำงานเป็นวงจรขยายปรับค่าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.2.4

จากภาพที่ 2.2.4 เป็นโครงสร้างภายในของไอซีเบอร์ DAC0800 ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบ 8 บิตซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับวงจรในภาพที่ 2.2.3) โดยที่

$$i_o = v_{ref}/R_{ref} * (N/256) \quad 2.2.2)$$

โดยที่ N = เลขฐานสิบของค่าไบนารี D0 - D7 (ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าได้)

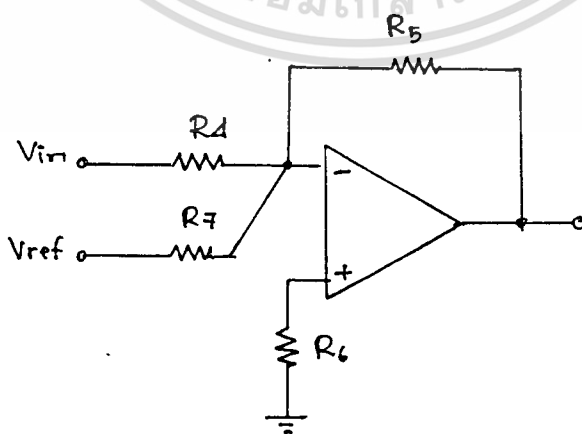
แต่เนื่องจากการใช้งานเอาต์พุตเป็นโวลเตจ ดังนั้นจึงต่อเอาต์พุตของ DAC0800 เข้ากับวงจรแปลงกระแสเป็นโวลเตจ ซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ และ Rg

ดังนั้น

$$v_o = -V_{ref}/R_{ref} * (N * R_g/256) \quad 2.2.3)$$

2.2.3 วงจรเลื่อนระดับสัญญาณ (Level - Shifting Circuit)

อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลมักมีช่วง โวลเตจที่อินพุตเป็นแบบดิเฟอเรนเชียล (เช่น $\pm 5v$, $\pm 10v$ ฯลฯ) แต่เนื่องจากเอาต์พุตจากวงจรขยายปรับค่าได้มีค่าเป็นบวกเพียงด้านเดียว วงจรเลื่อนระดับสัญญาณจึงทำหน้าที่เลื่อนโวลเตจให้เต็มช่วงกว้างทั้งด้านบวกและลบของอุปกรณ์แปลงสัญญาณ



ภาพที่ 2.2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.2.5 แสดงวงจรเลื่อนระดับสัญญาณแบบหนึ่ง จะสามารถแสดงได้ว่า

$$V_o = V_{in}(R5/R4) - V_{ref}(R5/R7) \quad (2.2.5)$$

จะเห็นว่าวงจรมีอัตราขยายสำหรับสัญญาณข้อมูลเท่ากับ $R5/R4$ และระดับสัญญาณเลื่อนไปเท่ากับ $V_{ref}(R5/R4)$ ซึ่งค่านี้สามารถปรับได้จากค่า V_{ref} หรือ $R7$ โดยไม่มีผลต่ออัตราขยายของวงจร

สำหรับ $R6$ ควรมีค่าเท่ากับ $R4//R7//R5$ เพื่อชดเชยผลของกระแสไบอัสของออปแอมป์

2.3 หน่วยวงจรควบคุม (Control Unit)

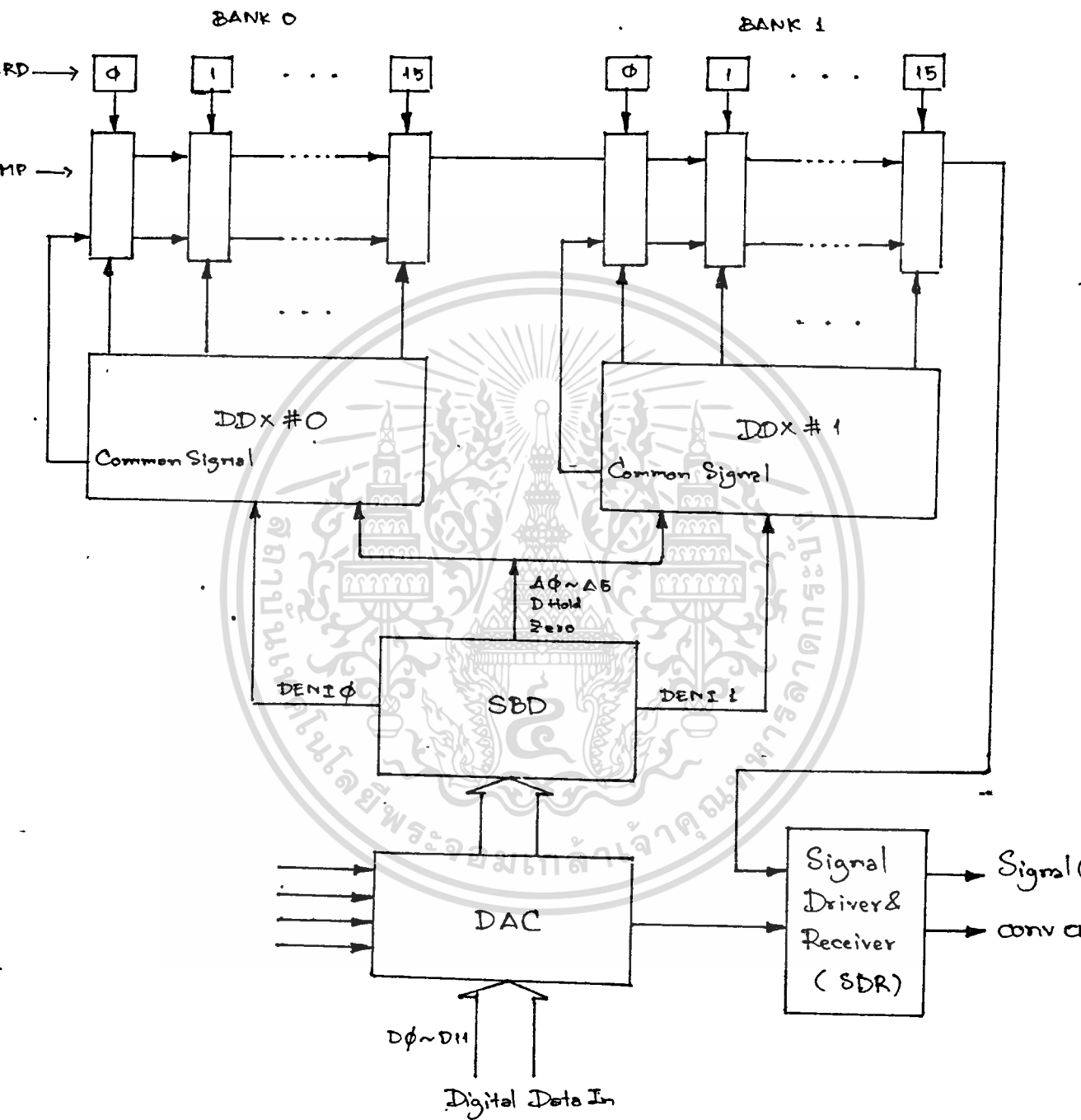
2.3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของวงจรควบคุม

หน่วยควบคุมเป็นส่วนวงจรที่สร้างขึ้นสัญญาณควบคุมการทำงานของหน่วยอื่น ๆ เช่น สัญญาณควบคุมการเลือกข้อมูล สัญญาณต่าง ๆ ที่ควบคุมการทำงานของวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ให้ทำงานถูกต้องตามแผนภูมิเวลาของระบบ โดยได้แบ่งระบบมีลักษณะตามบล็อกไดอะแกรม ดังภาพที่ 2.3.1 ก

ในระบบการรับและแปลงข้อมูล (Data Acquisition Subsystem :DAS) สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะรุ่นที่ 3 ที่ใช้อยู่ในขณะนี้ ใช้ตัวรับรังสีเอ็กซ์แบบชนิดสเตทจำนวน 128 ตัว แบ่งเป็นตัวรับรังสีอ้างอิง (Reference Detectors) จำนวน 3 ตัว อยู่ที่ขอบของกลุ่มตัวรับด้านหนึ่ง 2 ตัว อีกด้านหนึ่ง 1 ตัว และเหลือเป็นตัวรับสัญญาณรังสีเอ็กซ์ จำนวน 125 ตัว ตัวที่อยู่ตรงกึ่งกลางกลุ่มของ 125 ตัวนี้ จะอยู่ที่กึ่งกลางของลำรังสีเอ็กซ์เป็น 32 แผ่น แบ่งเป็น 2 แบนด์ ในแต่ละแบนด์จะมีแผ่นวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์จำนวน 16 แผ่น บนแต่ละแผ่นจะมีวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ 4 ชุด สำหรับใช้กับตัวรับรังสีเอ็กซ์ 4 ตัว

ในระบบการสแกนรับและข้อมูลที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะที่ใช้อยู่คือระบบที่สแกนภาพ 360 โปรเจกชัน (Projection) ในแต่ละโปรเจกชันก็จะสแกนตัวรับรังสีเอ็กซ์จำนวน 128 ตัว

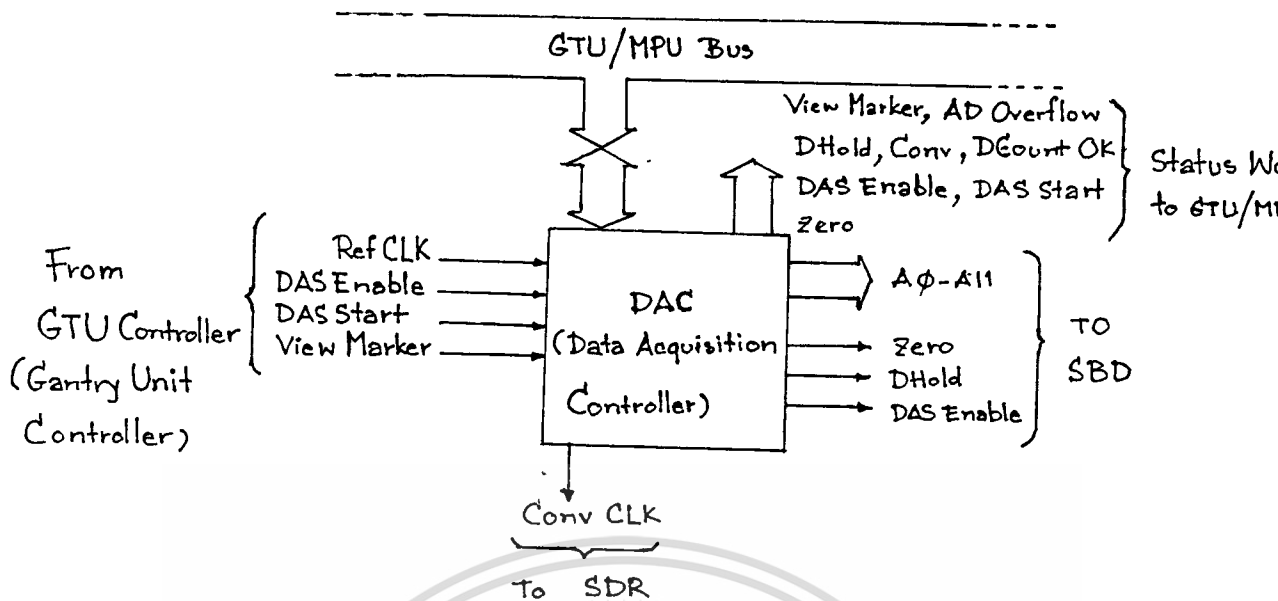
สัญญาณต่าง ๆ ที่เข้าออกจากวงจรควบคุม มีดังภาพที่ 2.3.1 ข



ภาพที่ 2.3.1ก บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบการรับและการแปลงข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3.1 ข

จากภาพที่ 2.3.1 ข พิจารณาแยกเป็นส่วนอินพุต และ เอาท์พุทของวงจรควบคุม ได้ดังนี้

1. ส่วนอินพุต ได้แก่

- 1.1 สัญญาณนาฬิกาอ้างอิง (Ref.CLK)
- 1.2 สัญญาณอีน่าเบิ้ลการรับและแปลงข้อมูลเป็นเชิงเลข (DAS Enable)
- 1.3 สัญญาณสั่ง เริ่มการรับและแปลงข้อมูลเป็นเชิงเลข (DAS Start)
- 1.4 สัญญาณเริ่มกำหนดจุดการทำงาน (View Marker) เป็นสัญญาณซิงค์ที่ใช้กำหนดค่าให้การสแกนข้อมูลในแต่ละโปรเจกชันมีจุดเริ่มต้นการทำงานตรงกัน และเป็นจุดที่สัญญาณเอ็กซ์เรย์จะมีค่าสูงสุด หรือเป็นจุดที่ต้องการ

2. ส่วนเอาท์พุท ได้แก่

- 2.1 สัญญาณรีเซตตัวนับแบบนับขึ้น หรือสัญญาณไหลคค่าให้ตัวนับแบบนับลง (DU Reset และ DD Load) ซึ่งเป็นสัญญาณเดียวกัน
- 2.2 สัญญาณโอเวอร์โฟล (ADOverflow) ใช้แสดงความผิดพลาดของวงจรตัวนับ ซึ่งอาจจะเกิดได้จากมีสัญญาณรบกวน ทำให้ตัวนับทำงานผิดพลาด
- 2.3 สัญญาณตัวยืม (Carry) เป็นสัญญาณที่ได้จากตัวนับแบบนับขึ้น เมื่อตัวนับเกิดการผิดพลาด จะทำให้เกิดสัญญาณโอเวอร์โฟลล์
- 2.4 สัญญาณตัวยืม (Borrow) เป็นสัญญาณที่ได้จากตัวนับแบบนับลง เมื่อตัวนับนับครบตามจำนวนที่กำหนดไว้

2.5 สัญญาณแสดงว่าสแกนตัวรับรังสีเอ็กซ์ครบตามจำนวนแล้ว (DCountOK) เมื่อตัวนับส่งสัญญาณ

ไม่วารณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานตัวยืมมาทำให้ ก็จะสร้างสัญญาณนี้ให้แอดทิฟ

2.6 สัญญาณซีโร (Zero) สร้างขึ้นมาเพื่อควบคุมการชดเชยความผิดพลาด ในส่วนวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์

2.7 สัญญาณสั่งให้โฮลข้อมูล (DHold) สร้างขึ้นมาควบคุมการโฮลข้อมูลในส่วนวงจรแชนเนลและวงจรโฮลข้อมูล ในวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์

2.7 สัญญาณสั่งให้ทำการแปลงข้อมูลเป็นเชิงเลข (Conv) ถ้าแอดทิฟก็เป็นการสั่งให้ทำการแปลงข้อมูลจากอนาลอกเป็นดิจิตอล

ลักษณะการทำงานของวงจรควบคุม

วงจรควบคุมจะรับสัญญาณซิงค์ที่สร้างมาจากหน่วยแกนทรี คือ สัญญาณวิวมาร์คเกอร์เป็นสัญญาณที่สร้างมาจากหน่วยแกนทรี (Gantry Unit) ซึ่งจะใช้กำหนดจุดที่จะเริ่มต้นการรับและการแปลงข้อมูล เป็นสัญญาณซิงค์ให้จุดที่ต้องการจะโฮลข้อมูล เป็นจุดที่ตรงกับจุดสูงสุดหรือจุดที่กำหนด ในแต่ละพัลส์สัญญาณรังสีเอ็กซ์ที่ยังมายังตัวรับรังสี โดยจะเริ่มกำหนดจุดเริ่มต้นทุกครั้งที่มีการสแกน ในวงจรควบคุมจะมีตัวนับ (Up/Down Counter) ซึ่งใช้ในการนับจำนวนตัวรับรังสีเอ็กซ์ว่าเริ่มสแกนไปถึงแค่ไหน วงจรควบคุมจะเป็นวงจรลอจิกที่จะสร้างสัญญาณควบคุมอื่น ๆ ให้ซิงค์กับสัญญาณวิวมาร์คเกอร์

การสแกนทำได้โดย ส่งค่าดิจิตอลจากตัวนับให้กับอนาลอกมัลติเพลกเซอร์แบบ 8 ออก 1 (CD4051) ให้เลือกเอาสัญญาณข้อมูลอนาลอกจากวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ชุดที่ต้องการ ในขณะที่วงจรชุดอื่นไม่ถูกเลือกข้อมูล

การควบคุมที่สำคัญคือ

- กำหนดจุดที่จะโฮลข้อมูล (อนาลอก) ในส่วนวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ โดยการควบคุมการเปิด-ปิดอนาลอกสวิตช์ (SW2) ซึ่งเป็นสวิตช์สำหรับตัวเก็บประจุที่ใช้ในการโฮลข้อมูล สัญญาณควบคุมการทำงานนี้ก็คือ สัญญาณ DHold

- กำหนดจุดที่จะสั่งให้ส่วนแปลงสัญญาณข้อมูลเป็นเชิงเลข (A/D Board) ทำงาน เนื่องจากจุดที่ต้องการนำข้อมูลอนาลอกไปแปลงเป็นข้อมูลดิจิตอล ก็คือช่วงที่มีการโฮลข้อมูล

ไว้ สัญญาณนี้ซึ่งก็คือ สัญญาณ Conv จะเหมือนกับสัญญาณ DHold แต่จะมีการหน่วงเวลาจาก

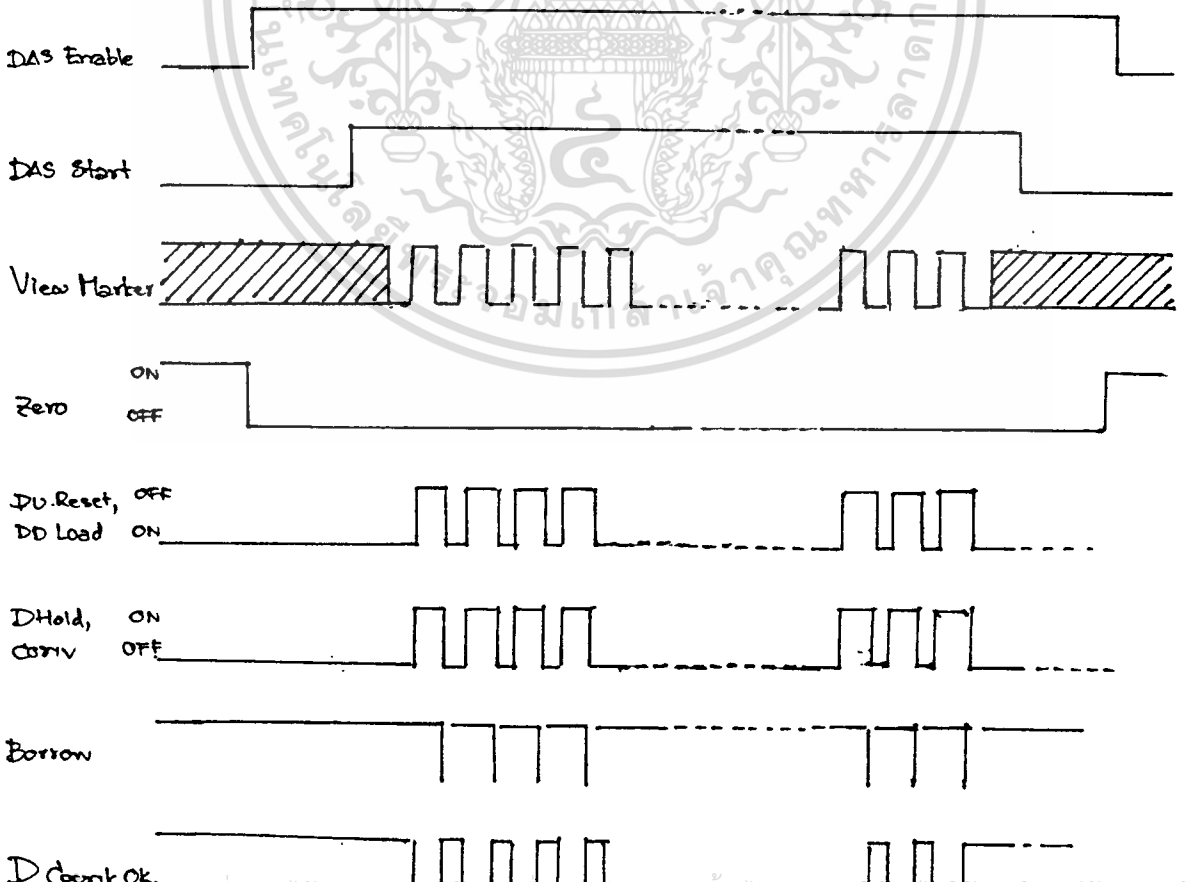
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สัญญาณ DHold เล็กน้อย ถ้าสัญญาณ Conv ไม่แอดทิฟก็ จะไม่มีการแปลงข้อมูลเป็นเชิงเลข

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณควบคุมวงจรชดเชยความผิดพลาด ในส่วนวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ ก็คือสัญญาณ Zero ซึ่ง เมื่อเริ่มให้ระบบทั้งหมดทำงาน ก่อนที่จะ เริ่มรับและแปลงสัญญาณข้อมูล ในการสแกนแต่ละครั้ง ต้องมีการชดเชยความผิดพลาดก่อนเสมอ สัญญาณควบคุมนี้จะ ไปปิดอนาล็อกสวิทช์ (SW1) ให้มีการชดเชย แต่ในขณะที่ทำการสแกนเก็บและแปลงข้อมูล สัญญาณ Zero นี้ จะไม่แอคทีฟ สวิทช์ (SW1) ก็ จะ เปิด นั่นคือมีการชดเชยความผิดพลาดเพียงครั้งเดียวก่อนการสแกนแต่ละครั้ง

- มีวงจรตัวนับที่ใช้นับจำนวนตัวรับรังสีเอ็กซ์ ที่ได้ทำการสแกนไปแล้วโดยจะ เริ่มนับตัวรับรังสี เมื่อเริ่มการสแกนจนกระทั่งสแกนจนครบจำนวนตัวรับรังสีทั้ง 128 ตัว เมื่อนับครบแล้วจะสิ้นสุดการสแกน รอการสแกนรับและแปลงข้อมูลครั้งต่อไป

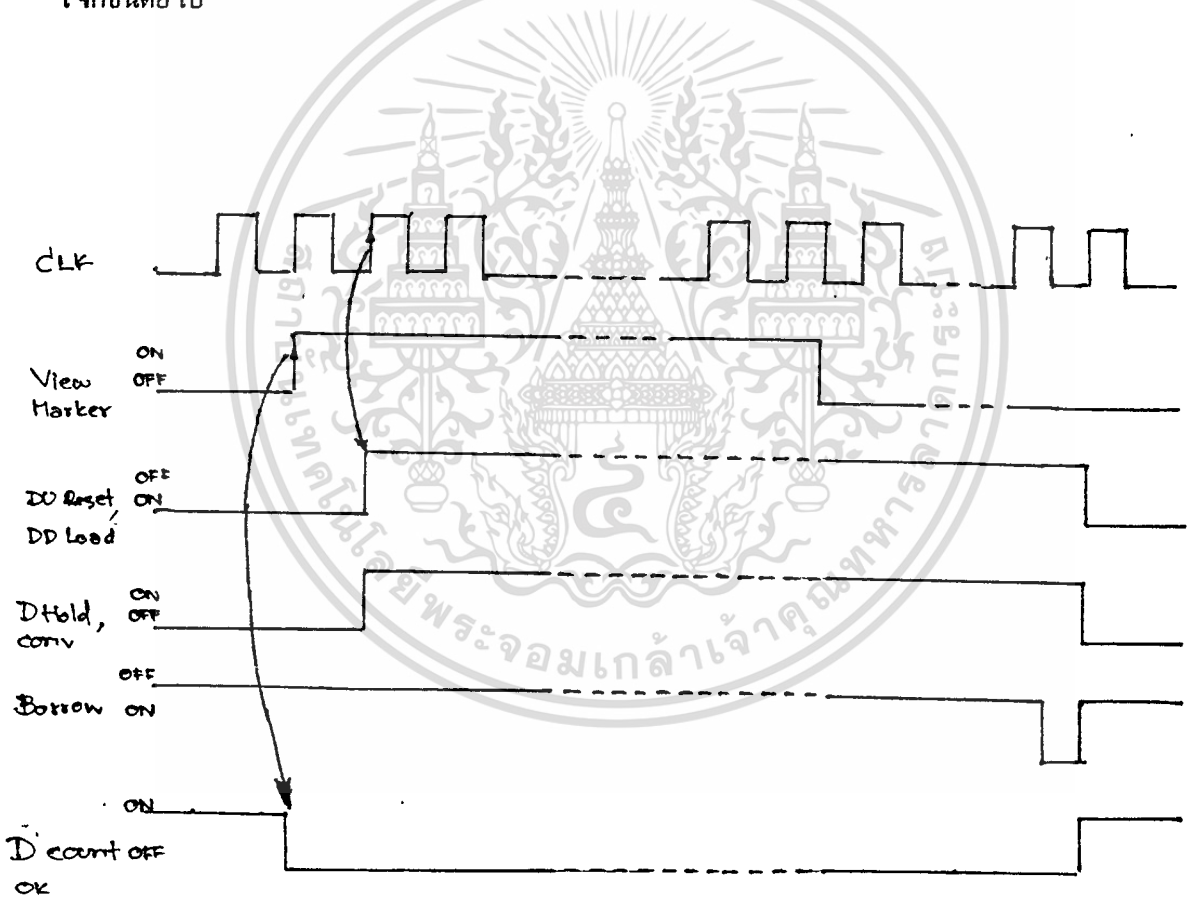
2.3.2 แผนภูมิเวลาการรับข้อมูลและแปลงข้อมูลเป็นเชิง เลขสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์-ภาพตัดขวางอวัยวะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ควรเผยแพร่... ไม่ใช้ในประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาพที่ 2.3.2ก แผนภูมิเวลาในการสแกนทั้ง 360 องศา (Scan Timing)

จากภาพที่ 2.3.2ก จะเป็นแผนภูมิเวลาในการสแกนรับและข้อมูลแปลงข้อมูลทั้งหมดจะเห็นว่า การสแกนให้ได้ข้อมูลครบ 360 โบริจกชั้นนั้นจะอยู่ภายในช่วงที่ สัญญาณ DAS Enable แอคทีฟ โดยการสแกนจะเริ่มเมื่อสัญญาณ DAS Start และ DAS Enable เริ่มแอคทีฟพร้อมกัน ส่วนสัญญาณซีโรจะมีการแอคทีฟเพียงครั้งเดียวในตอนก่อนการสแกน เมื่อเริ่มการสแกนแล้วสัญญาณซีโรจะไม่แอคทีฟอีก ที่สำคัญคือสัญญาณ DAS Start จะแอคทีฟในช่วงที่จะรับข้อมูลเท่านั้น หลังจากรับข้อมูลบริจกชั้นครบ Nv แล้ว สัญญาณ DAS Start จะไม่แอคทีฟทันที ส่วนสัญญาณควบคุมอื่น ๆ จะอธิบายในแผนภูมิเวลาของการสแกนแต่ละบริจกชั้นต่อไป

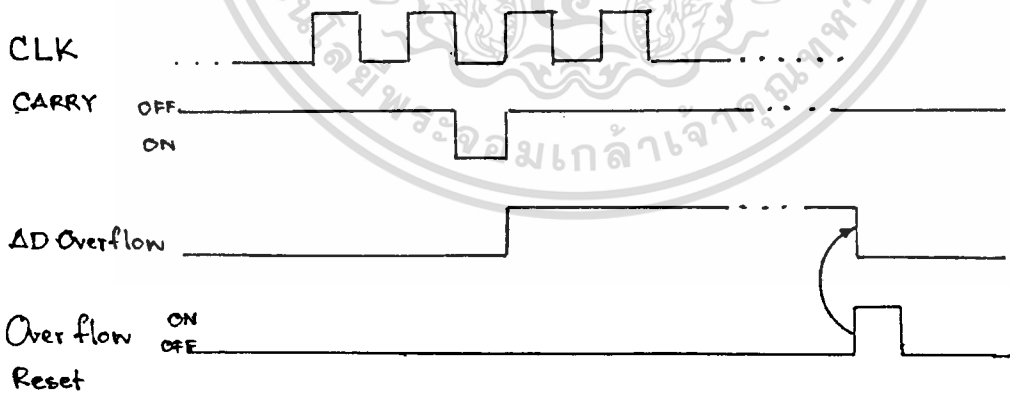


ภาพที่ 2.3.2ข แผนภูมิเวลาการสแกนในแต่ละ 1 บริจกชั้น (View Timing)

จากภาพที่ 2.3.2ข เป็นแผนภูมิเวลาในการสแกนรับและเก็บข้อมูลในแต่ละ 1 บริจกชั้น เมื่อสัญญาณ DAS Start และ DAS Enable แอคทีฟทั้งคู่ การทำงานจะเริ่มขึ้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสัญญาณวิวมาร์คเกอร์เริ่มแอดคิทที่ขอบขาขึ้น พร้อมกับสัญญาณ DCountOK จะไม่แอดคิททันที จากตำแหน่งนี้เมื่อถึงขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาถัดไป สัญญาณ DD Load ก็จะไม่แอดคิท (DU Reset ไม่แอดคิท) ให้มีการไหลค้ำข้อมูลดิจิทัล จากพอร์ทเข้าตัวนับแบบนับลงให้เริ่มสแกนนับตัวรับรังสี พร้อม ๆ กับทากให้สัญญาณ DHold และ Conv แอดคิท ช่วงนี้ก็จะเป็นการส่งให้วงจรไหลข้อมูลทามาน และทำการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลในช่วงนี้ ตัวนับจะนับไปเรื่อย ๆ จนถึงจำนวนที่กำหนดก็จะส่งสัญญาณตัวขี้ออกมา ทากให้สัญญาณ DCountOK แอดคิท แสดงว่าได้สแกนตัวรับรังสีครบจำนวน Nd แล้ว พร้อม ๆ กับที่สัญญาณ DHold และ Conv ไม่แอดคิท ช่วงนี้ก็จะเป็นการแซมปลิงข้อมูลอนาลอกในวงจรภาครับรังสี รอการสแกนในโปรเจกชันต่อไป เมื่อสัญญาณวิวมาร์คเกอร์แอดคิทอีกครั้งหนึ่ง

สัญญาณวิวมาร์คเกอร์ ควรมีคาบเวลาไม่ต่ำกว่า 10 มิลลิวินาที เพราะหลอดรังสีเอ็กซ์ได้รับไฟเลี้ยง โดยให้สัญญาณเอช 50 เฮิร์ต ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) ทากให้พัลส์สัญญาณเอ็กซ์เรย์เป็น 100 เฮิร์ต มีคาบเวลาเป็น 10 มิลลิวินาที



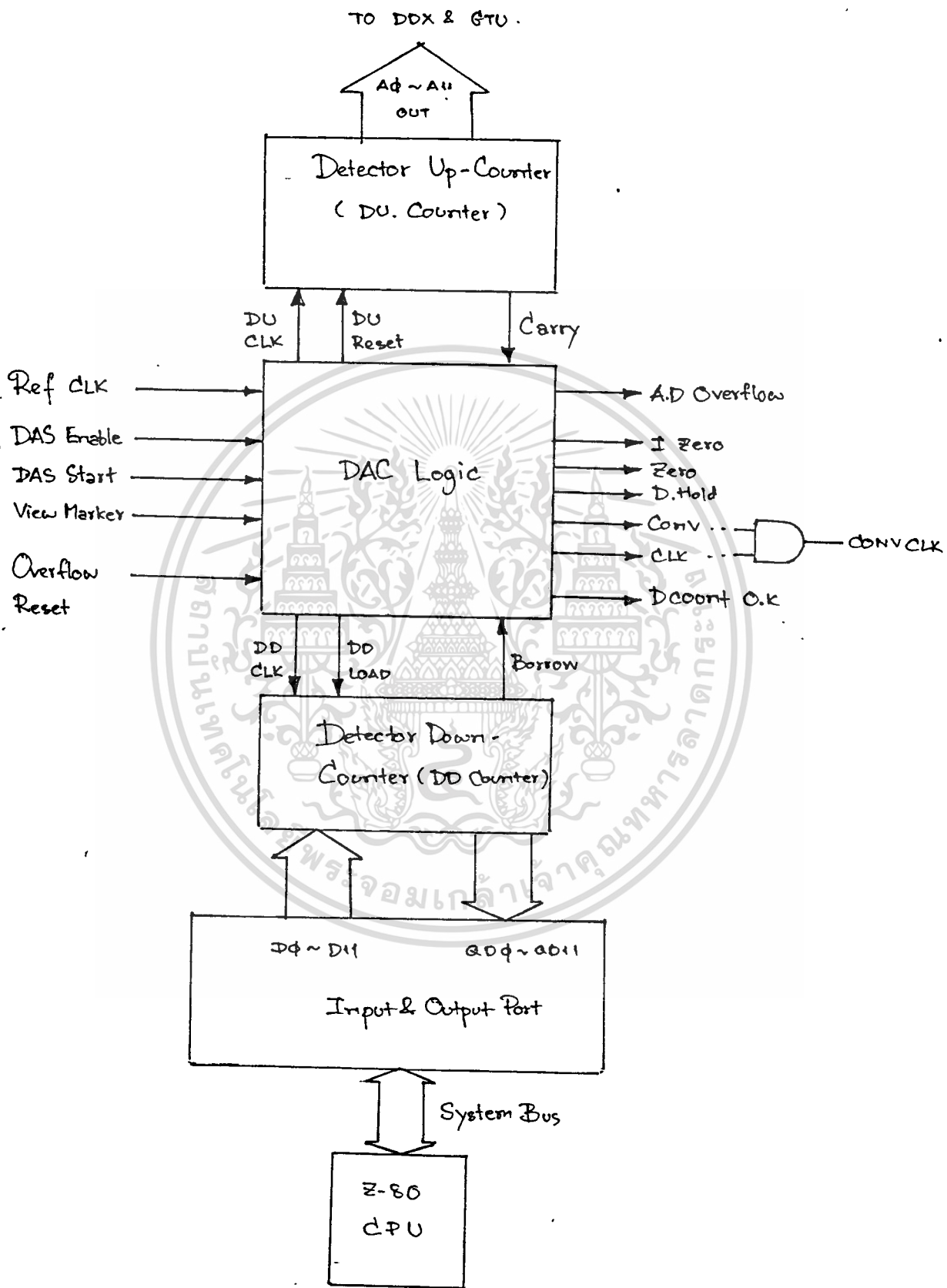
ภาพที่ 2.3.2 ค แผนภูมิเวลาในกรณีที่เกิดการโอเวอร์โฟล

จากภาพที่ 2.3.2ค ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นกับวงจรตัวนับ ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากมีสัญญาณรบกวน ตัวนับจะส่งสัญญาณตัวทอคแอดคิทค้ำซึ่งจะทากให้ สัญญาณ ADOverflow

แอดคิท แล้วจะสร้างสัญญาณโอเวอร์โฟลรีเซต ไปรีเซตความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้ความเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 2.3.3ก บล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุม

อธิบายการทำงานของวงจร

วงจรมีไอซี 74LS191 เป็นตัวนับไบนารี 4 บิต มาเป็นตัวนับแบบนับลง และแบบนับขึ้นจำนวน 12 บิต ซึ่งที่จริงในระบบที่ใช้อุปกรณ์ตัวนับ 8 บิต ก็พอ เพราะใช้ตัวรับรังสีเอ็กซ์จำนวน 128 ตัว แต่วงระบบเพื่อการขยายระบบในภายหลัง ข้อมูลดิจิทัล D0-D11 ที่จะไหลเข้าตัวนับแบบนับลง ได้จาก Z-80 CPU ซึ่งอยู่บนหน่วยแกนที่ 1 ส่งผ่านทาง 74LS 273 ซึ่งเป็นแลทช์พอร์ทเอาต์พุต (Latch Output Port)

สัญญาณควบคุมต่าง ๆ จะถูกสร้างขึ้นให้มีลักษณะตามแผนภูมิเวลาที่ต้องการ โดยการนำตัวนับร่วมกับดีฟลิปฟล็อป (D-Flip Flop) ร่วมกับเกตอื่น ๆ

QD0-QD11 เป็นค่าที่จะอ่านเข้ามายังส่วน Z-80 CPU เพื่อดูว่าในขณะที่หนึ่ง ๆ ตัวนับนับไปเหลือค่าอยู่เท่าใด

A0-A11 เป็นค่าเอาต์พุตจากตัวนับแบบนับขึ้น ซึ่งจะนำไปเป็นสัญญาณสแกนเลือกข้อมูลจากวงจรชุดที่ต้องการ โดยจะนำไปดีโค้ดเลือกผ่านดีโค้ดเตอร์ 4 ออก 16 (74LS154) ดังในภาพ สัญญาณนี้จะไปต่อเข้ากับ ขาอินพุต (ขา C) ของอนาล็อกมัลติเพลกเซอร์บนแผ่นวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์

การดีโค้ดเลือกข้อมูลจากวงจรที่ต้องการใช้

A2-A5 เลือกแผ่นวงจร 16 แผ่น ภายใน 1 แบนด์ (บนแต่ละแผ่นมีวงจรภาครับ จำนวน 4 ชุด)

A6 เลือกแบนด์ 0 หรือ แบนด์ 1

A0,A1 ใช้เลือกวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ว่าจะเลือกวงจรชุดใด ใน 4 ชุด บนแผ่นวงจรแต่ละแผ่น โดยต่อเข้ากับขาอินพุต (ขา A,B) ของอนาล็อกมัลติเพลกเซอร์บนแผ่นวงจรภาครับ และต้องต่อเป็นสัญญาณคอมมอนสำหรับแผ่นวงจรทั้งหมด 32 แผ่น

ค่า A0-A11 และ QD0-QD11 สามารถอ่านเข้ามายังส่วน CPU โดยผ่านพอร์ทอินพุตซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ 74LS244

หมายเลขพอร์ทอินพุตเอาต์พุตที่ใช้

ข้อมูล

หมายเลขพอร์ท

QD0-QD7

F8h

QD8-QD11

F9h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล	หมายเลขพอร์ต
A0-A7	FAh
A8-A11	FBh
D0-D7	FCh
D8-D11	FDh

2.4 ส่วนแปลงสัญญาณเอ็กซ์เรย์เป็นข้อมูลเชิงเลข

เมื่อมีการรับสัญญาณเอ็กซ์เรย์จากวงจรถ่ายภาพเอ็กซ์เรย์ ข้อมูลที่ได้จะเป็นสัญญาณอนาล็อก จึงต้องมีการแปลงข้อมูลจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อให้ได้ข้อมูลซึ่งจะนำไปประมวลผลในการสร้างภาพตัดขวาง (Image Reconstruction) ต่อไป

การทำการแปลงข้อมูลจากอนาล็อกไปเป็นดิจิทัล (A/D) ได้ใช้บอร์ด DT-2827 ของบริษัท Data Translation, Inc. มาอินเตอร์เฟซ กับเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีเอที (PC-AT) หรือเครื่องที่คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ รวมทั้งเขียนซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของบอร์ดแปลงสัญญาณข้อมูลเป็นดิจิทัล (A/D Board) โปรแกรมชื่อ CT-A/D และจัดเก็บแฟ้มข้อมูลเพื่อที่จะนำไปประมวลผลสร้างภาพตัดขวาง (Image Reconstruction) ต่อไป

นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการแปลงข้อมูล เมื่อนำมาพล็อตกราฟ ยังจะสามารถบ่งบอกถึง คุณสมบัติ (Characteristics) ของสัญญาณเอ็กซ์เรย์ ด้วยว่ามีคุณสมบัติหรือเกิดปัญหาอะไรบ้างในการใช้งานจริง

ในระบบการแปลงสัญญาณข้อมูลเป็นดิจิทัล ต้องใช้สัญญาณควบคุมที่สร้างมาจากหน่วยวงจรถ่ายภาพ สัญญาณที่จะนำมาเป็นสัญญาณสั่งให้แปลงข้อมูล คือ สัญญาณ Conv

เหตุผลสำคัญที่เลือกใช้บอร์ด DT-2827 นี้ก็เพราะต้องการอัตราเร็วในการทำงานสูง (high speed) บอร์ดมีรีโซลูชันในการแปลงสัญญาณ 16 บิต (16 bits resolution) โดยทำงานด้วยความเร็วสูงมาก ความถี่สูงสุดในการแซมปลิงสัญญาณ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ดังนั้นจึงสามารถได้ข้อมูลดิจิทัลเข้าสู่หน่วยความจำของระบบ 100,000 ข้อมูลในเวลา 1 วินาที โดยที่ได้อัตราการเสียเวลาในช่วงที่อนาล็อกมีดีเฟกต์เซอร์ที่อยู่บนบอร์ด

2.4.1 โครงสร้างของ A/D board DT-2827

DT-2827 ใช้โมดูล DT5726 ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล รับสัญญาณอินพุตแบบดิฟเฟอเรนเชียล ได้ 4 แชนแนล บนบอร์ดจะมีมัลติเพลกเซอร์ซึ่งจะมัลติเพลกซ์เลือกเอาสัญญาณเพียง 1 แชนแนลในช่วงเวลาใด ๆ ไปทำการแปลงข้อมูลโดยโมดูลแล้วส่งข้อมูลออกผ่านทางบัสข้อมูล 16 บิต (16 bits data bus)

มีรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต อยู่ 8 ตัว เพื่อใช้ควบคุมการทำงาน และคอยตรวจเช็คสถานะต่าง ๆ ของบอร์ด รีจิสเตอร์ทั้ง 8 ตัว มีดังต่อไปนี้

1. รีจิสเตอร์สถานะและควบคุมการแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล
(A/D Control/Status register)
2. รีจิสเตอร์สถานะและกำหนดแชนแนล
(Channel-Gain List Control/Status register)
3. รีจิสเตอร์ข้อมูลการแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D Data register)
4. รีจิสเตอร์สถานะและควบคุมการแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก
(D/A Control/Status register)
5. รีจิสเตอร์ข้อมูลการแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก (D/A Data register)
6. รีจิสเตอร์อินพุตเอาต์พุตค่าดิจิตอล (DIO Data register)
7. รีจิสเตอร์ควบคุมสถานะและการทำงาน (Supervisory Control/Status register)
8. รีจิสเตอร์กำหนดความถี่สัญญาณนาฬิกา (Pacer Clock register)

มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. รีจิสเตอร์สถานะและควบคุมการแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล

การเข้าถึง : อ่านและเขียนได้

มีหน้าที่ในการควบคุมส่วนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยจะใช้ในการทำ

- อินาเบิ้ลการส่ง อินเตอร์รัพท์ (Interrupt) ไปยังซีพียู เมื่อทำการแปลงข้อมูลเสร็จแต่ละครั้ง (A/D Done Interrupt) รวมทั้งเป็นการอนุญาตให้เกิดการอินเตอร์รัพท์ เมื่อทำการบวกรวมการดีเอ็มเอ (DMA) เสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- รายงานสถานะความผิดพลาดในการแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลดิจิตอล (A/D error) ถ้าเกิด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

- รายงานสภาวะของอนาล็อกมัลติเพล็กซ์เซอร์บนบอร์ด ว่าว่างอยู่หรือไม่
 - อินาเบิลสัญญาณนาฬิกา เพื่อจะเริ่มการแปลงข้อมูล
 - ใช้รับข้อมูลซึ่งเป็นหมายเลขแชนแนล ที่จะไหลคเข้ามาเพื่อเลือกแชนแนล ในการแปลงข้อมูล
- ความผิดพลาดอันจะทำให้เกิด A/D error

อาจเนื่องมาจาก

1. การพยายามทำการแปลงข้อมูลเป็นดิจิตอล ขณะที่โมดูลยังไม่ว่าง
2. การพยายามทำการแปลงข้อมูลเป็นดิจิตอล ขณะที่เส้นทางเดินข้อมูลการดีเอ็มเอ (DMA pipeline) ยังเต็มอยู่ นั่นคือขณะที่บัฟเฟอร์บนโมดูล (Module Buffer) และ บัฟเฟอร์บนหน่วยความจำหลักของระบบ (Data Buffer) กำลังเต็มอยู่แล้ว
3. การพยายามทริกบอร์ด ให้เริ่มการสแกน เมื่อทำงานในโหมดทริกเกอร์สแกน (Triggered scan) และยังทำการสแกนครั้งก่อนไม่เสร็จ
4. การทริกบอร์ด ให้ทำการระบวนการดีเอ็มเอ เมื่อทำงานในโหมดนอนสแกนดีเอ็มเอ (Non-scan DMA)

2. รีจิสเตอร์สถานะและกำหนดแชนแนล

การเข้าถึง : อ่านและเขียนได้

ใช้ในการเลือก และตรวจสอบแชนแนล ในการทำงานโดยการเขียน (write) ค่าหมายเลขแชนแนลที่ต้องการเข้าไป ถ้าเขียนเกินจำนวนที่กำหนด ค่าแชนแนลที่เกินจะ ไปเขียนทับค่าหมายแชนแนล ค่าแรก ๆ

3. รีจิสเตอร์ข้อมูลการแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล

การเข้าถึง : อ่านได้เท่านั้น

ใช้เก็บค่าข้อมูลดิจิตอล ที่ได้จากการแปลงข้อมูลจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล ข้อมูลจะเก็บในแบบเลขฐานารี 16 บิต 2'S (two complement) ดังตารางในภาพที่ 2.4.1ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% OF FULL SCALE	DIGITAL CODING	ANALOG VOLTAGES GAIN OF 1
+FS - 1 LSB	7FFF	+9.999695V
+FS - 2 LSBS	7FFE	+9.999390V
+½ FS	4000	+5.000000V
+1 LSB	0001	+305.1758 μ V
0	0000	0.000000V
-1 LSB	FFFF	-305.1758 μ V
-½ FS	C000	-5.000000V
-FS + 1 LSB	8001	-9.999695V
-FS	8000	-10.000000V

ภาพที่ 2.4.1ก

4. รีจิสเตอร์สถานะและควบคุมการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก

การเข้าถึง : อ่านและเขียนได้

การใช้งานควบคุมการทำการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ซึ่งเราไม่มีการใช้งาน

5. รีจิสเตอร์ข้อมูลการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก

การเข้าถึง : อ่านและเขียนได้

ใช้เก็บข้อมูลดิจิตอล ที่จะใช้แปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าอนาลอก ซึ่งเราไม่มีการใช้งาน

6. รีจิสเตอร์อินพุทเอาต์พุทค่าดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การเข้าถึง : อ่านและเขียนได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในการอ่านค่าดิจิตอลจากภายนอก (inport) และ เขียนค่าดิจิตอล (outport) ซึ่งสามารถจะมาทำการควบคุมการทำงานบนบอร์ด หรือ เพื่อไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกให้ทำงานสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่ต้องการให้บอร์ดทำการแปลงข้อมูล

7. รีจิสเตอร์ควบคุมสถานะการทำงาน

การเข้าถึง : อ่านและเขียนได้

เป็นรีจิสเตอร์ที่มีความสำคัญมาก ใช้ควบคุมการทำงานหลัก ๆ ของระบบ อันได้แก่การทำงานดังต่อไปนี้

- การอินิเชียล (Initialization) จะทำให้บอร์ดเคลียร์ค่าแฟล็กความผิดพลาด (Error Flag) ต่าง ๆ ให้เป็นศูนย์ เพื่อเป็นการรีเซ็ตระบบใหม่
- ควบคุมการเกิดอินเตอร์รัพท์ โดยบังคับว่าจะยอมให้เกิดการอินเตอร์รัพท์ ไปยังซีพียูหรือไม่เมื่อเกิดสถานะ A/D error หรือ D/A error
- เลือกโหมดการทรีตเอ็มเอ ผ่านทางรีจิสเตอร์ควบคุมสถานะนี้ ได้แก่
 - mode 0 : ไม่ทำ DMA (PIO)
 - mode 1 : A/D clocked DMA
 - mode 2 : D/A clocked DMA
 - mode 3 : A/D triggered scan DMA
- การเลือกแหล่งกำเนิดความถี่การแซมปลิง (Sampling Rate) ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ว่าจะ เป็น สัญญาณนาฬิกาจากภายในบอร์ด (Internal source) หรือ เป็น สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก (External source) รวมทั้งเลือกว่าจะใช้สัญญาณทริกเริ่มทำงาน (trigger) ว่าจะ เป็นแบบทริกด้วยซอฟต์แวร์ (Software trigger) หรือ แบบสัญญาณทริกจากภายนอก (external trigger)

8. รีจิสเตอร์กำหนดความถี่สัญญาณนาฬิกา

การเข้าถึง : อ่านและเขียนได้

บนบอร์ดจะมี แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา 4 เมกะเฮิร์ต (MHz) ซึ่งสามารถโปรแกรมเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สัญญาณนาฬิกาความถี่ค่าต่าง ๆ ที่ต้องการได้ ผ่านทางรีจิสเตอร์นี้ โดยการป้อนค่าตัวหารไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

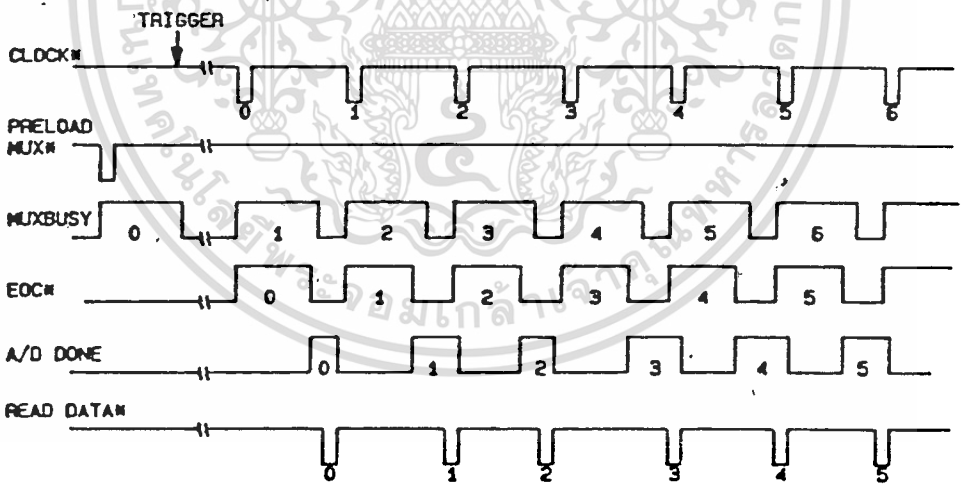
ความถี่เบื้องต้น (Prescaler) กับ ค่าตัวหารความถี่ลำดับที่สอง (Divider) นำไปหาร สัญญาณนาฬิกาความถี่ 4 เมกะเฮิร์ต จะได้สัญญาณแซมปลิ่งมีความถี่ค่าที่ต้องการได้ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$X = 255 - (400,000/2^N / F)$$

- เมื่อ X = ค่าตัวหารลำดับสองของรีจิสเตอร์กำหนดความถี่
 N = ค่าตัวหารเบื้องต้นของรีจิสเตอร์กำหนดความถี่
 F = ค่าความถี่ในการแซมปลิ่งที่ต้องการ (เฮิร์ต)

ขั้นตอนในการแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล

การทำงานการแปลงข้อมูลสำหรับบอร์ด DT-2827 มีการทำงานในลักษณะที่มีการโอเวอร์แลป (OVERLAP) กันระหว่างการทำงานในแต่ละ แชนแนลมีลักษณะดังต่อไปนี้ สำหรับแผนภูมิการทำงานจะเป็นไปดังภาพที่



ภาพที่ 2.4.1ข แผนภูมิเวลาการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

ขั้นตอน

อนาลอกมัลติเพลกเซอร์บนบอร์ดจะ เอาสัญญาณอินพุต 1 เส้น จาก 4 เส้น ตามแอด

เดรสของแชนแนล (Channel Address) ที่ได้มีการโหลดไว้ก่อนแล้วในตารางเลือกแชนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ในรีจิสเตอร์เลือกแชนแนล ขณะที่มีการเอาสัญญาณอินพุตนี้มาจะ ทำให้ มัลติเพลกเซอร์ไม่วาง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(settling) เมื่อว่างแล้ว วงจรแซมเปิ้ลและโฮลจะเอาสัญญาณอินพุทที่เลือกมา แซมเปิ้ล
เมื่อมีสัญญาณทริกเกอร์ เข้ามาก็เป็นการกำหนดการเริ่มการสแกนข้อมูลในแชนแนลแรก เมื่อ
มีสัญญาณนาฬิกาถูกแรกมา ก็จะมีโฮลค่าสัญญาณอินพุทไว้ และตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล
(A/D Converter) จะเปลี่ยนค่าสัญญาณอนาลอกโวลเตจไปเป็นค่าข้อมูลดิจิตอล

เสร็จแล้ว ก็จะมีการโหวลตแอดเรสของแชนแนลต่อไป ตามตาราง เลือกแชนแนลแล้วก็
ทำงานตามขั้นตอนเดิม

โหมดในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

มีการทำ A/D conversion อยู่ 4 โหมด มีรายละเอียดในการทำงาน ดังต่อไปนี้

1. โหมดซิงเกิ้ลแชนแนลนอนดีเอ็มเอ (Single-Channel Non-DMA mode)

เป็นการแปลงข้อมูล 1 ครั้ง (1 conversion) บนแชนแนลหนึ่ง ๆ ที่ถูกเลือก แล้วหยุดทำโดย
ที่ข้อมูลที่อยู่ ในรีจิสเตอร์ข้อมูล จะสามารถถ่ายเข้ามาเก็บในหน่วยความจำของระบบได้โดย
การอ่านจากรีจิสเตอร์ข้อมูล ซึ่งเป็นเสมือนพอร์ทอินพุทพอร์ทหนึ่ง

2. โหมดซิงเกิ้ลแชนแนลดีเอ็มเอ (Single-Channel DMA)

เป็นการแปลงข้อมูลโดยใช้การส่งข้อมูลด้วยการทำดีเอ็มเอ โดยเมื่อมีสัญญาณทริกเกอร์หนึ่ง
ลูกจะเริ่มทำการแปลงข้อมูล ด้วยอัตราความถี่การแซมปลิ่งที่บ่อนำให้กับโมดูล จนกระทั่งได้ข้อ
มูลครบตามจำนวนที่โปรแกรมของบัฟเฟอร์ไว้สำหรับการทำดีเอ็มเอ ซึ่งอยู่ในหน่วยความจำ
ของเครื่องคอมพิวเตอร์พีซี-เอที (DMA buffer) ก็จะหยุดการทำการแปลงข้อมูล การถ่าย-
เทข้อมูลจะกระทำโดยวงจรจัดการดีเอ็มเอ

- ถ้าเป็นโหมดซิงเกิ้ลแชนแนลดีเอ็มเอ จะเลือกจำนวนบัฟเฟอร์ ได้ถึง 64 กิโลไบต์ (KByte)

- ถ้าเป็นโหมดที่ใช้การทำดีเอ็มเอ 2 แชนแนล (Dual-DMA channel) จะเลือกจำนวนบัฟ
เฟอร์ให้มีขนาดมากเท่าไรก็ได้

3. โหมดทริกเกอร์สแกนดีเอ็มเอ (A/D Triggered Scan DMA mode)

เป็นการแปลงข้อมูลเป็นดิจิตอล โดยที่จะสแกนหาเฉพาะแชนแนล ที่โปรแกรมไว้ในตาราง

เลือกแชนแนล เมื่อมีสัญญาณทริกเกอร์ 1 ลูกก็จะสแกน 1 ครั้ง เมื่อทำการสแกนเสร็จแต่ละ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้ง ก็จะมีสัญญาณทรiggerเกอร์ลูกต่อไป ส่งให้มีการเริ่ม scan ครั้งต่อไป เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ข้อมูลเต็มทีเอ็มเอบัฟเฟอร์ที่จองไว้ แล้วสัญญาณนาฬิกาในการแชนบ์ลิ่งจะถูกคิสเอเบิล และจะหยุดการทำงาน

4. โหมดคล็อกดีเอ็มเอ (A/D Clocked DMA)

โหมด นี้คล้าย ๆ กับโหมดทรiggerเกอร์สแกนดีเอ็มเอ แต่มีข้อแตกต่างกันที่ว่าโหมดนี้จะทำการแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลดิจิทัลอย่างต่อเนื่อง โดยจะกลับไปเริ่มทำการสแกนใหม่จนกว่าจะได้ข้อมูลครบตามที่ต้องการ ซึ่งในการทดลองยิงรังสีเอ็กซ์ เพื่อทดสอบคุณสมบัติของสัญญาณรังสีเอ็กซ์ที่เข้า ก็ใช้การทำงานในโหมดนี้

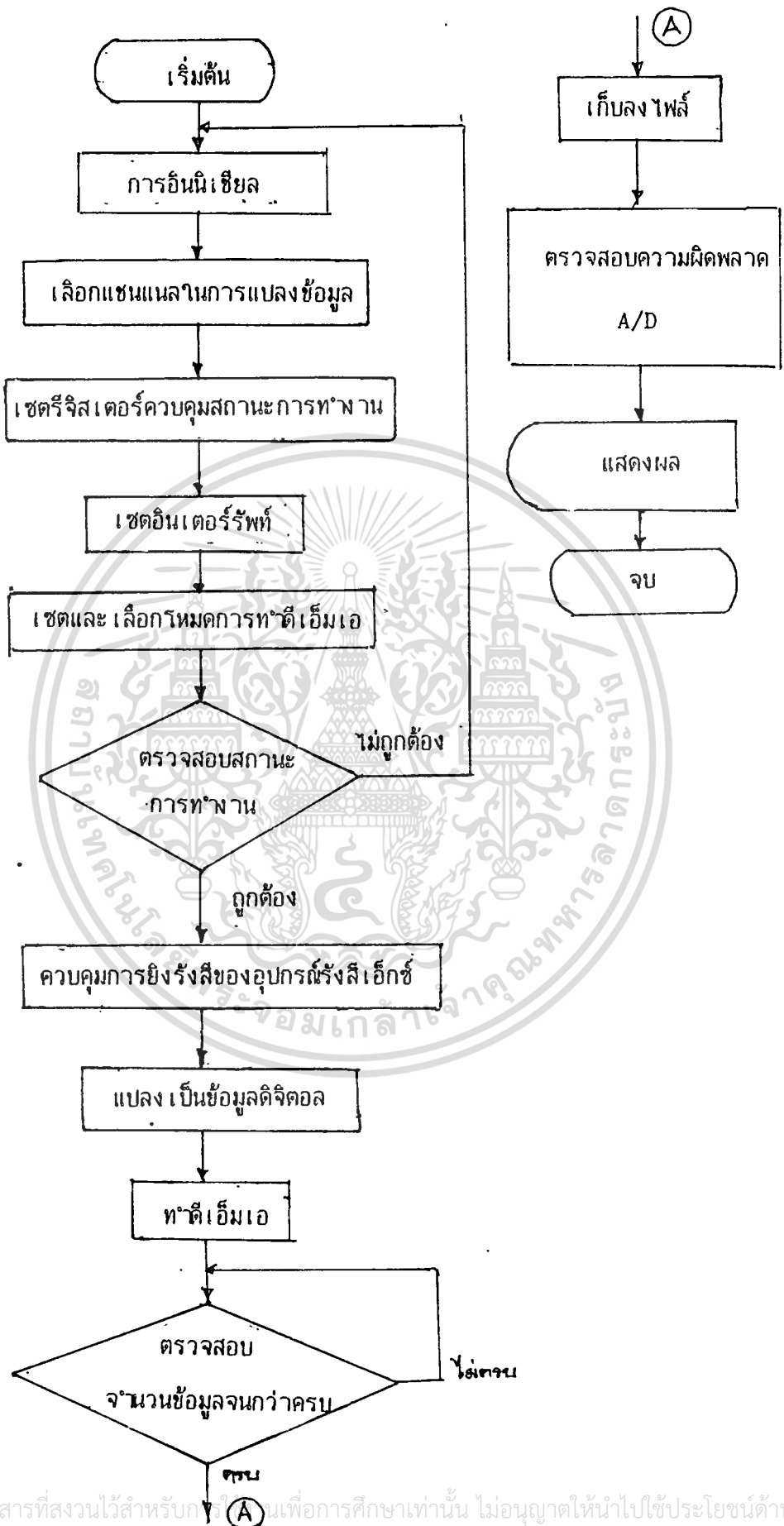
2.4.2 ส่วนโปรแกรมควบคุมการทำงาน

ซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นใช้ในการควบคุมการทำงานของ A/D Board ชื่อ CT-A/D ซึ่งเขียนด้วยภาษาปาสคาล เวอร์ชัน 5.0 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม CT-A/D

สมมติว่า ได้โปรแกรม DMA Controller (8237-5) เรียบร้อยแล้ว ก็จะมีขั้นตอนหลัก ๆ คือ

1. การอินนิเชียล
2. การเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการทำงาน
3. เลือกอินพุตเซนแนล
4. การแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลดิจิทัล
5. การดำเนินการกับ ข้อมูลดิจิทัลที่ได้มา
6. การแสดงผล (display) และคุณผลการทดลองที่ได้ รวมทั้งรายงานสภาวะความผิดพลาดใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น

ขั้นตอนต่าง ๆ แสดงได้ดังจะ เห็นได้จากโพลชาร์ทในภาพที่ 2.4.2ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาพที่ 2.4.1ค โพลซาร์ทการทำงานของโปรแกรม CT-A/D

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในการคำนวณและการสร้างวงจรที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 2 ดังมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสาม

จากสมการ (2.1.2) วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับหนึ่ง เมื่อ

$$A_o = \text{อัตราขยายที่ถี่ซี}$$
$$= 10 \cdot 10^6 \text{ V/A}$$

$$\omega_o = \text{ความถี่คัทออฟ}$$
$$= 2 \pi F_t$$

โดยที่

$$F_t = (F_s) (\pi D / T_s)$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับระบบที่ใช้ทดลอง คือ

$$D = 750 \text{ mm.}, T = 2 \text{ sec.} \text{ และ } F_s = 1/2$$

เพราะฉะนั้น

$$F_t = 600 \text{ เฮิรต}$$

และ

$$\omega_o = 2 \pi \cdot 600 \text{ เรเดียนต่อวินาที (rad/sec)}$$

จากค่า A_o และ ω_o ที่ต้องการ

เพราะฉะนั้น

$$R_1 = 10 \text{ เมกะ โอม}$$

$$C_1 = 27 \text{ พิโคฟารัด (pF)}$$

และสำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสอง ตามภาพที่ 2.1.7 เมื่อ $\omega_o = 2 \pi \cdot 600$

เรเดียนต่อวินาที รวมทั้งหลังการสเกลจนได้ค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมแล้ว

$$C_2 = 0.01 \text{ ไมโครฟารัด (uF)}$$

$$C_3 = 0.047 \text{ ไมโครฟารัด}$$

$$R_2 = R_3 = 12 \text{ กิโลโอม (k)}$$

อนึ่ง สำหรับออปแอมป์ที่เหมาะสมกับวงจรเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก โดยเฉพาะ A1 ควร มีคุณสมบัติทางดีซีใกล้เคียงกับในอุดมคติมากที่สุด เช่นมีออฟเซตน้อย สัญญาณรบกวนต่ำ และ

อินพุตอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งในขั้นแรกนี้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ LF356 เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราคาถูก และมีคุณสมบัติดีกว่าเบอร์อื่นที่มีอยู่ในท้องตลาดเวลานี้

ส่วนการออกแบบแผ่นวงจรมีการติดตั้ง (Guard Ring) ล้อมรอบขาอินพุท แล้วต่ออาร์ตริงเข้ากับกราวด์ ทั้งนี้เพื่อลดความต้านทานพาราซิติก อันเกิดจากความสกปรกของแผ่นวงจรมีพิมพ์ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลได้

3.2 วงจรชดเชยความผิดพลาด

ปัญหาที่สำคัญของวงจรนี้ คือการดิสชาร์จของคาปาซิเตอร์ C4 ซึ่งจะทำให้การชดเชยผิดพลาดได้ ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีกระแสคลาดเคลื่อนต่ำจึงจำเป็นมาก ในที่นี้เลือกใช้ C4 ค่า 0.39 ไมโครฟารัด แบบโพลีโพรพิลีน เนื่องจากเป็นชนิดที่มีความต้านทานขนานสูงที่สุดในเวลานี้ที่มีขนาดความจุมาก ๆ ได้ รวมทั้งเลือกใช้ออปแอมป์ A4 เบอร์ LF444 ซึ่งมีไบอัสเคอร์เรนซ์ต่ำมาก (5-500 พิโคแอมป์) และอนาล็อกสวิตช์ (SW1) เบอร์ CD4066 ซึ่งมีกระแสรั่วไหลในขณะเปิดวงจรถ้า (ประมาณ 1 นาโนแอมป์)

ดังนั้นสำหรับเวลาการสแกนสูงสุด 10 วินาที

$$Cdv_c/dt = i_c$$

เมื่อ i_c คือกระแสชาร์จหรือดิสชาร์จ C4 ซึ่งเกิดจากการรั่วไหลต่าง ๆ โดยพิจารณาให้ผลของกระแสรั่วไหลจากอนาล็อกสวิตช์ มีผลต่อวงจรสูงสุด

เพราะฉะนั้น

$$v_c = 10 \times 10^{-9} / (0.39 \times 10^{-6}) = 25 \text{ มิลลิโวลต์}$$

และจากภาพ สำหรับ $R5 = 10$ กิโลโห์ม และ $R6 = 100$ โหห์ม

$$v_c = 0.25 \text{ มิลลิโวลต์}$$

ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

3.3 วงจรแซมเบิลแอนด์โฮล

สำหรับระบบที่ใช้ กำหนดให้เวลาที่ใช้นเวลาการโฮลข้อมูลสูงสุด 20 มิลลิวินาที (เพื่อให้สำหรับการขยายระบบในอนาคตต่อไป) และให้กระแสรั่วไหลส่วนใหญ่เกิดจากอนาล็อกสวิตช์ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้
เพราะฉะนั้น $\Delta v = 20 \times 10^{-3} \times 10^{-9} / (0.22 \times 10^{-6})$ ระเบียบขั้นตอนการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.1 \text{ มิลลิโวลท์}$$

และเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2 C ที่ใช้ควรมีค่ารีซิสแตนซ์ขั้วขาที่สูงสุด และใช้โอปอแอมป์ที่มีกระแสไอส์ค่า ในที่นี้เลือก LF356

และเนื่องจาก $R7+rs$ (rs คือ ความต้านทานขั้วขาปิดวงจรของอานาลอกสวิทช์) และ $C5$ ต่ออยู่ในลักษณะวงจรรองความถี่ต่ำ แต่เนื่องมาจากมีความถี่คัตออฟสูงกว่าช่วงสัญญาณใช้งานมาก (เป็นกิโลเฮิร์ต) จึงไม่มีผลต่อขนาดสัญญาณ สำหรับ $R7$ ต่อไว้เพื่อไม่ให้วงจรขยายภาคก่อน (Pre-Amplifier) จ่ายกระแสมากเกินไปขณะสวิทช์ $SW2$ ปิดวงจร เมื่อค่าประจุใน $C5$ ขณะนั้นเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสที่ซาร์จ $C5$ สูงสุดจึงไม่เกิน $V_i/(R7+rs)$ และถ้าค่า $R7 = 100$ โอห์ม, $rs = 100$ โอห์ม, $V_i = 5$ โวลท์ ค่ากระแสสูงสุดจะมีค่าประมาณ 25 มิลลิแอมป์ ซึ่งเป็นค่าที่วงจรป้องกันลัดวงจรในออปอแอมป์เริ่มทำงาน ดังนั้นวงจรขยายภาคก่อน (วงจรรองความถี่ต่ำ) จึงทำงานอยู่ในลักษณะเชิงเส้นเสมอ ส่วน $R8 = 10$ กิโลโอห์ม ใส่ไว้เพื่อป้องกันภาคอินพุทของออปอแอมป์จากประจุใน $C5$ โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดจ่ายไฟถูกปิด

สำหรับ $R9$ และ $VR1$ ต่อเข้ากับ $A4(LF356)$ เพื่อเป็นวงจรบัฟเฟอร์และปรับอัตราขยาย เพื่อให้วงจรแต่ละชุดมีอัตราขยายเท่ากัน ซึ่งสาเหตุของความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เกิดจากค่า $R1$ ซึ่งในกรณีนี้มีความผิดพลาด ± 5 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยายวงจรรองความถี่ต่ำ สูงสุด } G_f \Big|_{\max} &= (10+0.5) * 10^6 \text{ โวลท์ต่อแอมป์} \\ &= 10.5 * 10^6 \text{ โวลท์ต่อแอมป์} \\ \text{อัตราขยายวงจรรองความถี่ต่ำ ต่ำสุด } G_f \Big|_{\min} &= (10-0.5) * 10^6 \text{ โวลท์ต่อแอมป์} \\ &= 9.5 * 10^6 \text{ โวลท์ต่อแอมป์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อให้ } G_s &= \text{อัตราขยายของวงจรแอมป์เปิดแอนด์โวล} \\ &= (1 + (R9/VR1)) \quad \text{โวลท์ต่อโวลท์ (V/V)} \end{aligned}$$

$$\text{และ } G = G_f * G_s \quad \text{โวลท์ต่อแอมป์}$$

$$\text{ทำให้ } G = G_f \Big|_{\max} * G_s \Big|_{\min} \quad \text{โวลท์ต่อแอมป์}$$

$$= 10.5 * 10^6 (1 + (R9/VR1_{\max})) \text{ โวลท์ต่อแอมป์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และเพื่อให้สามารถปรับอัตราขยายได้เท่ากันในทุกกรณี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & G_f \Big|_{\min} * G_s \Big|_{\max} \geq G_f \Big|_{\max} * G_s \Big|_{\min} \\
 \text{เพราะฉะนั้น} \quad & G_s \Big|_{\max} \geq 10.5 * 10^6 (1 + (R9/VR1_{\max})) / (9.5 * 10) \\
 & (1 + (R9/VR1_{\min})) \geq (10.5/9.5) (1 + (R9/VR1_{\max}))
 \end{aligned}$$

กำหนดให้ $VR1_{\min} = 2$ กิโลโหม์ม (เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน)

เลือก $VR1$ ค่า 50 กิโลโหม์ม (ซึ่งเท่ากับ $VR1_{\max}$)

เพราะฉะนั้น $R9 \geq 220$ โหม์ม

เลือก $R9 = 500$ โหม์ม เพื่อชดเชยปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาคิด และลดกระแสที่ A4 ต้องจ่ายลงอีกด้วย

3.4 วงจรมัลติเพลกซ์

เลือกใช้มัลติเพลกเซอร์แบบ 8 ออก 1 เนื่องจากในการออกแบบต้องใช้การมัลติเพลกซ์ 5 ออก 1 เป็นอย่างน้อย (ขาสัญญาณอินพุต 4 ขา และขาต่อกราวด์สำหรับขาช่วงที่ไม่ได้เลือกสัญญาณจากมัลติเพลกเซอร์ตัวนั้น) ดังนั้นจึงเลือกไอซีเบอร์ CD4051

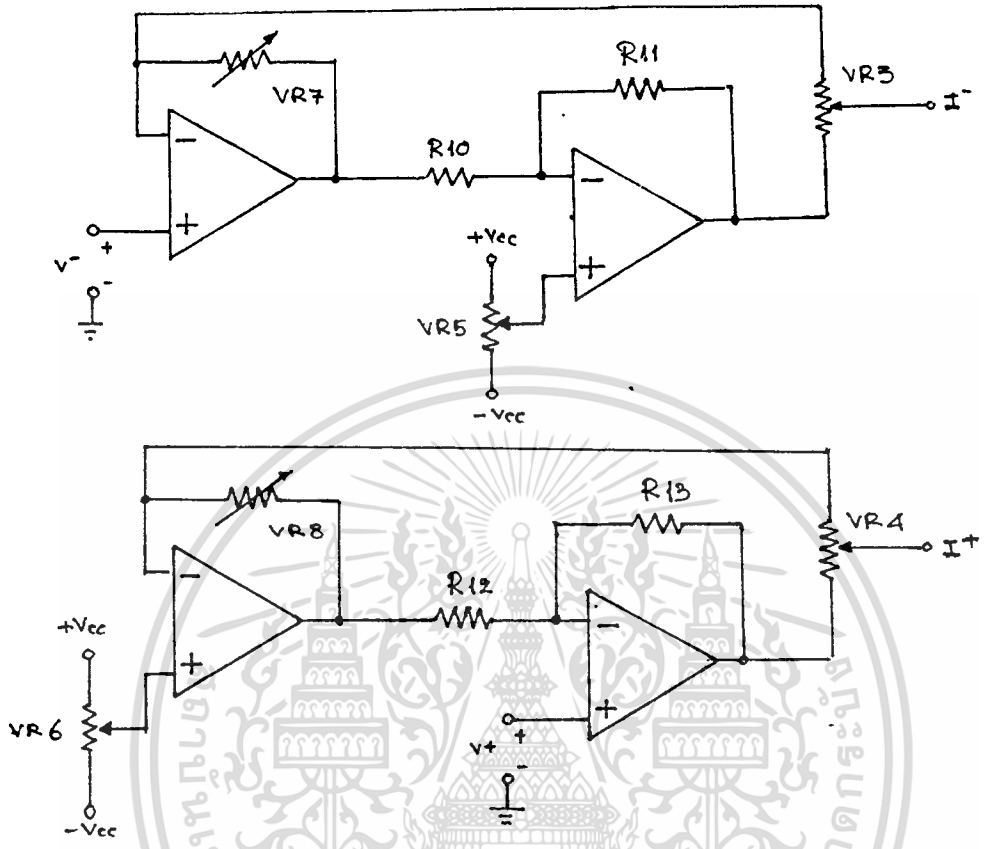
3.5 วงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส

จากสมการ 2.1.15, 2.1.16

กำหนดให้ $R_o \geq 10$ เมกะโหม์ม

และ $i_o/V_{in} = 10^{-3}$ แอมป์ต่อโวลท์

จากภาพที่ 3.5.1 เลือก R_{10}, R_{11}, R_{12} และ R_{13} เท่ากับ 20 กิโลโหม์ม เพื่อให้สูญเสียพลังงานน้อยลง ส่วน VR_3, VR_4 เท่ากับ 20 กิโลโหม์ม และ VR_5, VR_6, VR_7, VR_8 เท่ากับ 25 กิโลโหม์ม โดยที่ VR_3, VR_4 ใช้ในการปรับเกน VR_5, VR_6 ใช้ปรับค่าออฟเซตต่าง ๆ VR_7, VR_8 ใช้ปรับให้เอาท์พุทรีซิสแตนซ์มีค่าสูง

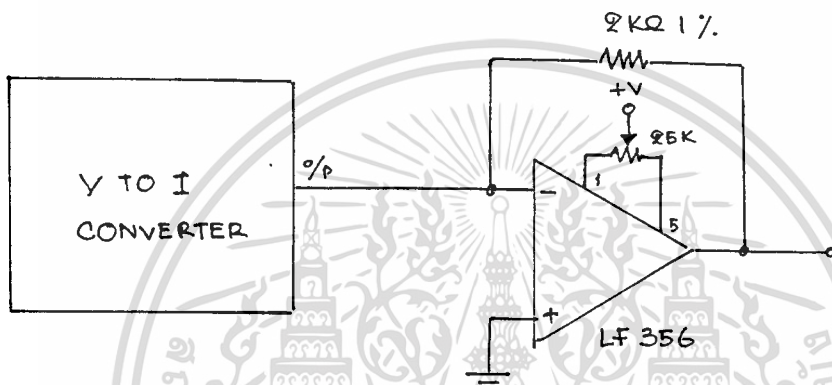


ภาพที่ 3.5.1

ส่วนขั้นตอนการปรับแต่งวงจร กำหนดไว้ดังนี้

- 1) ปรับค่า VR3 และ VR4 จนได้ความต้านทานซึ่งแทนด้วย R4 ในภาพที่ 2.1.14 - ประมาณ 2 กิโลโหม์
 - 2) ปรับค่า VR5, VR6 มาไว้ที่ประมาณกึ่งกลาง (12.5 กิโลโหม์)
 - 3) ปรับค่า VR7, VR8 ให้ได้ค่าประมาณ 20 กิโลโหม์
- โดยทั้ง 3 ขั้วซีมีเตอร์วัด
- 4) ประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ท้าการต่ออินพุตลงกราวด์และต่อเอาต์พุตของ I+ เข้ากับวงจรดังในภาพที่ 3.5.2 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5.2

ปรับ VR5 จนค่าเอาต์พุตเท่ากับศูนย์ และทวเช่นเดียวกันกับวงจรส่วน I^-

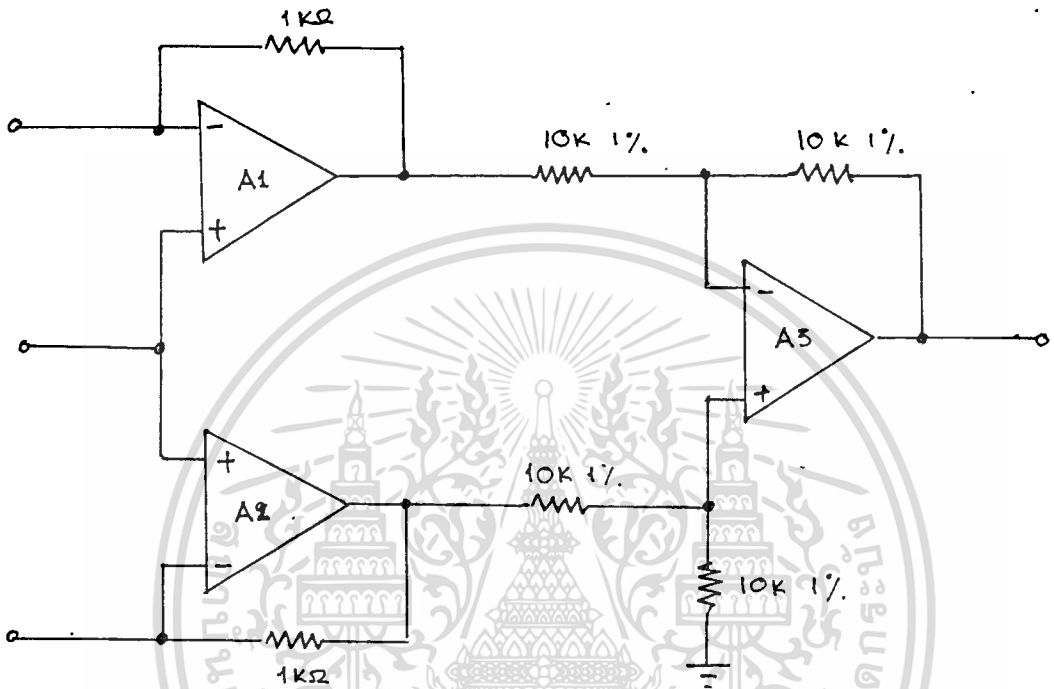
5) ป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่ประมาณ 50-100 เฮิร์ต ขนาด 2 Vpp ปรับ VR3 หรือ VR4 แล้วแต่กรณี จนได้ค่าเอาต์พุตเท่ากับโวลเตจที่ป้อนเข้าไป

6) ต่ออินพุตลงกราวด์ ต่อเอาต์พุตเข้ากับ R ค่า 5 เมกะโอห์ม ปรับ VR7 (หรือ VR8 แล้วแต่กรณี จนโวลเตจเอาต์พุตอิ่มตัว ปรับกลับมาจนเอาต์พุตเป็นศูนย์ (หรือใกล้ศูนย์) ซึ่งแสดงว่า ค่าเอาต์พุตอิ่มพีแดนซ์ของวงจรโวลเตจเป็นกระแสมีขนาดมากกว่า 5. เมกะ โอห์ม (อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้)

3.6 วงจรแปลงกระแสเป็นโวลเตจแบบดิฟเฟอเรนเชียล

จากภาพ 3.6. เนื่องจาก I_{in} สูงสุดเท่ากับ 5 มิลลิแอมป์ และโวลเตจไฟเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็น ± 12 โวลต์ เพราะฉะนั้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6

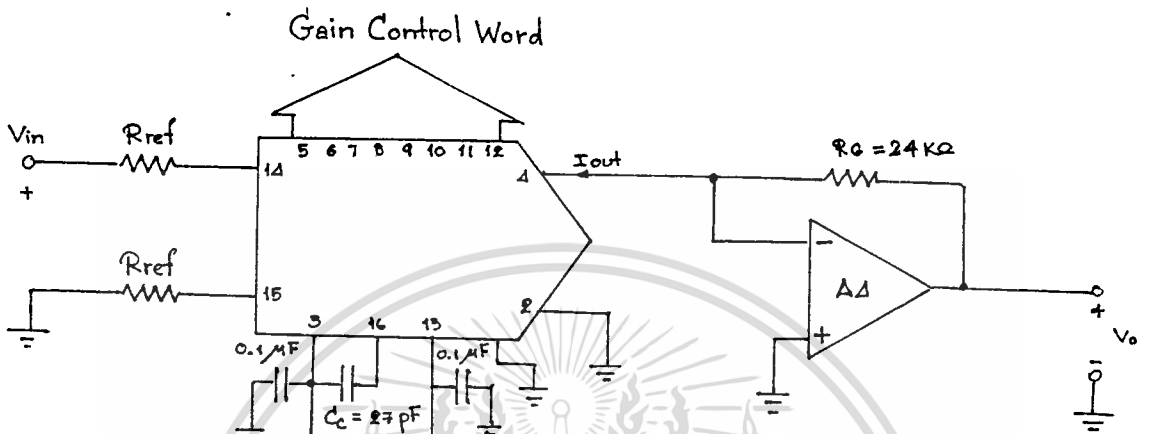
เลือกค่า $R_1 = R_1' = 1$ กิโลโห์ม ส่วนค่า $R_2 = R_2', R_3 = R_3'$ เลือกค่าเป็น 10 กิโลโห์ม เพื่อให้สัญญาณรบกวนต่ำ และมีการสูญเสียพลังงานน้อย ซึ่งจะทำให้โหลดแรงดัน V_O มีค่าสูงสุดประมาณ 10 โวลต์

A1, A2, A3 ใช้ออปแอมป์ที่มีคุณภาพสูง (ในที่นี้ใช้ LF356 ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีพอที่จะใช้งานได้ และราคาไม่แพง) และการเลือกค่า R_2, R_2' และ R_3, R_3' ควรมีค่าใกล้เคียงกันมากเท่าที่จะทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 วงจรขยายแบบปรับค่าได้

มีรายละเอียดค่าอุปกรณ์ดัง ภาพที่ 3.7

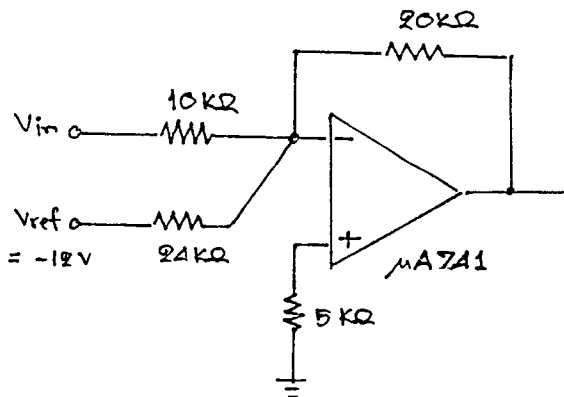


ภาพที่ 3.7

จากภาพที่ 3.7 ำให้ $R_g = 24$ กิโลโอห์ม และ $R_{ref} = 3$ กิโลโอห์ม ท่ำที่เกนสูง
สุดของวงจร คือ

$$(255/256) * (24k/3k) = 8$$

3.8 วงจรเลื่อนระดับสัญญาณ



ภาพที่ 3.8

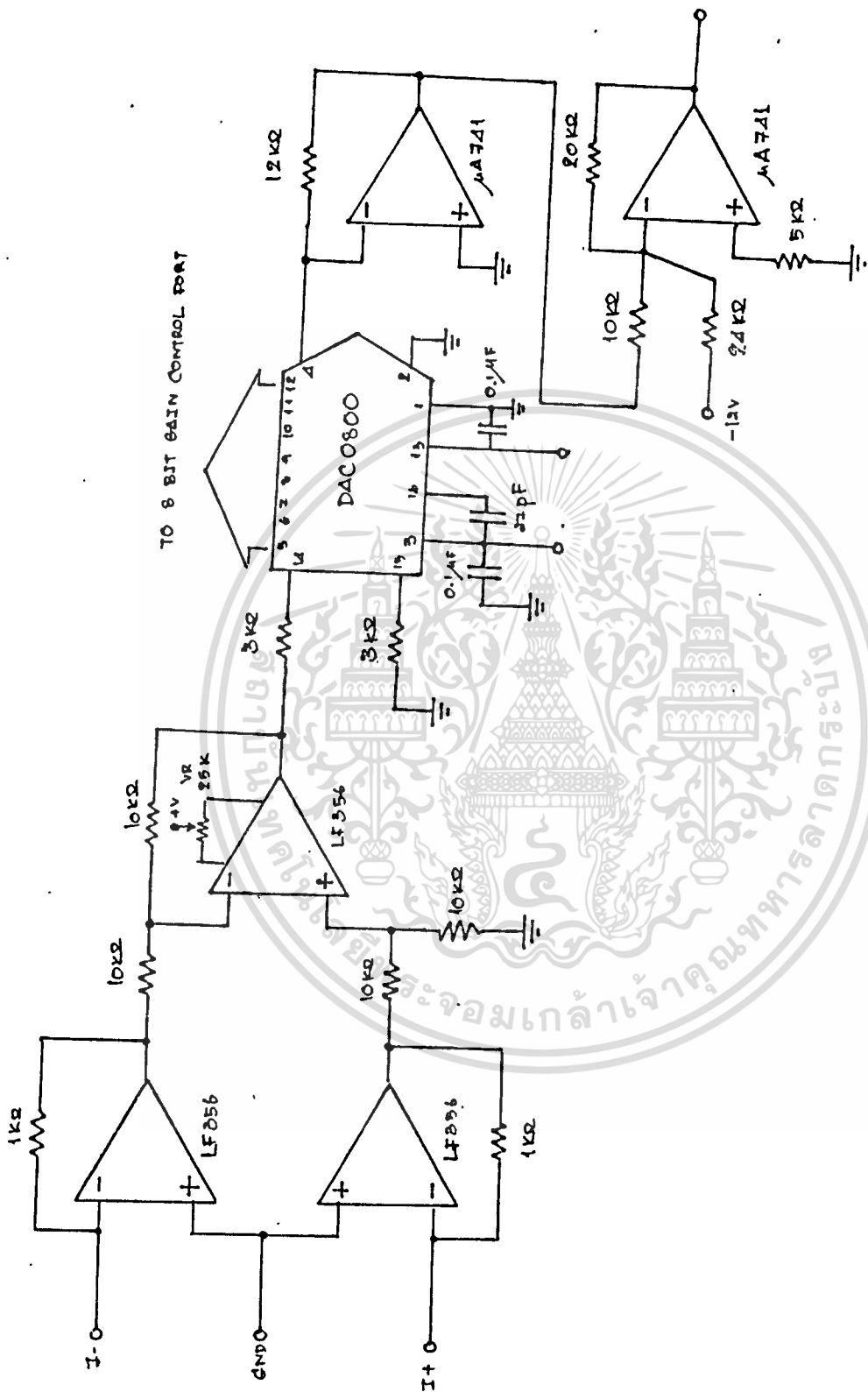
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.8 เลือก V_{ref} เท่ากับ 12 โวลต์ เพื่อสะดวกในการหาแหล่งโวลเตจ เนื่องจากมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง และให้ $R_6 = 24$ กิโลโห์ม ซึ่งจะทําให้แน่ใจได้ว่า วงจรจะทํางานเป็นเชิงเส้น คือไม่เกิดการอิ่มตัว (Saturate) โดยที่โวลเตจเอาต์พุทเมื่อไม่สัญญาณจะมีค่าประมาณ 10 โวลต์ ส่วน R_7 เลือกค่าเท่ากับ 5 กิโลโห์ม เพื่อชดเชยกระแสไบอัสของออปแอมป์ A5 ($\mu A741$) และ R_4 ค่า 10 กิโลโห์ม ทําให้อัตราขยายประมาณ 2 เท่า

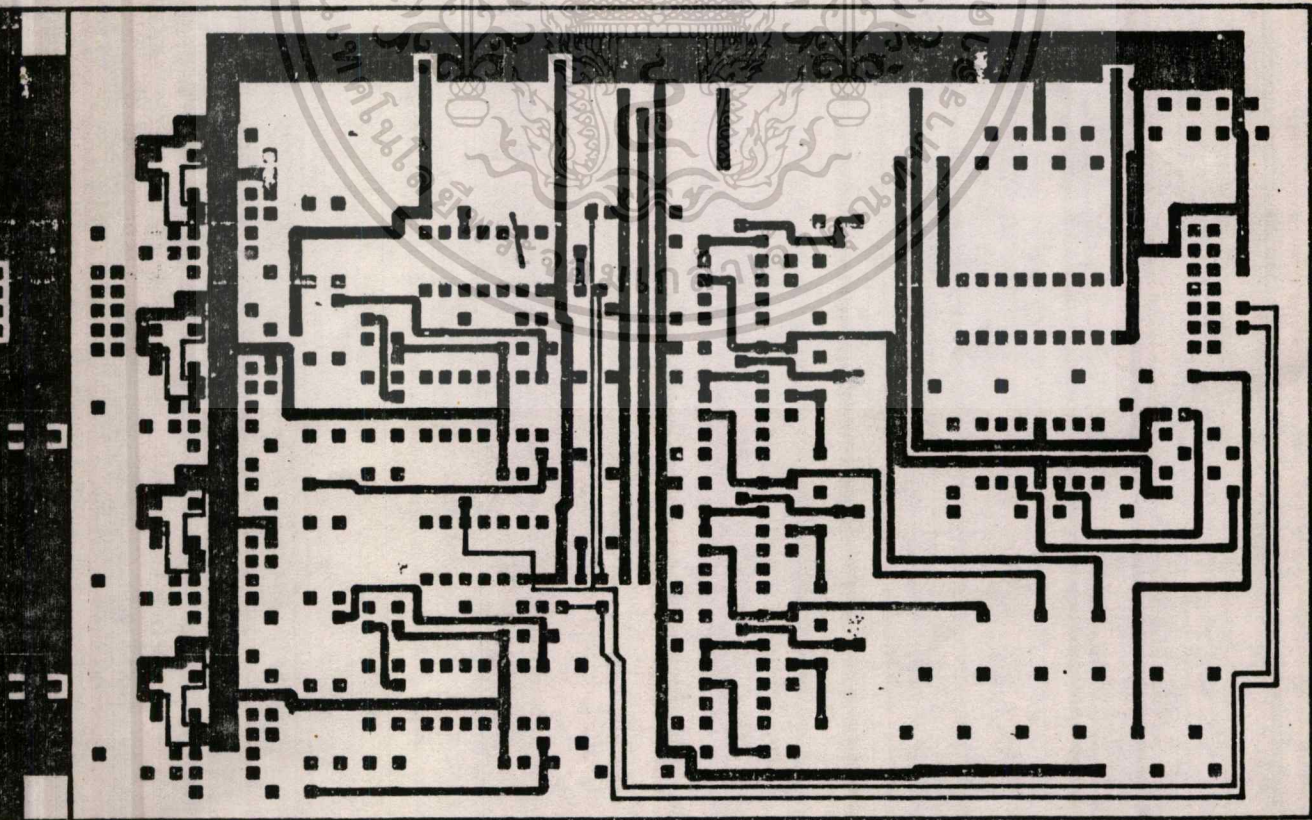
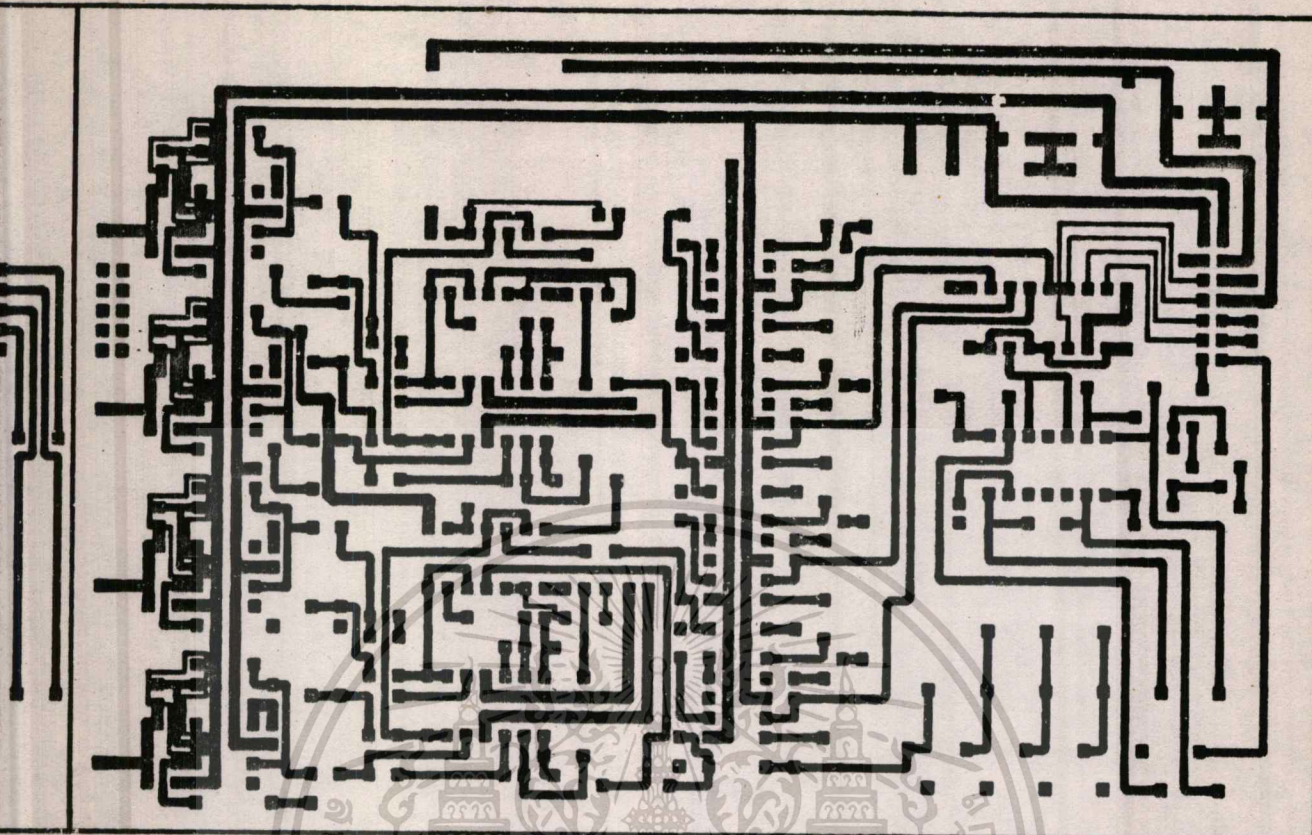
3.9 ส่วนวงจรควบคุม

จากวงจรควบคุมในหัวข้อ 2.3 นั้น เนื่องจากวงจรควบคุมเป็นวงจรโลจิกที่ต้องการสร้างสัญญาณควบคุม ให้มีลักษณะ เป็นไปตามแผนภูมิเวลาที่ต้องการ การออกแบบจึงอาศัยการพิจารณาโลจิกของสัญญาณอินพุท. โดยใช้เกทต่าง ๆ ร่วมกับตัวนับ

ส่วนการสร้างได้ต่อวงจรลงบนแผ่นปริ้นท์เอนกประสงค์ ซึ่งจะเป็นการ์ดเสียบอยู่บนระบบบัสของหน่วยแกนตรี (Gantry Bus System)



ศาสตราจารย์ ดร. วิชากร วิชากร



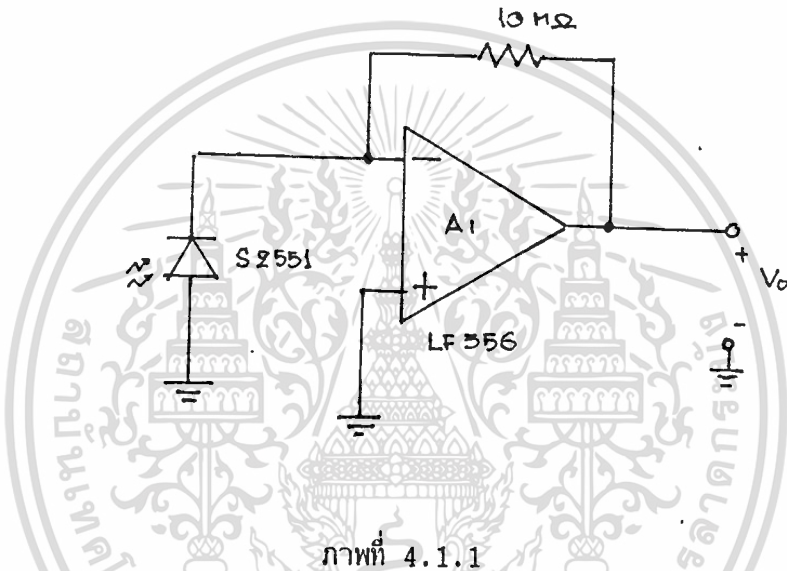
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 3-12 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดสอบอุปกรณ์โพ้ตไดโอดและวงจรรขยาย

ต่อวงจรดังภาพที่ 4.1.1



ใช้แหล่งจ่ายไฟ $\pm 12V$ และอุปกรณ์รังสีเอ็กซ์ดังรายละเอียดดังนี้

- เป็นอุปกรณ์รังสีเอ็กซ์ของ ACOMA
 - ขนาดกำลัง 150 กิโลวัตต์ (kW) 500 มิลลิแอมป์ (mA)
 - อัตราสูงสุด 125 มิลลิแอมป์ต่อ 0.1วินาที (mA/0.1sec), 290 มิลลิแอมป์ต่อ 0.1 วินาที
1. ท้าการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ 100 กิโลวัตต์ โดยแปรค่ากระแส วัดค่าโวลเตจ V_o เขียนกราฟความสัมพันธ์
 2. ยิงรังสีที่ 50 มิลลิแอมป์ แล้วแปรค่าโวลเตจที่ป้อนให้หลอดรังสี วัดโวลเตจ V_o เขียนกราฟความสัมพันธ์

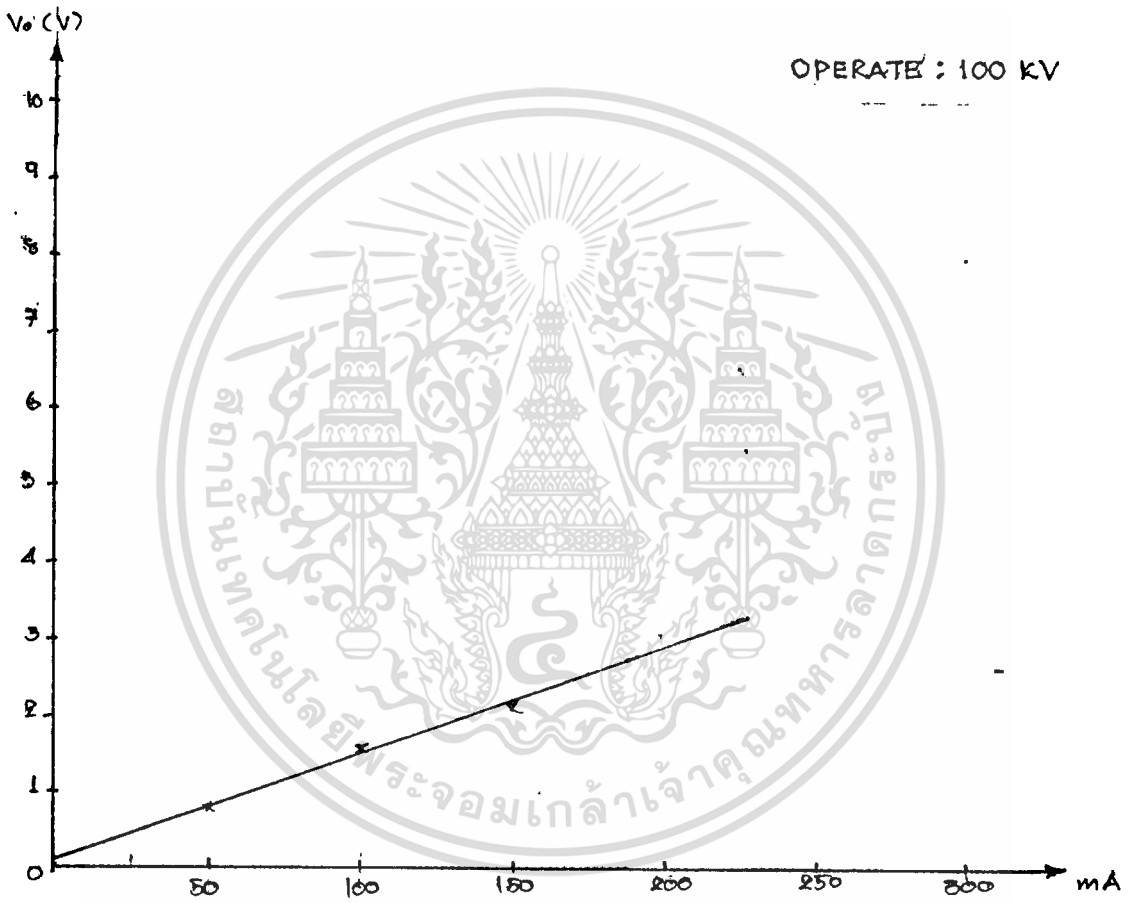
หมายเหตุ งานการวัดฯ ข้อสซิลโรสโคปเป็นเครื่องวัด และต่อจุดกราวด์เข้ากับแท่น

เครื่องเพื่อป้องกันการรบกวนจากสัญญาณไฟกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

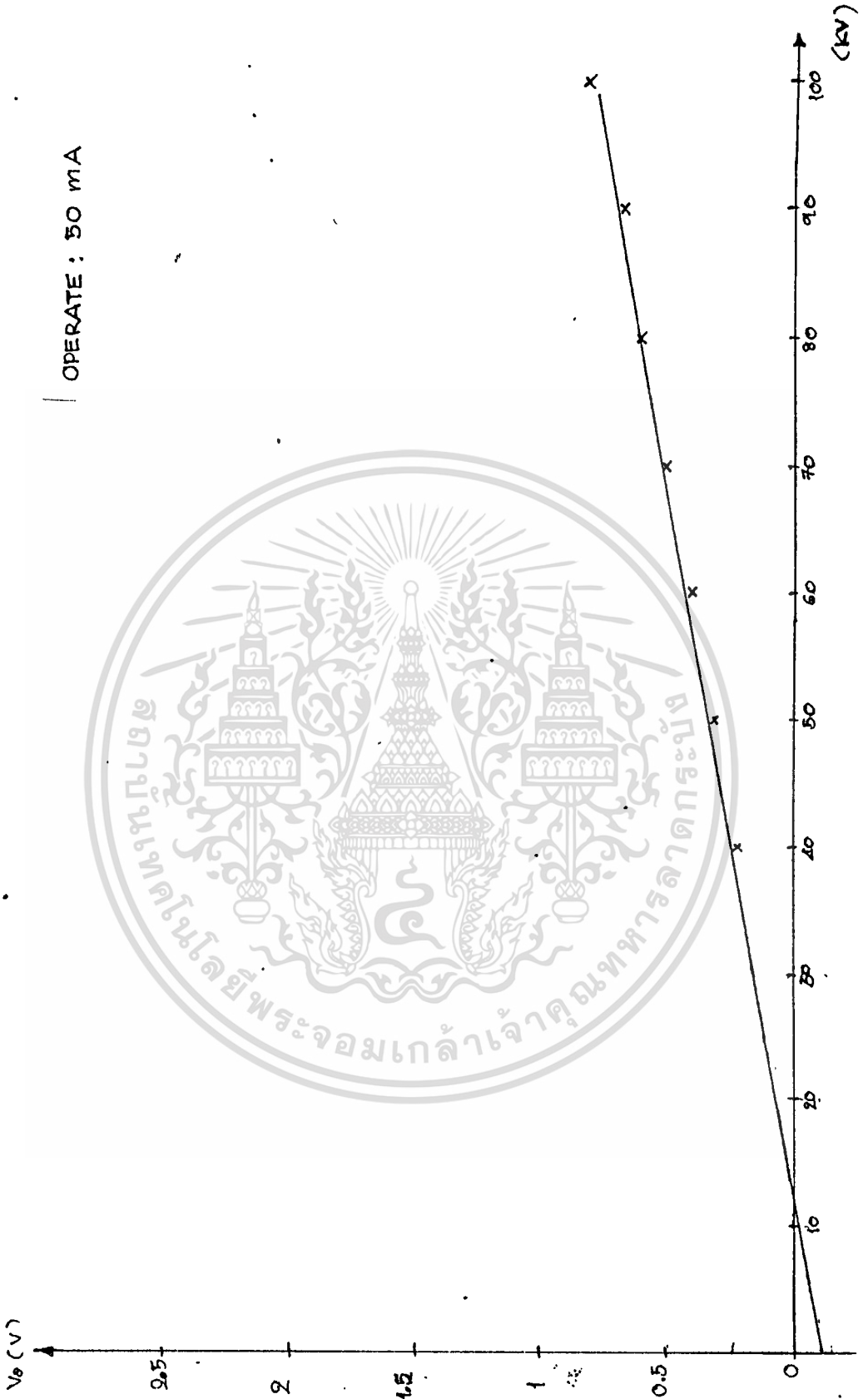
ผลการทดลอง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงผู้ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPERATE : 50 mA

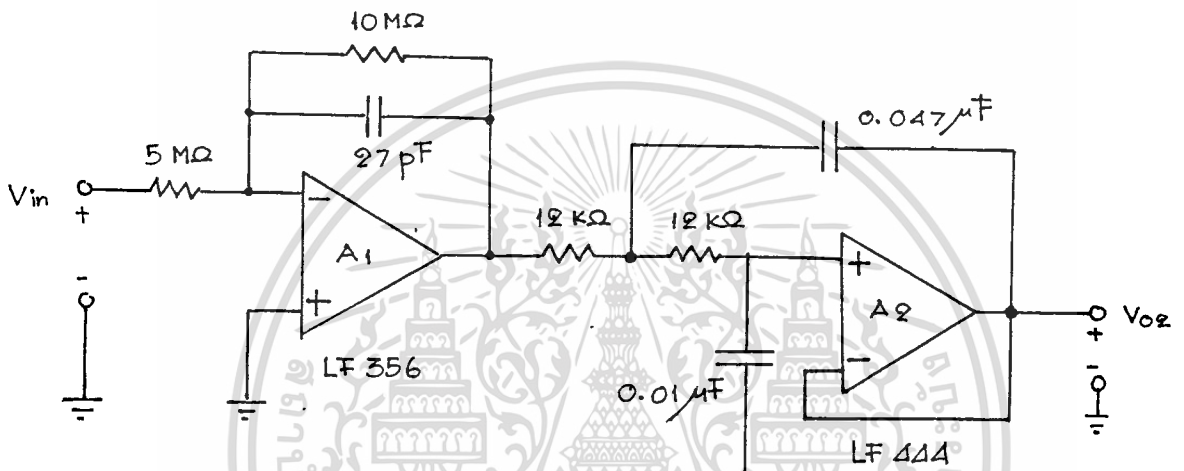


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบวงจรขยายและกรองความถี่ต่ำอันดับสาม

วัตถุประสงค์

- ทดสอบคุณสมบัติของวงจร ทั้งอัตราขยาย, ความถี่คัทออฟ และเวลาหน่วง โดยได้ทดลองต่อวงจรตาม ภาพที่ 4.2.1



ภาพที่ 4.2.1

การทดลอง

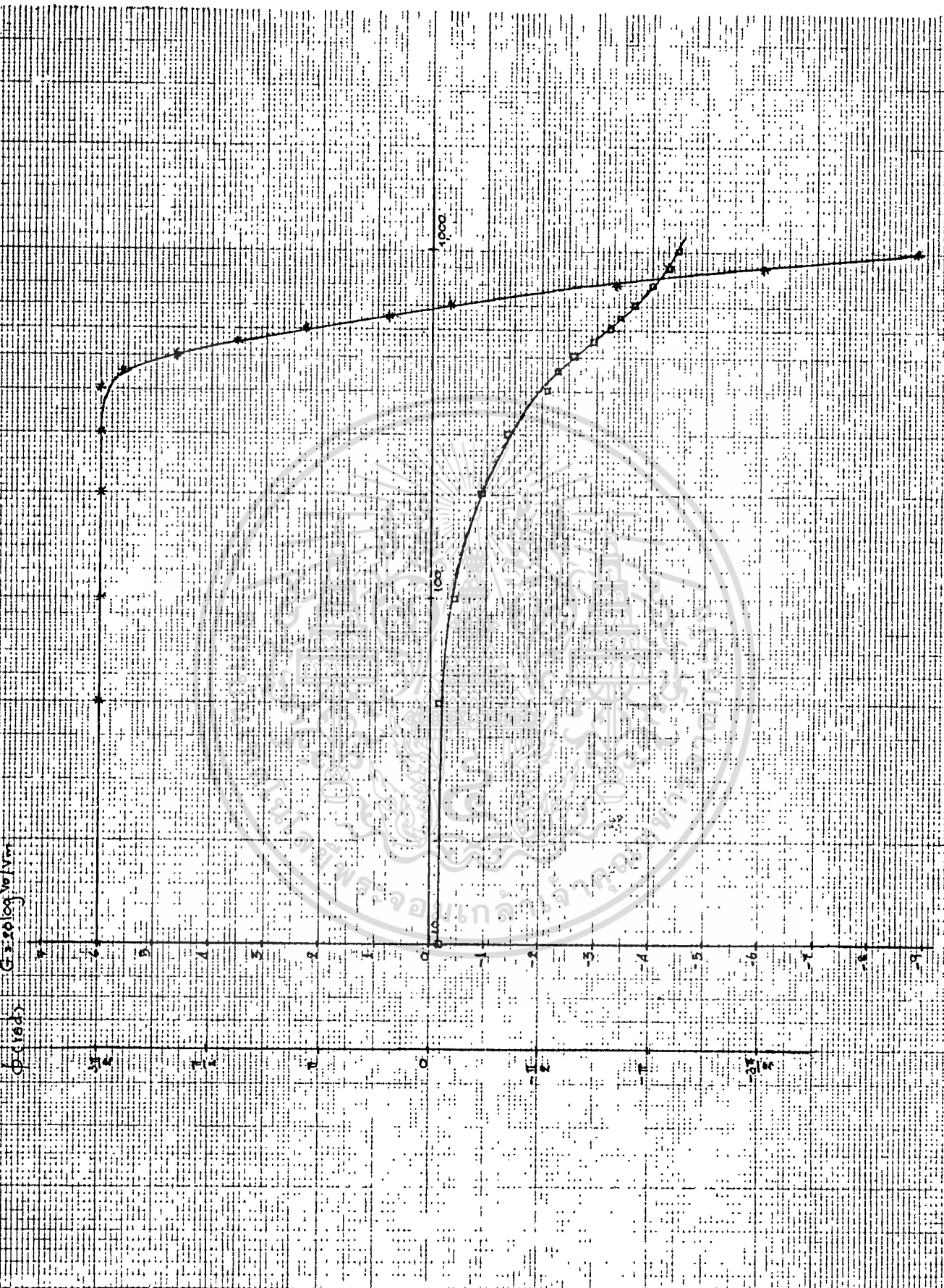
1. ป้อนโวลเตจ V_{in} ที่ขนาด $5 V_{pp}$ โดยการแปรค่าความถี่ตามตาราง 4.2.1 บันทึกโวลเตจ v_{o2} และเวลาหน่วงที่เกิดขึ้น
2. ทำการวาดกราฟอัตราขยาย, เฟสชิฟ และ เวลาหน่วงของวงจร

ผลการทดลอง ข้อ 4.2

f_{in} (Hz)	$T = 1/f_{in}$ (ms)	V_{in} (V _{p-p})	V_o (V _{p-p})	Delay Time T_d (ms)	Phase Shift (rad)
10	100	5	10	0.4	0.126
50	20	5	10	0.4	0.126
100	10	5	10	0.6	0.377
200	5	5	10	0.6	0.754
300	3.33	5	10	0.6	1.113
400	2.5	5	10	0.65	1.634
450	2.22	5	9.5	0.65	1.84
500	2	5	8.5	0.66	2.073
550	1.82	5	7.5	0.67	2.313
600	1.67	5	6.5	0.68	2.56
650	1.54	5	5.5	0.67	2.734
700	1.43	5	4.8	0.66	2.9
800	1.25	5	3.4	0.63	3.167
900	1.11	5	2.5	0.6	3.4
1000	1	5	1.8	0.6	3.519

ตาราง 4.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 4-6 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

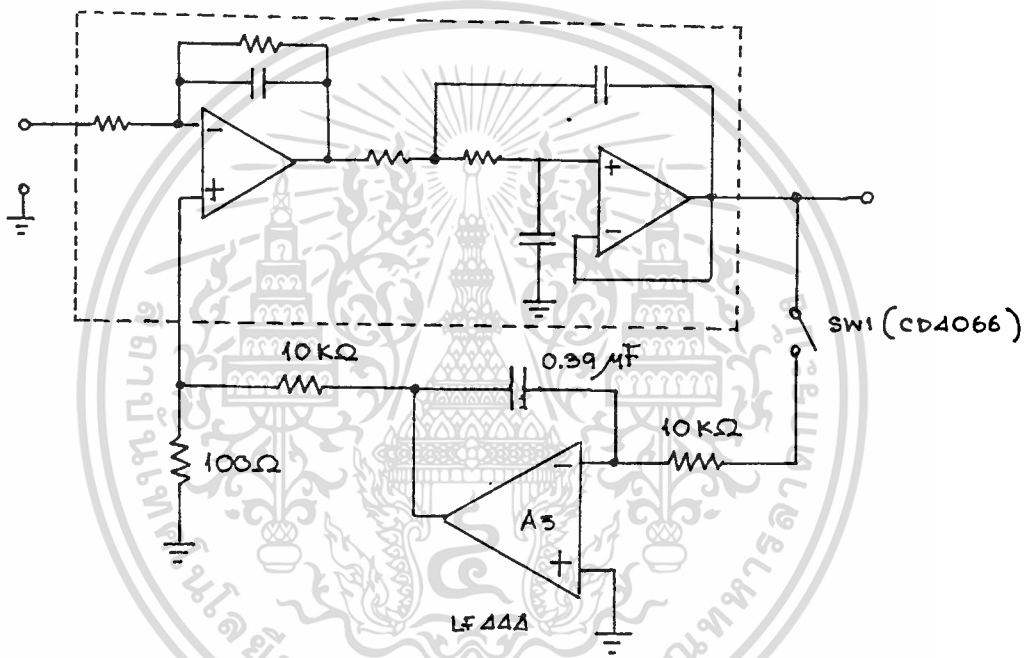
4.3 การทดสอบวงจรชดเชย

วัตถุประสงค์

- ทดสอบวงจรว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่

ในช่วงจรกรองความถี่ ท้าเช่นเดียวกับข้อ 4.2 โดยต่อวงจรชดเชยเพิ่มขึ้น ดังภาพที่

4.3 และใช้ไฟเลี้ยงวงจร ± 12 โวลท์



ภาพที่ 4.3

การทดลอง

1. ปรับค่า V_{in} จนได้ค่า V_o เท่ากับ 0.1 โวลท์คี่ซี โดยที่ SW1 อยู่ในสถานะเปิดวงจร
2. ท้าการปิดสวิตช์ SW1 แล้ววัดเวลาที่ V_o เข้าสู่ภาวะเสถียร (t_s) และค่า V_o ที่จุดนั้น
3. ท้าการเปิดสวิตช์ SW1 จับเวลา 10 วินาที วัดค่า V_o สุดท้ายที่เกิดขึ้น

ผลการทดลอง ข้อ 4.3

- จากการทดลองข้อ 2 ได้เวลา t_s อยู่ในช่วง 1-2 วินาที

- จากการทดลองตามข้อ 3 ค่า V_o เปลี่ยนไปน้อยมากจนไม่สามารถจับการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ได้ด้วยอุปกรณ์วัดที่ใช้ (ออสซิลโลสโคป ที่สเกล 5 มิลลิโวลท์)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

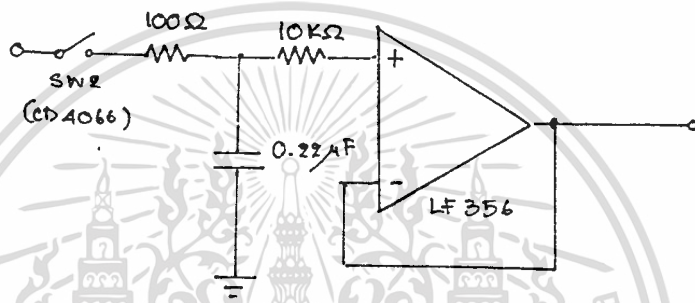
4.4 การทดสอบวงจรแรมป์และโฮล

วัตถุประสงค์

- ทดสอบการครูป (Droop) และเวลาเซ็ททริง (t_s)
- ทดสอบอัตราขยาย และเวลาหน่วง

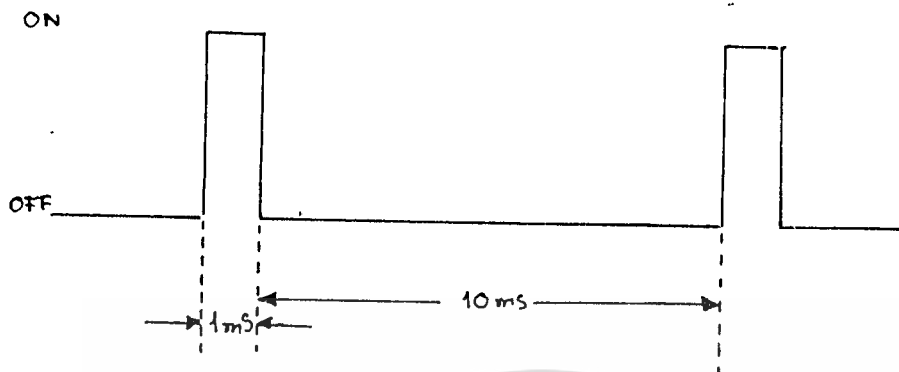
การทดลอง

ต่อวงจรดังภาพที่ 4.4.1



ภาพที่ 4.4.1

1. ป้อนโวลเตจที่อินพุตค่า 5 Vpp โดยมีระดับโวลเตจต่ำสุด 0 โวลท์ แปรค่าความถี่ตามตาราง 4.4.1 บันทึกค่า V_o และเวลาหน่วง (โดยที่ SW2 อยู่ในสถานะออน)
2. ป้อนโวลเตจตามข้อ 1 ความถี่ 500 เฮิร์ตซ์ ป้อนคลื่นสี่เหลี่ยมให้อินพุตควบคุมของกนาลอกสวิตช์ ทำการวัดเวลา t_3 ที่สัญญาณ V_o ใช้ในการตาม V_{in} หลังจากได้รับสัญญาณแรมป์ถึง (SW2 ปิดวงจร) โดยให้คลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้ควบคุมมีลักษณะดังภาพที่ 4.4.2
3. วัดการลดลงของ V_o ในขณะที่คลื่นสี่เหลี่ยมมีโวลเตจเท่ากับ ศูนย์ (คือสวิตช์อยู่ในสถานะเปิดวงจร)
4. ป้อนคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด 5 โวลท์ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ SW2 อยู่ในสถานะปิดวงจร เขียนกราฟของ V_o



ภาพที่ 4.4.2

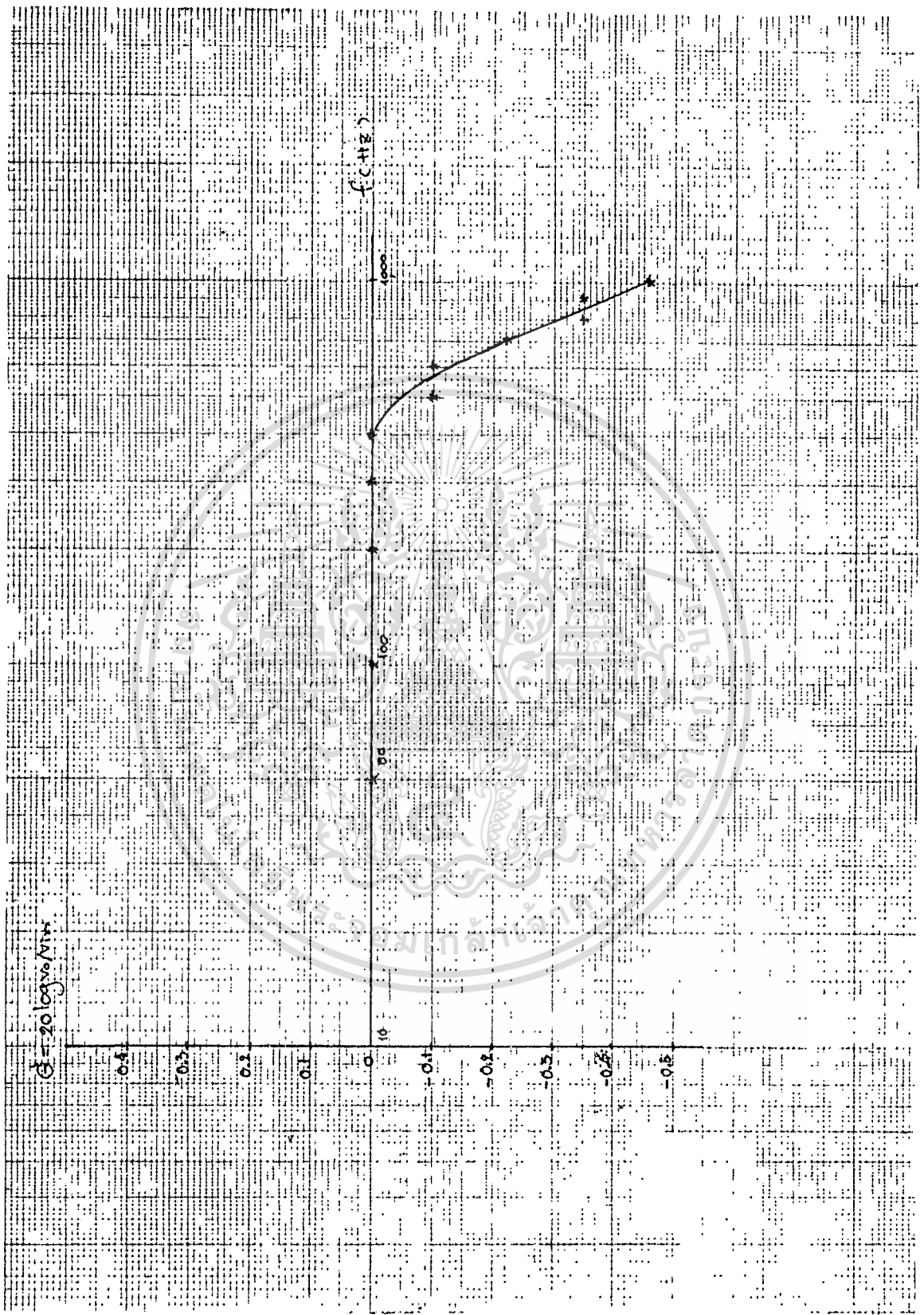
ผลการทดลอง ข้อ 4.4

1.

$f_{in}(Hz.)$	$T=1/f_{in}(ms)$	$V_{in}(V_{pp})$	$V_o(V_{pp})$	DelayTime(ms)	PhaseShift(rad)
50	20	10	10	0.04	0.01
100	10	10	10	0.04	0.025
200	5	10	10	0.04	0.05
300	3.33	10	10	0.04	0.075
400	2.5	10	10	0.04	0.1
500	2	10	9.88	0.04	0.125
600	1.67	10	9.88	0.04	0.15
700	1.43	10	9.75	0.04	0.176
800	1.25	10	9.61	0.04	0.2
900	1.11	10	9.60	0.04	0.226
1k	1	10	9.48	0.04	0.251

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

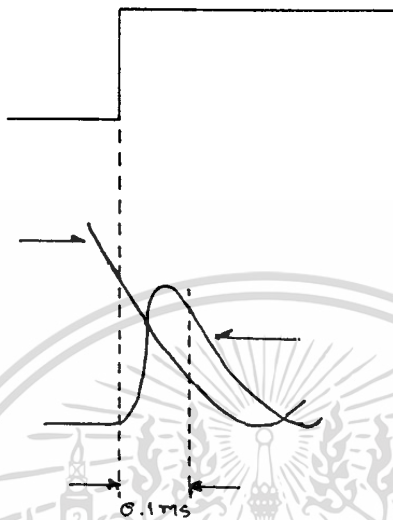
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4.2

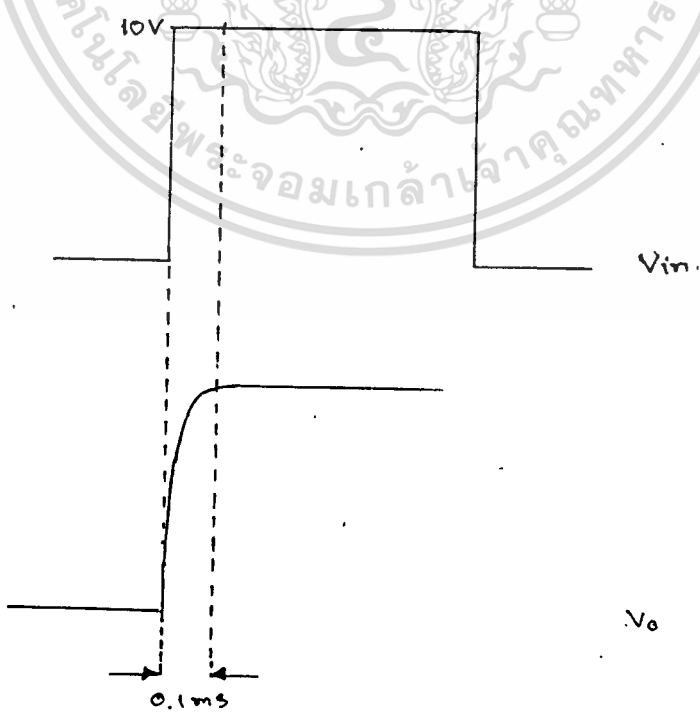
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ได้ค่าเวลา $t_s = 0.1$ มิลลิวินาที โดยมีรูปร่างสัญญาณดังภาพที่ 4.4.3



ภาพที่ 4.4.3

- 3. มองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง
- 4. มีลักษณะดังภาพที่ 4.4.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 4.4.4
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดลองวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส

วัตถุประสงค์

- ทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจร
- ทดสอบเสถียรภาพของวงจร

การทดลอง

ทำการต่อวงจรตามภาพที่ 3.5.1 ใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์

1. บ่อน V_{in} (ดีซี) เข้าทางขาอินพุตบวกของวงจร ด้วยค่าต่าง ๆ ตามตาราง 4.5.1 ทำการวัดค่า V_o และเขียนกราฟ (โดยใช้วงจรแปลงกระแสเป็นโวลเตจค่าเกน $= 10^{-3}$ V/A)
2. บ่อน V_{in} 10 V_{pp} เปลี่ยนความถี่สัญญาณจาก 0 - 600 เฮิรต ดูเสถียรภาพของโวลเตจเอาต์พุต (V_o)

ผลการทดลอง ข้อ 4.5

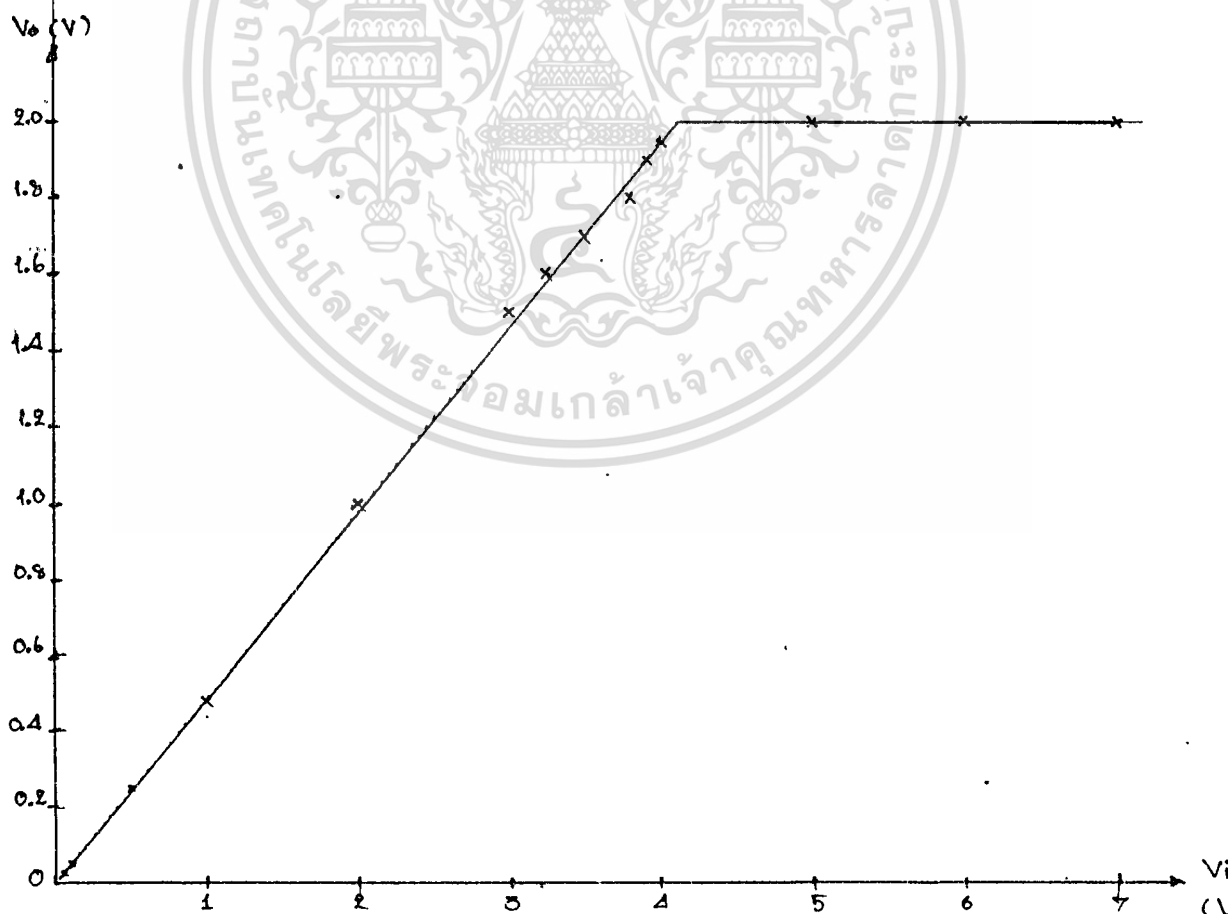
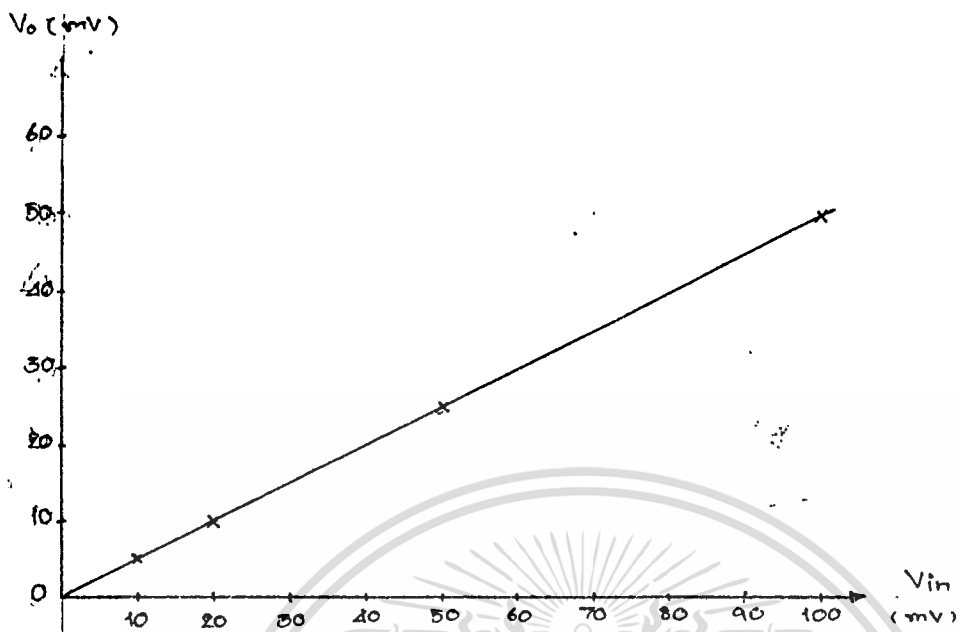
1. ได้ผลการทดลองตามภาพที่ 4.5.1
2. โวลเตจเอาต์พุตมีเสถียรภาพดี

V_{in} (V _{dc})	V_o (V)	V_{in} (V _{dc})	V_o (V)
0	0	3.25	1.6
0.01	0.005	3.5	1.7
0.02	0.01	3.8	1.8
0.05	0.025	3.9	1.9
0.1	0.05	4	1.95
0.5	0.25	5	2
1	0.48	6	2
2	1	7	2
3	1.5	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตาราง 4.5.1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.5.1

4.6 การทดสอบวงจรขยายปรับค่าได้

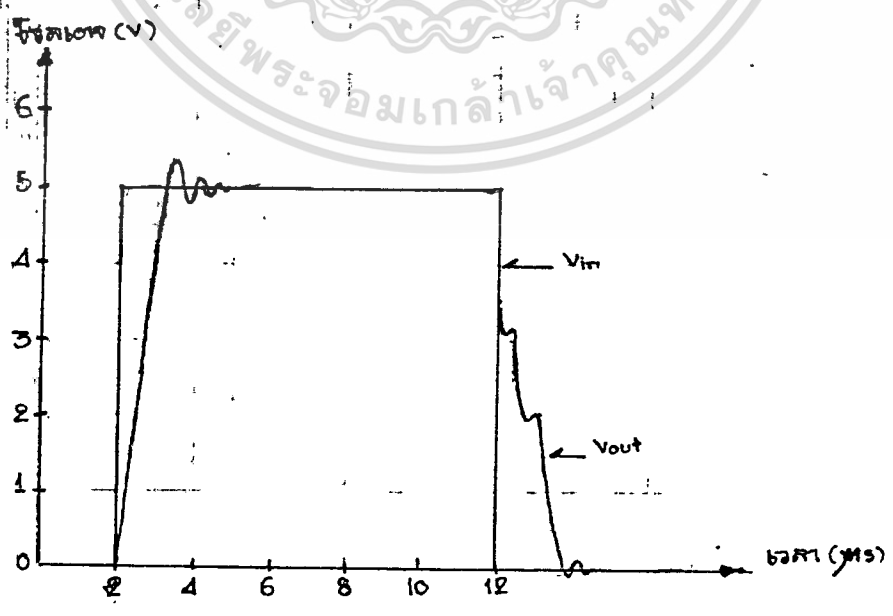
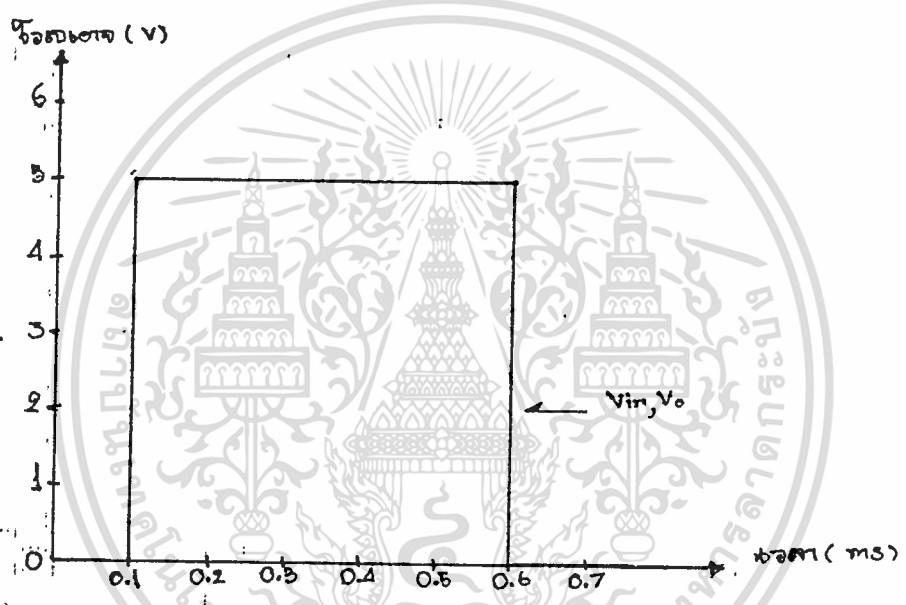
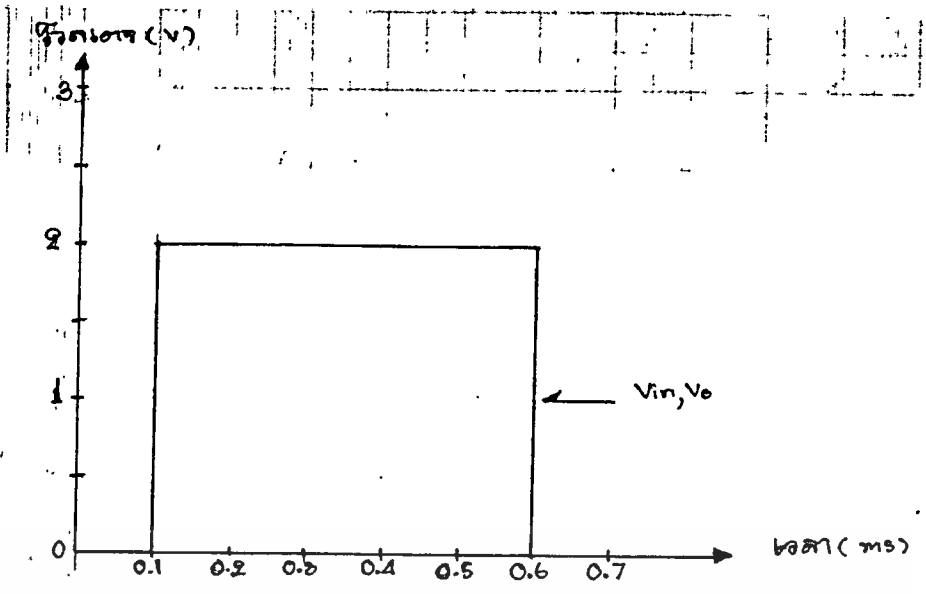
วัตถุประสงค์

- เพื่อทดลองค่า C_c ที่เหมาะสม
- เพื่อดูความเป็นเชิงเส้นของวงจร

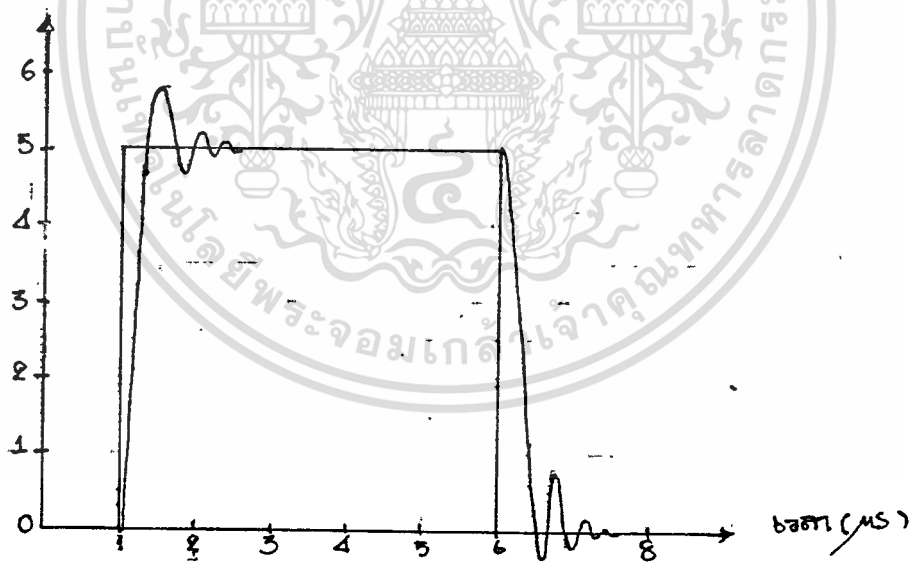
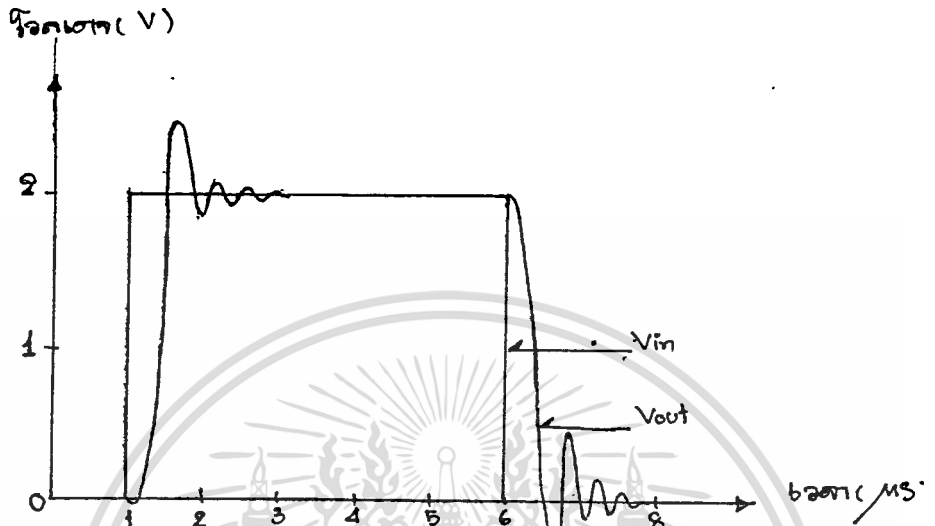
การทดลอง

ต่อวงจรตามภาพที่ 3.7 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟ ± 12 โวลต์ดีซี

1. ป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ขนาด 2 โวลต์ และ 5 โวลต์ วัดการตอบสนองต่อสเตปอินพุต (Step input) โดยใช้ $C = 0.1$ นาโนฟาร์ัด และ 27 พิโคฟาร์ัด
 2. ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ประมาณ 1 กิโลเฮิร์ต ดูการตอบสนองของโวลเตจ ที่เอาต์พุต บันทึกผลและเขียนกราฟ
 3. ป้อนโวลเตจอินพุตเป็น ดีซี แปรขนาดไปตามตาราง 4.6.1 วัด V_o บันทึกผลและเขียนกราฟ โดยมีค่าแพ็คเกจอร์คาบคุมเกน (D0-D7) ต่าง ๆ ตามตาราง
- ผลการทดลอง ชื่อ 4.6
1. C ทั้งสองค่าเกิดความเพี้ยน ที่ความถี่ 50-100 กิโลเฮิร์ต
 2. ได้ผลตามภาพที่ 4.6.2 , 4.6.3
 3. ได้ผลดังตาราง 4.6.1 และภาพที่ 4.6.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาพที่ 4.6.2 กรณี C_c เท่ากับ 0.1 นาโนฟารัด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาพที่ 4.6.3 กรณี C_c เท่ากับ 27 พิโคฟารัด

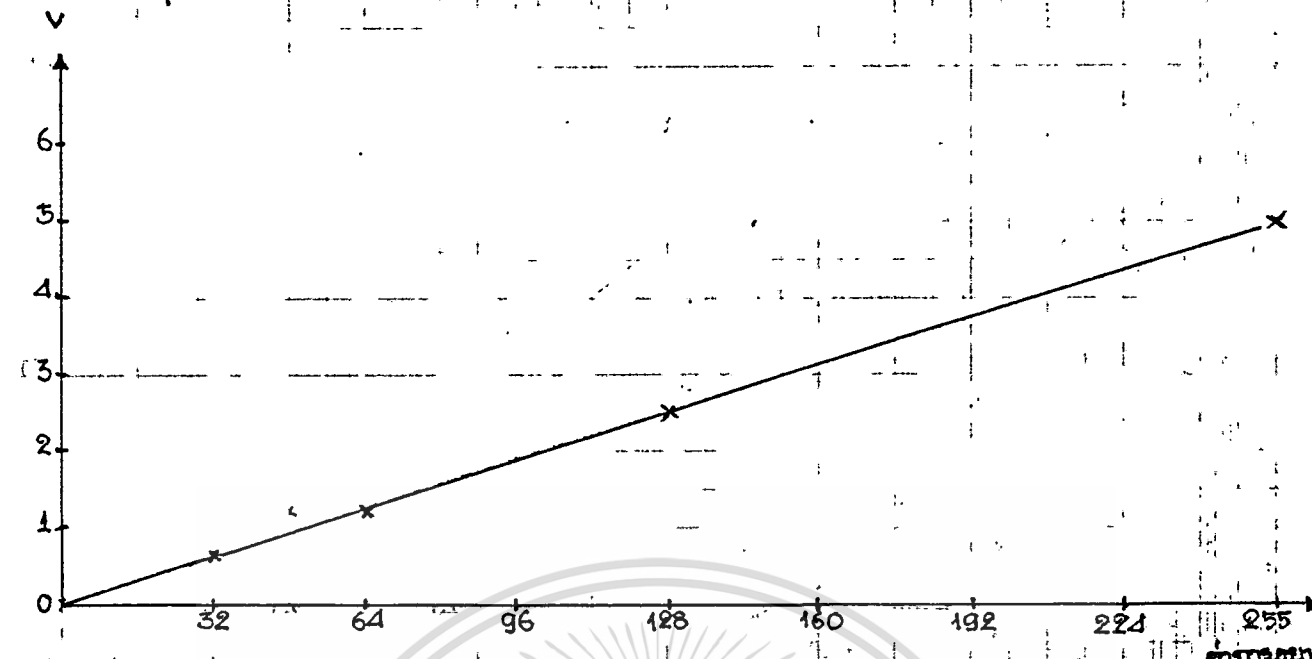
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vin (V)	ค่ากระแสขาเข้า (81-88)			
	32	64	128	255
0	$V_o = 0. V$	$V_o = 0 V$	$V_o = 0 V$	$V_o = 0 V$
0.1	0.012	0.025	0.046	0.1
0.5	0.06	0.124	0.25	0.5
1	0.125	0.25	0.5	1
2	0.25	0.5	1	2
3	0.37	0.76	1.5	3
4	0.49	1	2	4
5	0.61	1.24	2.5	5
6	0.75	1.5	3	6
7	0.86	1.75	3.5	7
8	0.98	2	4	8
9	1.1	2.2	4.5	8.4

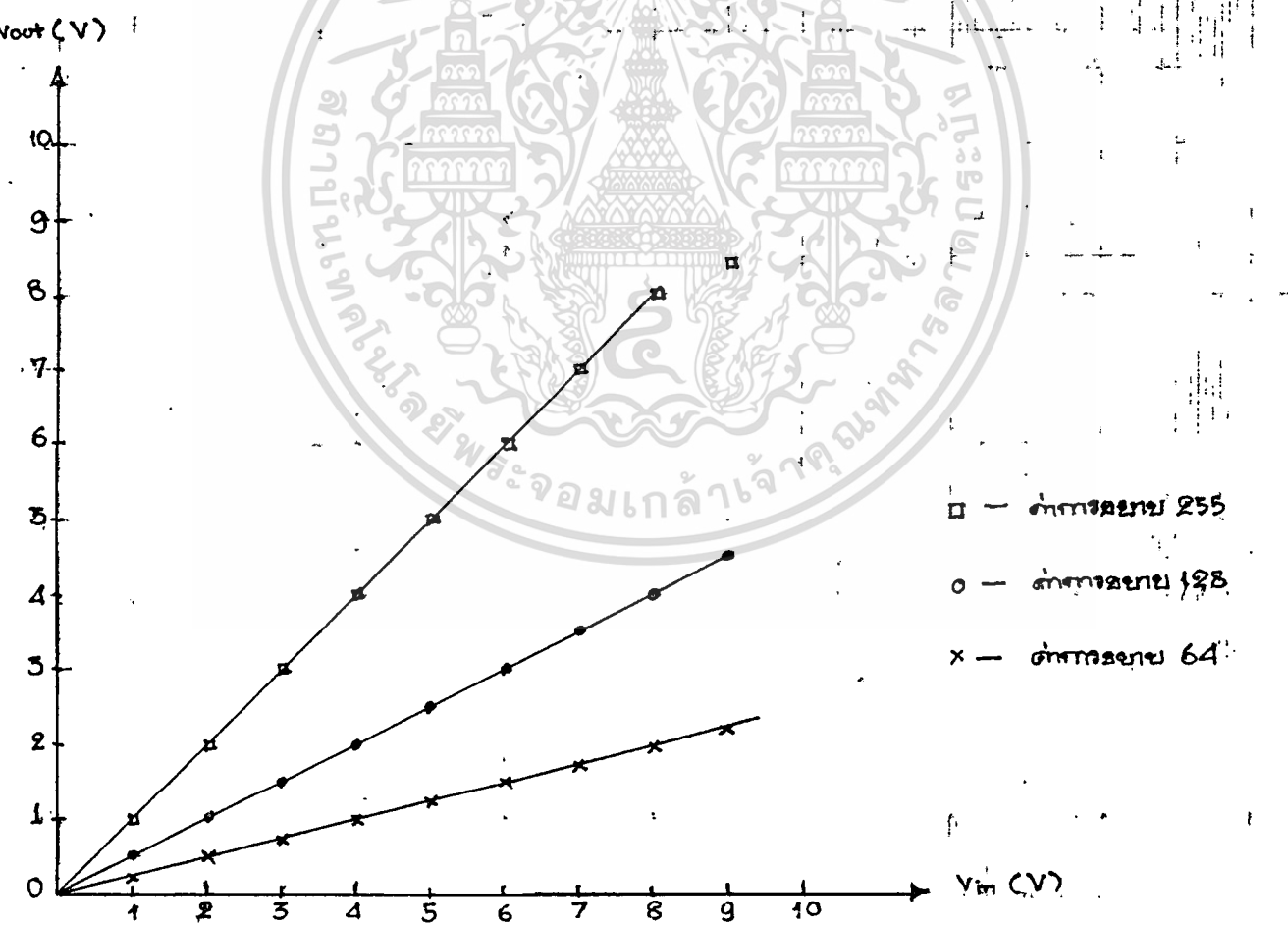
ตาราง 4.6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจเอาต์พุต (V_o)



ก.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโวลเตจเอาต์พุตกับโวลเตจอินพุตที่ค่าการขยาย (อัตรา $V_{in} = 5V$)



- - ค่าการขยาย 255
- - ค่าการขยาย 128
- × - ค่าการขยาย 64

ข.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ V_{in} ที่ค่าการขยาย 64, 128, 255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ควรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดสอบวงจรควบคุมการรับและแปลงข้อมูล

วัตถุประสงค์

- เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรควบคุม

วงจรควบคุมที่สร้างขึ้นต่อบนปรินท์เอินกประสงค์ เป็นการคัดเลือกอยู่บนระบบบัสของ-
แกนที่

การทดลอง

โดยให้ Z-80 ซีพียู (บนหน่วยแกนที่) เขียนค่าตัวนับซึ่งเป็นจำนวนตัวรับรังสีซึ่งจะ
สแกน 1 โปเรเจชัน (D0-D11) ให้กับตัวนับแบบนับลง หมายเลขพอร์ท คือ FCh, FDh
และสามารถอ่านค่าที่จะใช้การสแกนเลือกวงจรถับรังสีเอ็กซ์ชูดที่ต้องการ (A0-A11) จาก
ตัวนับแบบนับขึ้นได้ จากพอร์ท FAh, FBh การอ่านและเขียนค่าต่าง ๆ บนพอร์ทของวงจร
ควบคุม ใช้การแสดงผลโดยการต่อไดโอดเปล่งแสงแสดงค่า

ป้อนสัญญาณนาฬิกา สัญญาณควบคุมวีวมาร์คเกอร์ สัญญาณอินาเบิลและสัญญาณสตาร์ทการ
รับและแปลงข้อมูล

ผลการทดลอง

ได้สัญญาณควบคุมต่าง ๆ ถูกต้องตามแผนภูมิเวลาการทำงานของระบบ

4.8 การทดสอบส่วนแปลงข้อมูลจากอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D Board)

วัตถุประสงค์

ทดสอบการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของ DT-2827 ชื่อ CT-A/D พร้อมทั้ง
ทั้งทดสอบว่าฮาร์ดแวร์ที่ใช้ควบคุมการยิงรังสีเอ็กซ์ ของเครื่อง ACOMA

การทดลอง

1. ทดลองต่อวงจร เอาโวลเตจเอาท์พุทจากภาครับรังสีเอ็กซ์ ส่วนแปลงกระแสเป็นโวลเตจ
โดยใช้สายซิลด์ยาว 6 เมตร โยงข้ามจากห้องฉายรังสี (หน่วยแกนที่) มายังห้องควบคุมป้อน
เป็นอินพุทให้กับบอร์ดแปลงข้อมูล (DT-2827) เพื่อแปลงข้อมูลจากอนาลอกเป็นดิจิตอล ดังภาพ
ที่ 4.8

2. ต่อวงจรส่วนอินเตอร์เฟซควบคุมการวอร์มอัพ และการยิงรังสีเอ็กซ์ ของเครื่อง ACOMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บอร์ดแปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิทัลนี้เสียบอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ พีซี-เอที รันโปรแกรม CT-A/D เลือกการทำงาน ในโหมดดีเอ็มเอซิง เก็สแซนแนล

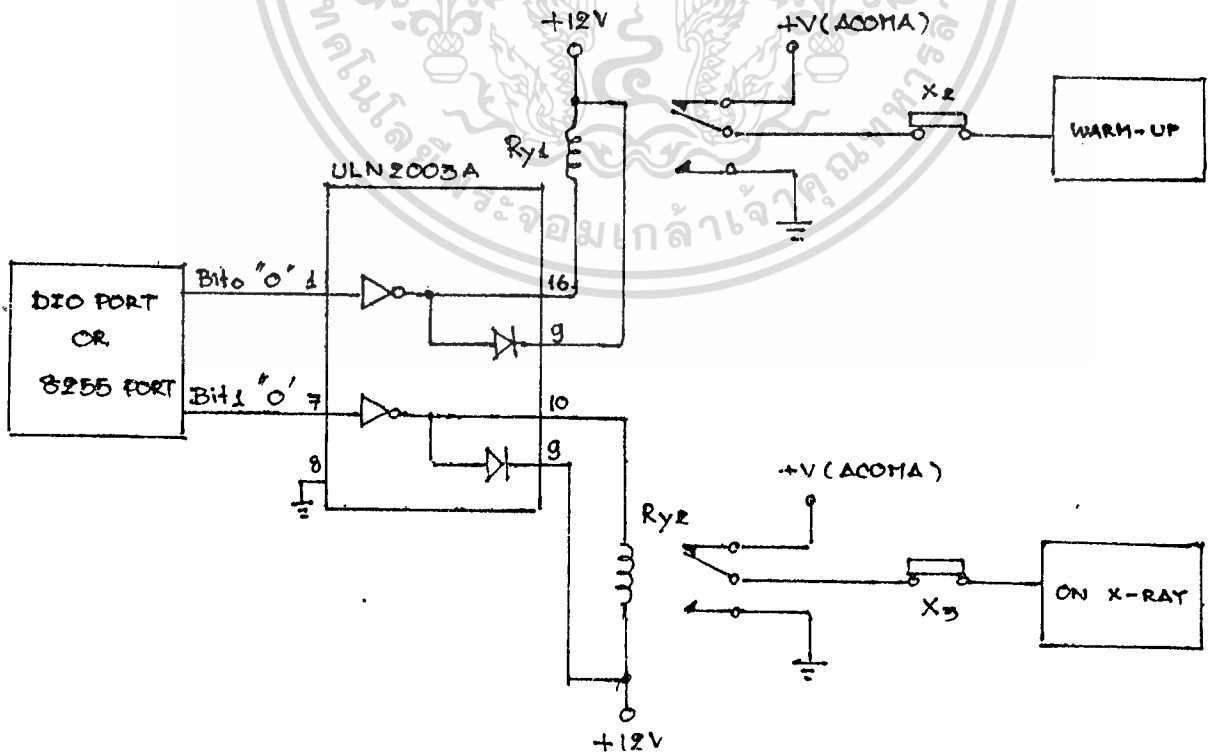
เลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในโปรแกรม CT-A/D ในการยิงรังสีเอ็กซ์ ดังนี้

- เวลาในการวอร์มอัปไฟลต์หลอดรังสีเอ็กซ์ 3200 มิลลิวินาที
- เวลาในการยิงรังสีเอ็กซ์ แต่ละครั้ง 500-1800 มิลลิวินาที

4. การรันโปรแกรม CT-A/D แต่ละครั้ง เลือกปรับค่าโวลท์และกระแส ในการยิงรังสีของเครื่องเอ็กซ์เรย์อโรมา ดังต่อไปนี้

- เริ่มที่ 50 กิโลโวลท์ 50 มิลลิแอมป์ ปรับค่าโวลท์ที่ปัสเตลละ 10 กิโลโวลท์ จนถึง 130 กิโลโวลท์
- ปรับค่าโวลท์เป็น 100 กิโลโวลท์ ปรับค่ากระแสเป็น 100 มิลลิแอมป์ และ 150 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ ทดลองเหมือนเดิมโดยปรับค่าโวลท์เป็น 120 กิโลโวลท์ และ 130 กิโลโวลท์ตามลำดับ

5. นำไฟล์ข้อมูล (เท็กซ์ไฟล์) ที่ได้จากข้อ 3 ไปพล็อตกราฟ



ภาพที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ปลอดภัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

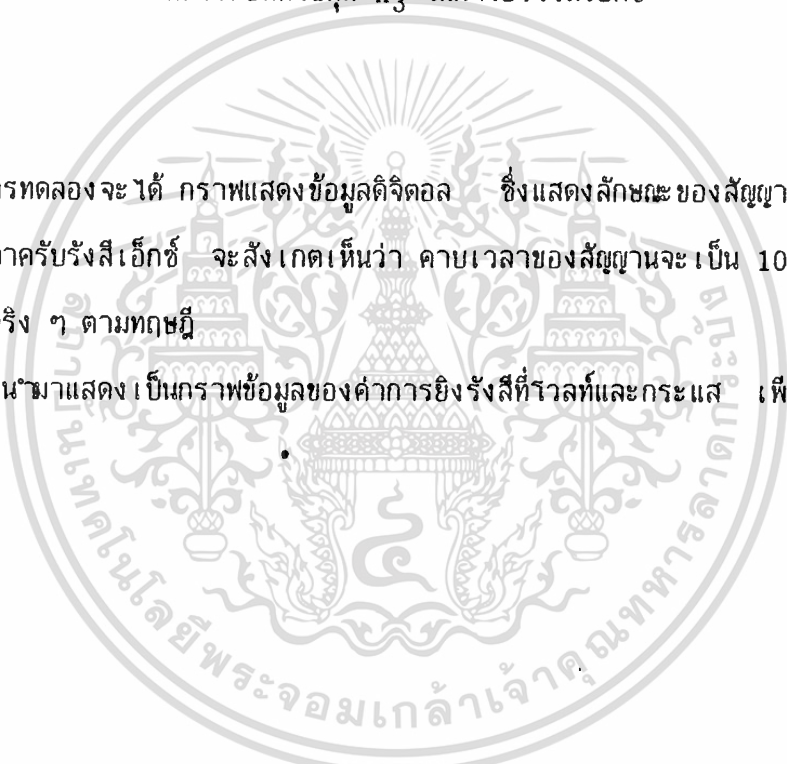
จากภาพที่ 4.8

- X_2, X_3 เป็นสวิตช์ที่อยู่ภายในเครื่อง เอ็กซ์เรย์อัตโนมัติ
โดย X_2 ควบคุมการอุ่นไส้หลอดรังสีเอ็กซ์
 X_3 ควบคุมการยิงรังสีเอ็กซ์
 R_{y1}, R_{y2} เป็นรีเลย์ที่ต่อขึ้นเองภายนอก
 R_{y1} เป็นรีเลย์ควบคุม X_2 ในการอุ่นไส้หลอดรังสีเอ็กซ์
 R_{y2} เป็นรีเลย์ตัดสแตทรีเลย์ที่ควบคุม X_3 ในการยิงรังสีเอ็กซ์

ผลการทดลอง

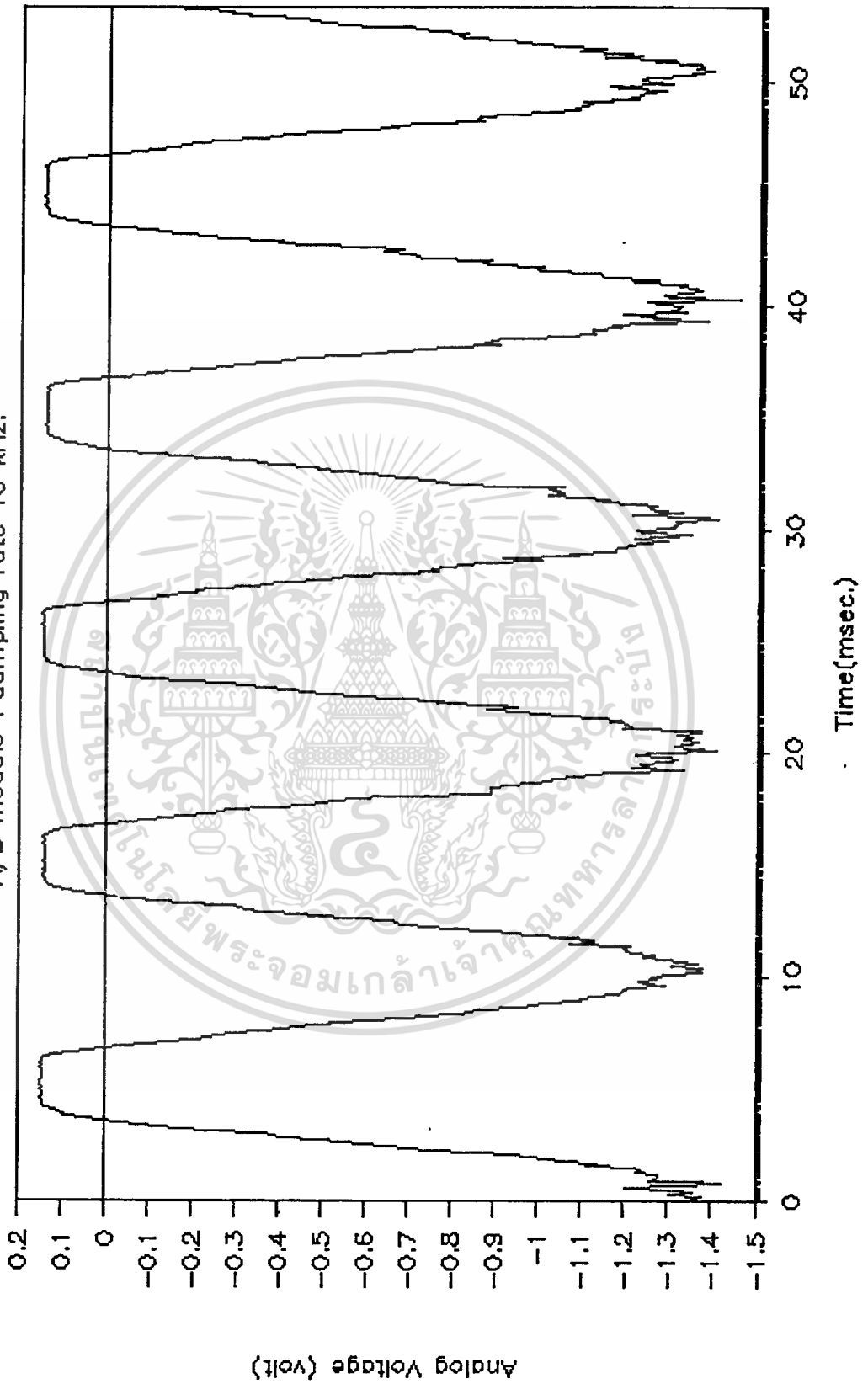
จากการทดลองจะได้ กราฟแสดงข้อมูลดิจิทัล ซึ่งแสดงลักษณะของสัญญาณเอ็กซ์เรย์ที่ได้จากวงจรภาครับรังสีเอ็กซ์ จะสังเกตเห็นว่า คาบเวลาของสัญญาณจะเป็น 10 มิลลิวินาที (50 เฮิร์ต) จริง ๆ ตามทฤษฎี

กราฟที่นำมาแสดงเป็นกราฟข้อมูลของค่าการยิงรังสีที่วาลท์และกระแส เพียงบางค่าเท่านั้น



ACOMA X-RAY : 60 kV, 50 mA.

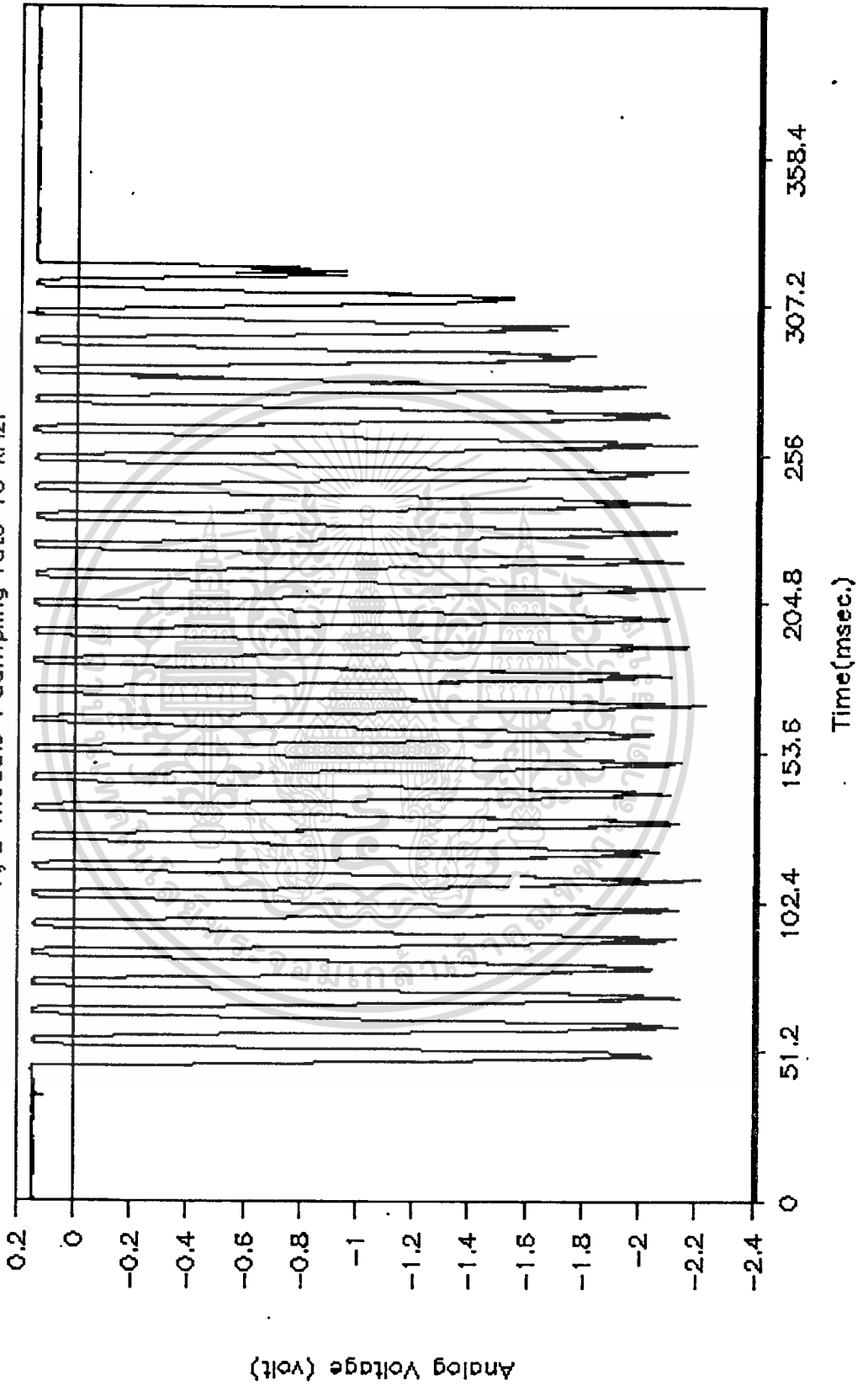
A/D module : sampling rate 10 kHz.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACOMA X-RAY : 80 kV, 50 mA.

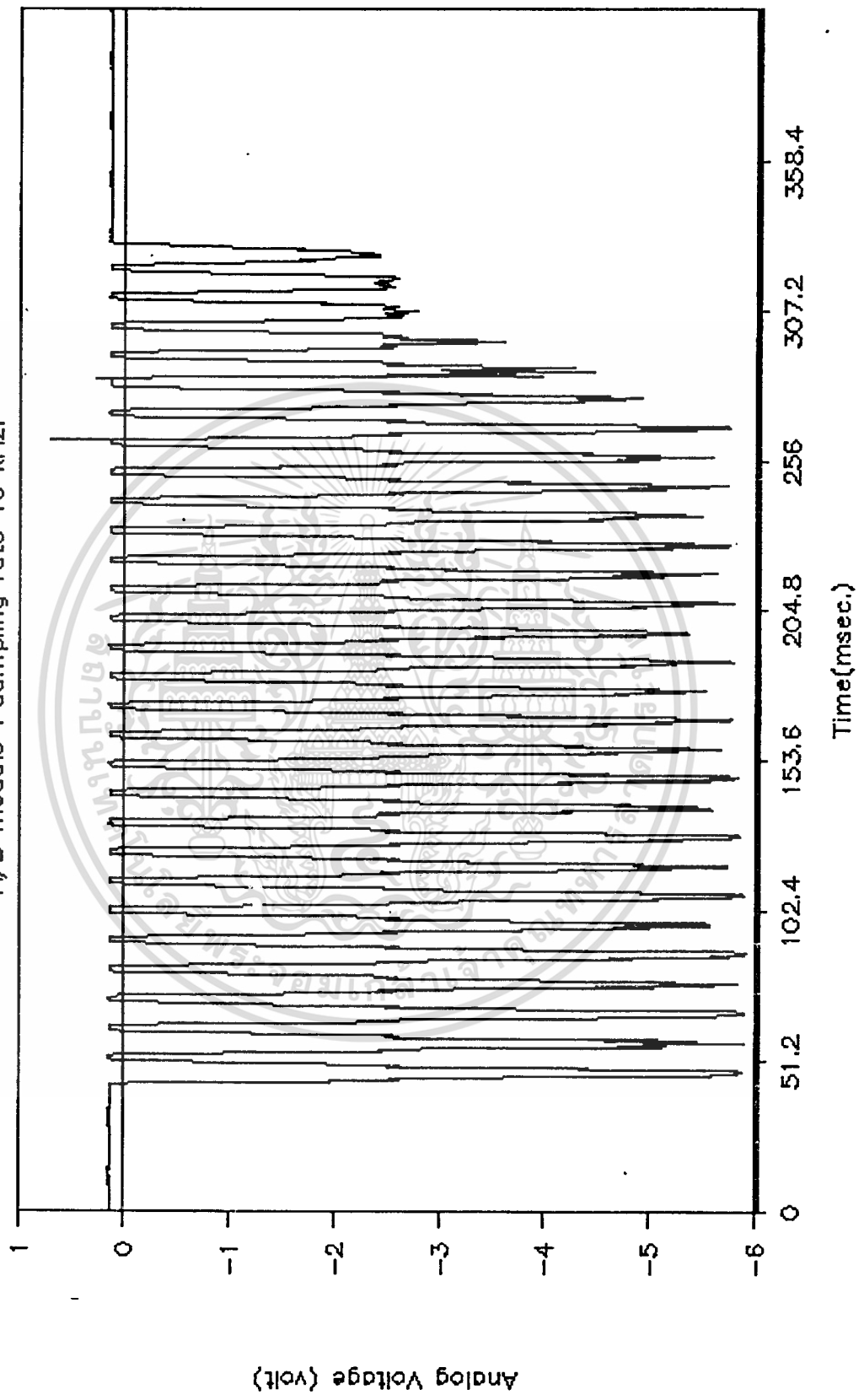
A/D module : sampling rate 10 kHz.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACOMA X-RAY : 100 kV, 100 mA.

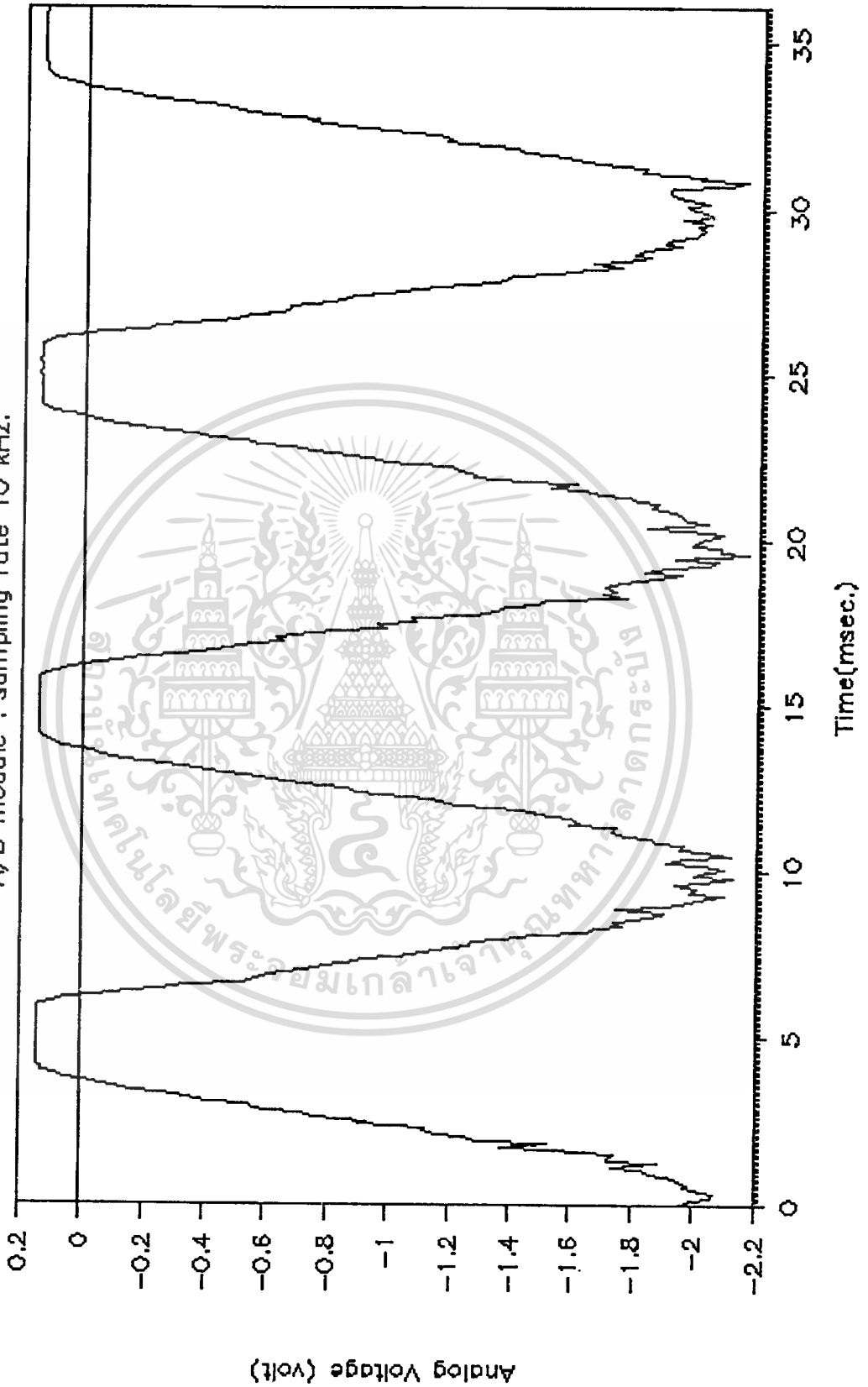
A/D module : sampling rate 10 kHz.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACOMA X-RAY : 80 kV, 50 mA.

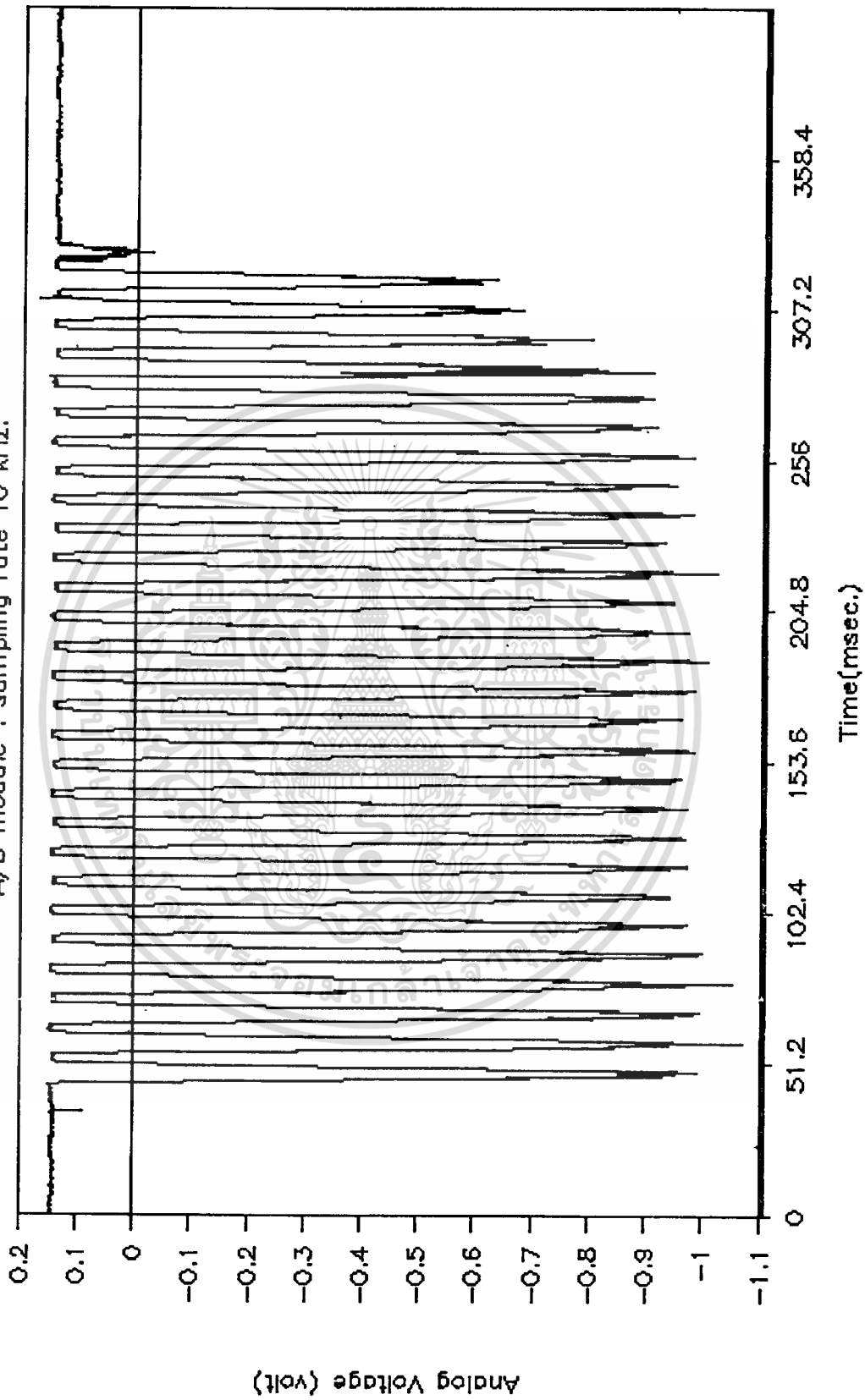
A/D module : sampling rate 10 kHz.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACOMA X-RAY : 50 kV, 50 mA.

A/D module : sampling rate 10 kHz.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

จากที่ได้ทำการออกแบบวงจร และทำการทดลองจนได้ผลการทดลองดังกล่าวมาแล้ว พอที่จะสรุปผลและวิจารณ์ได้โดยแบ่งเป็นส่วน ๆ ตามที่ทำการทดลอง คือ

5.1 ส่วนวงจรขยายและมัลติเพิลกซ์สัญญาณ

5.1.1 จากการทดลอง วงจรส่วนขยายและกรองความถี่ต่ำ ได้ผลตามความต้องการ คือ

- วงจรกรองความถี่ต่ำมีความถี่คutoff (ที่ $-3dB$) เท่ากับ 600 เฮิรต
- อัตราขยายที่ความถี่ต่ำราบเรียบเท่ากับดีซีเกน จนถึงความถี่ 450 เฮิรต แล้วจะเริ่มลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงความถี่คutoff
- โพรโตไทป์แสดงความเป็นเชิงเส้น กับความเข้มรังสีเอ็กซ์

5.1.2 วงจรชดเชย (Zero Compensator)

ทำงานได้ตามที่ออกแบบ คือกำจัดผลของออฟเซตได้ในช่วงเวลา 10 วินาที

5.1.3 วงจรแซมเปิ้ลและโฮล

ทำงานได้ตามต้องการในช่วงเวลา 20 มิลลิวินาที โดยไม่เกิดการครุฟ (เวลา 20 มิลลิวินาที เป็นเวลานานที่สุดในการรับข้อมูลในแต่ละตำแหน่งของระบบ)

จากผลการทดลองในส่วนนี้ ได้ผลตามวัตถุประสงค์ โดยเฉพาะออปแอมป์ของวงจร ส่วนแปลงกระแสจากตัวรับรังสีเอ็กซ์เป็นโวลเตจ แต่ในการใช้งานเพื่อให้สามารถสร้างภาพตัดขวางอาจจะได้ภาพที่คุณภาพที่ไม่ดีนัก เนื่องจากออปแอมป์ที่ใช้แม้จะมีคุณภาพค่อนข้างดี แต่ไม่ได้ออกแบบมา เพื่อใช้งานด้านนี้โดยเฉพาะ โดยมีคุณสมบัติที่ดีกว่า OPA 101 หลายประการ (ซึ่งเป็นออปแอมป์เบอร์หนึ่งที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานด้านนี้โดยเฉพาะ) เช่น อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราขยาย รวมถึงการที่ตัวถังไม่ใช้โลหะ และไม่มีการสัมผัสกับการ์ดรีจ โดยเฉพาะ

นอกจากนี้ วงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรแซมเปิ้ลแอนด์โฮล ทำให้เกิดเวลาหน่วงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งจะทำให้ข้อมูลความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่จับและพักในแต่ละตำแหน่ง ณ เวลานั้น ๆ ไม่ชัดเจน ไม่ช้ากว่านี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรกับความเข้มรังสีที่จุดนั้นจริง เนื่องจากสัญญาณได้ถูกหน่วงออกไป แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจากค่าเวลาหน่วงในช่วงความถี่ที่ทำงาน มีค่าค่อนข้างคงที่ ($\Delta T_d < 0.05$ มิลลิวินาที) และเมื่อเทียบเวลาหน่วงกับระยะเวลาห่างของเวลาในการเก็บข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง (20 มิลลิวินาที) แล้วมีค่าน้อยมาก จึงไม่น่ามีปัญหาต่อคุณภาพของภาพที่สร้างขึ้น

ส่วนวงจรชดเชยมี ชื่อนำสั่ง เกิดบางประการ คือ

1) ไม่สามารถชดเชยความผิดพลาด ที่ทำให้เอาท์พุทของวงจรขยายเกิน 0.1 โวลต์ได้ เนื่องจากออปแอมป์ตัวที่ชดเชยจะ เกิดอิมพัลส์เสียก่อน ดังนั้นในการใช้งานที่มีความผิดพลาดมากกว่า 0.1 โวลต์ จำเป็นต้องเปลี่ยนอัตราส่วนค่า R5 และ R6 ในภาพที่ 2.1.8 ให้มีค่าน้อยลง ซึ่งมีผลทำให้ C_{eff} ของวงจรจะลดลง ทำให้เอาท์พุทของวงจรชดเชยแปรตามค่าออสซิลของวงจรชดเชยเองมากขึ้น

2) การที่ขานอนอินเวอร์ติ่งของวงจรแปลงกระแส (จากไฟฟ้ได้ไดโอด) เป็นโวลเตจ ต่อกับวงจรชดเชย ทำให้เกิดไบอัสโวลเตจค่าหนึ่งกับตัวไฟฟ้ได้ไดโอด ซึ่งอาจทำให้ตัวไฟฟ้ได้ไดโอดแต่ละตัว มีค่าอัตราขยายกระแสต่อความเข้มรังสีต่างกันได้ แต่สามารถชดเชยผลอันนี้ได้ด้วยการ ปรับเกนของวงจรแอมป์ลิ่งแอนด์โฮล

3) ในการประกอบลงแผ่นวงจรพิมพ์ ต้องให้แน่ใจว่า R6 ในภาพ 2.1.8 ต่อกับเข้ากับจุดกราวด์ ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันอันตรายซึ่งอาจเกิดขึ้นกับไฟฟ้ได้ไดโอด อันเนื่องมาจากค่ารีเวอร์สไบอัสสูงเกินไปซึ่งจำกัดที่ผู้ผลิตกำหนดไว้

5.2 ส่วนวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส

จากการทดลอง พบว่าวงจรแสดงคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น และมีคุณลักษณะของแหล่งจ่ายกระแสที่ดี แต่ข้อควรระวังของวงจรก็คือ ค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจแสดงผลเป็นลบเนื่องจากค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ อันจะทำให้เกิดการออสซิลเลท หรือเอาท์พุทอิมพัลส์ได้ นอกจากนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์อาจทำให้เอาท์พุทอิมพีแดนซ์แม้จะมีค่าบวก แต่มีค่าต่ำเกินไปจนทำให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ไม่ดี โดยเฉพาะ เมื่อเอาท์พุทจากวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส แต่ละชุด (รวม 32 ชุด) ถูกนำมาต่อรวมกันซึ่งเป็นลักษณะที่ทำการใช้งานอยู่ ยิ่งจะทำให้ค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำลงอีกมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้การใช้งานยุ่งยากขึ้นอีกเล็กน้อย

นอกจากนี้ จากกราฟที่เขียนแสดงความสัมพันธ์ของ เอาท์พุทกับอินพุท จะเห็นว่าวงจรเริ่มอ้อมตัวที่โวลเตจอินพุทประมาณ 4-5 โวลต์ ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถแสดงได้ว่า

$$|V_i|_{\max} = V_{\text{sat}}/2$$

อันเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งของ วงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแสแบบนี้

5.3 ส่วนวงจรรับ

จากการทดลองวงจรขยายปรับค่าได้ พบว่าวงจรไม่มีปัญหาความเป็นเชิงเส้น แต่มีการตอบสนองด้านความถี่ไม่สูงนัก และในช่วงโวลเตจอินพุทใกล้ศูนย์ จะเกิดความเพี้ยนของสัญญาณขึ้นได้ ดังนั้นในการใช้งานวงจรที่ติดตั้ง การปรับปรุงวงจรอาจทำได้โดยการให้ไบอัสแก่วงจรขยายปรับค่าได้ ด้วยโวลเตจอินพุทประมาณ 0.5 โวลต์ แล้วทำการชดเชยด้วยการเพิ่มขนาดของแรงดันเบรียบเทียบ (V_{ref}) หรือลดขนาดของตัวต้านทาน R_7

สำหรับวงจรแปลงกระแสเป็นโวลเตจแบบดิฟเฟอเรนเชียล ทำการทดลองส่งสัญญาณพร้อมกับวงจรเปลี่ยนโวลเตจเป็นกระแส ตามหัวข้อ 5.2 คือใช้สองวงจรนี้ร่วมกันโดยเบรียบเทียบประสิทธิภาพการส่ง แบบส่ง 2 สายสัญญาณเดี่ยว (Single-ended) กับแบบส่ง 3 สายสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล ด้วยสายเกลียวธรรมดายาว 2 เมตร พบว่าการส่งแบบดิฟเฟอเรนเชียลปลอดภัยจากการรบกวนมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด

เนื่องจากการทดลองใช้การรับส่งระยะทางค่อนข้างสั้น ในการใช้งานจริง ซึ่งมีระยะห่างประมาณ 6 เมตร อาจเกิดสัญญาณรบกวนในระดับที่ไม่อาจยอมรับได้ การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ-ส่ง อาจทำได้โดยการใส่สายชิลด์ ซึ่งต่อเข้ากับวงจรดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์ ดังภาพที่ 5.1

นอกจากนี้ เนื่องจากเป็นการส่งแบบกระแส (Current Mode) ในการที่สายกราวด์-สัญญาณเกิดขาด จะทำให้ออปแอมป์ในวงจรดิฟเฟอเรนเชียลของภาครับอ้อมตัว ทำให้แสดงผลที่ผิดพลาดออกมาได้ ดังนั้นจึงควรมีวงจรสำหรับทดสอบ สายที่ใช้ส่งสัญญาณด้วย เช่น วงจรโวลเตจเป็นกระแสอีกรวมวงจรหนึ่ง สำหรับทดสอบสายสัญญาณ แล้วรับสัญญาณที่วงจรรับ ตรวจสอบความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองด้านว่าแปรผันกันหรือไม่ ก็จะทราบได้ว่าสายส่งสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ขาดหรือไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ส่วนวงจรควบคุมการรับและแปลงข้อมูล

วงจรถูกควบคุมที่ได้ทำการทดลองในหัวข้อ 4.7 สร้างสัญญาณควบคุมได้ตามแผนภูมิเวลา การทำงานของระบบที่ต้องการ

5.5 ส่วนแปลงข้อมูลจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล

จากการทดลองหัวข้อ 4.8 ยิงรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์โคมมา แล้วนำสัญญาณ จากวงจรถูกควบคุมรับรังสีเอ็กซ์ ทดสอบการทำงานของโปรแกรม CT-A/D และบอร์ด DT-2827

ได้ว่า วงจรอินเตอร์เฟซและส่วนแปลงข้อมูลจากอนาล็อกเป็นดิจิตอลทำงานได้ถูกต้อง

จากกราฟที่พล็อตได้ พบว่าคาบเวลาของสัญญาณเอ็กซ์เรย์เป็น 10 มิลลิวินาที (50 เฮิร์ต) จริงตามทฤษฎี





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
USES dos,printer,crt;
```

```
{ ***** GLOBAL TYPE DECLARATIONS ***** }
```

```
TYPE
```

```
Str4    = string[4];  
Str25   = string[25];  
Str80   = string[80];  
Charset = set of char;  
register = Registers;  
chrset  = set of char;  
  
DMABuffer1 = array [1..32760] of Word;  
FiVarTyp   = text;
```

```
{ ***** GLOBAL VARIABLE DECLARATIONS ***** }
```

```
VAR
```

```
BASE,                (* Base address *)  
MaskStatus,         (* status of interrupt mask reg.*)  
MaxChan             :integer; (* max ch. for A/D Board *)  
ADClockSpeed       :integer; (* max sampling rate A/D *)  
ch : char;  
Handle             :integer;  
RegWord,Gain,Channel:integer;  
Hexstring          : Str4;  
NewFi              : FiVarTyp;  
FiName             : string[14];  
FiVar              : text;  
Buff1              : DMABuffer1 absolute $9000:$0000;  
Bufsize,size       : word;  
bout               : byte;
```

```
{ ***** GLOBAL CONSTANT DECLARATIONS ***** }
```

```
CONST
```

```
ADR:LongInt = $90000;  
sup_l_dma   = $4410; (* for Sup_reg.*)  
WAITDELAY   = 100000;  
WARMUP_TIME = 3000; (* MilliSecond Unit *)  
X_RAY_OnTime= 250; (* MilliSecond Unit *)
```

```
(* DMA register constants *)
```

```
Port_A      = $2F4;  
Cmd_Port    = $2F7;  
Control_Word= $A0; (* 8255_Mode 0 *)  
PageReg5    = $8B;  
PageReg6    = $89;  
PageReg7    = $8A;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
BaseReg5 = $C4;
CountReg5 = $C6;
BaseReg6 = $C8;
CountReg6 = $CA;
BaseReg7 = $CC;
CountReg7 = $CE;
MaskReg = $D4;
ModeReg = $D6;
FlipFlop = $D8;
```

```
Bit0 = $1 ; (* lsb *)
Bit1 = $2 ; (* Bit 1 value *)
Bit2 = $4 ; (* Bit 2 value *)
Bit3 = $8 ; (* Bit 3 value *)
Bit4 = $10 ; (* Bit 4 value *)
Bit5 = $20 ; (* Bit 5 value *)
Bit6 = $40 ; (* Bit 6 value *)
Bit7 = $80 ; (* Bit 7 value *)
Bit8 = $100; (* Bit 8 value *)
Bit9 = $200; (* Bit 9 value *)
Bit10 = $400; (* Bit 10 value *)
Bit11 = $800; (* Bit 11 value *)
Bit12 = $1000; (* Bit 12 value *)
Bit13 = $2000; (* Bit 13 value *)
Bit14 = $4000; (* Bit 14 value *)
Bit15 = $8000; (* msb *)
```

```
(* Interrupt register constants *)
```

```
IntCommandMaster = $20 ;
IntCommandSlave = $A0 ;
IntEOI = $20;
ADCSR = $249;
CHLCSR = $242;
ADDAT = $244;
DA_DIOCSR = $246;
DADAT = $248;
DIODAT = $24A;
SUPCSR = $24C;
THRCTR = $24E;
```

```
IntMaskReg : integer = $A1 ; (* 8259 Mask Register address *)
IntVectorCode : integer = $2577; (* Set Vector Code and number *)
IRQ_line : integer = $80; (* IRQ bit value of Mask *)
```

```
Offset1: integer = 0; (* absolute offset from Data Segment of Buffer1 *)
```

```
Offset2: integer = 0; (* absolute offset from Data Segment of Buffer2 *)
```

```
ADerrorflag : Boolean = FALSE; (* flag set if AD error during DMA *)
```

```
DMAbufferdone : Boolean = FALSE; (* flag set when buffer is done in DMA single ch.*)
```

```
ExitDMA : Boolean = FALSE; (* flag set when exit DMA continuous *)
```

```

procedure SetBoard;
begin
  Portw[TMRCTR] := ADClockSpeed;
  Portw[SUPCSR] := Bit9 OR Bit6 OR Bit13; (*clear A/D pipeline and bufferB*)
  Portw[CHLCSR] := Bit15 ;
  Portw[ADCSR] := Bit9 OR Bit6 OR (RegWord);(*enable A/D clock and Interrupt on done*)
  Portw[CHLCSR] := Portw[CHLCSR] AND (NOT Bit15);
  Portw[SUPCSR] := Sup_1_dma;
  WaitTolow;
end;

```

```

procedure WaitTolow;
var  Timer : Integer;
      Tolow : Boolean;
begin
  { now wait for MUX BUSY to go low }
  Timer := 10000;
  repeat
    Timer := Timer - 1;
    Tolow := (Portw[ADCSR] AND Bit8) = 0;
    if Timer = 0 then
      begin
        Timer := 10000;
        Writeln('MUX BUSY will not clear in ADCSR !!!');
      end;
  until Tolow;
end;

```

```

procedure Initbuffers;
var  number,i : Word;
begin
  number := Bufsize;
  for i:= 1 to number do
    begin
      Buffl[i] := $0;
    end;
  writeln(' Initial complete...');
end;

```

```

{F+}
procedure ADIntHandler;
{F-}
interrupt;
BEGIN
  inline($9C/ { PUSHF }
          $FA); { CLI  }
  (* check A/D error *)
  if (Portw[ADCSR] AND Bit15) = Bit15 then
    ADerrorflag := TRUE;
  (* if DMA done clear it and set flag *)

  if (Portw[SUPCSR] AND Bit15) = Bit15 then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        ADerrorflag := TRUE;
(* if DMA done clear it and set flag *)

if (Portw[SUPCSR] AND Bit15) = Bit15 then
    begin
        DMABufferdone := TRUE;
        Portw[SUPCSR] := Portw[SUPCSR] OR Bit13;
    end;

(* first issue EOI to master 8259 *)

Port[IntCommandMaster] := IntEOI;

(* if interrupt was on slave 8259 then issue a EOI to it too. *)
if IntMaskReg = $A1 then
    Port[IntCommandSlave] := IntEOI;

inline($FB); (* STI *)
END;

procedure SetInterrupt;
var
    Regs : Registers;
    BEGIN
(* first set up interrupt vector *)
        SetIntVec ($77,@ADIntHandler);
(* now set IRQ interrupt line *)
inline($FA); (* disable all interrupts *)
Port[$21] := Port[$21] OR 1; (* Disable system clock *)
MaskStatus := Port[IntMaskReg];(* get status of MASK register *)
Port[IntMaskReg] := MaskStatus AND (NOT IRQ_line); (* enable IRQ line *)
inline($FB); (* enable all interrupts *)
    END;

procedure select(x,y:integer;A:Str80;one:Charset;var B:char);
Label input;
begin
    input:   ClrScr;
            gotoXY(x,y); write(A);
    B := Readkey; write(B);
    if (B in ['0','1','2','3']) then
        begin end
    else
        begin writeln(chr(7)); goto input; end
end;

procedure wait;
begin
    Ch := readkey;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure HexToDec(var C:integer;D:char);
var code:integer;
begin
  if Ucase(D) in [ '0'..'9' ] then
    Val(D,C,code);
  if Ucase(D) in [ 'A'..'F' ] then
    case Ucase(D) of
      'A' : C := 10;
      'B' : C := 11;
      'C' : C := 12;
      'D' : C := 13;
      'E' : C := 14;
      'F' : C := 15;
    end;
end;

procedure EnterChannel;
label Retry;
var Gain,
    Timer,i : integer;
    Chan : Char;
begin
Retry: ClrScr;
  Gain := 0; MaxChan := 3;
  gotoXY(20,9);Write('Legal Channels : ');
  write('(0 - ',MaxChan,')');
  Select(20,10,'Enter channel number ',['0'..'9','A'..'F'],Chan);
  HexToDec(Channel,Chan);
  if Channel > MaxChan then
    goto Retry;
  RegWord := (Gain SHL 4) + Channel;
  ClrScr;
  gotoXY(27,23);
  Write('Channel : ',Chan,' Gain : 1');
  writeln;
end;

procedure BoardInit;
begin
  ClrScr;
  Portw[SUPCSR] := Bit0 OR Bit6;
  gotoXY(15,10); writeln('Board Initial : Hit Keyboard..to Go On');
  wait;
end;

procedure WarmUpTime(tx :word);
begin
  Sound(220); Delay(tx); NoSound;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure X_ON_Time(tx :word);
begin
    Sound(2200); Delay(tx); NoSound;
end;

procedure WarmUp_X_RAY;
begin
    Port[Cmd_Port] := Control_Word;      (* Control Port_8255 *)
    Port[Port_A]   := Bit0;              (* Port A *)
    WarmUpTime(WARMUP_TIME);
end;

procedure On_X_RAY;
begin
    Port[Port_A]   := Bit0 OR Bit3;
    X_ON_Time(X_RAY_OnTime);
end;

procedure Off_X_RAY;
begin
    Port[Port_A]   := $0;
end;

Function Match(Test : Word): char;
var    ch    : char;
begin
    if Test = 0 then ch := '0';
    if Test = 1 then ch := '1';
    if Test = 2 then ch := '2';
    if Test = 3 then ch := '3';
    if Test = 4 then ch := '4';
    if Test = 5 then ch := '5';
    if Test = 6 then ch := '6';
    if Test = 7 then ch := '7';
    if Test = 8 then ch := '8';
    if Test = 9 then ch := '9';
    if Test = 10 then ch := 'A';
    if Test = 11 then ch := 'B';
    if Test = 12 then ch := 'C';
    if Test = 13 then ch := 'D';
    if Test = 14 then ch := 'E';
    if Test = 15 then ch := 'F';
    Match := ch;
end;

function Hexit( Value : Word ):str4;
var Test1,i : LongInt;
    x      : array[0..3] of char;
    HexValue : string[4];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

begin
    Test1 := Value and $000F;
    x[3] := Match(Test1);

    Test1 := Value and $00F0;
    Test1 := Test1 shr 4;
    x[2] := Match(Test1);

    Test1 := Value and $0F00;
    Test1 := Test1 shr 8;
    x[1] := Match(Test1);

    Test1 := Value and $F000;
    Test1 := Test1 shr 12;
    x[0] := Match(Test1);
    Hexit := x;
end;

procedure Initial;
var i : word;
begin
    Portw[SUPCSR] := Bit0 OR Bit6;
end;

procedure Window_Frame(a :byte;b :byte;c :byte;d :byte;text :Str25);
var len :byte;
begin
    clrscr;
    window(a,b,c,d);
    len := trunc(length(text)/2);
    gotoxy(30-len,b);
    write(text);
    writeln;
end;

procedure chkReg;
begin
    writeln;
    writeln('...DT-2827 Register : ');
    writeln('Portw[ADCSR] = ', Hexit(Portw[ADCSR]));
    writeln('Portw[CHLCSR] = ',Hexit(Portw[CHLCSR]));
    writeln('Portw[ADDAT] = ', Hexit(Portw[ADDAT]));
    writeln('Portw[DIODAT] = ',Hexit(Portw[DIODAT]));
    writeln('Portw[SUPCSR] = ',Hexit(Portw[SUPCSR]));
    writeln('Portw[TMRCTR] = ',Hexit(Portw[TMRCTR])); writeln;
end;

procedure ADstart;
begin
    AErrorflag := False;
    DMAbufferdone := False;
    WarmUp_X_Ray;
    Port[MaskReg] := $1; (* enable DMA Ch.5 *)
    Portw[SUPCSR] := Portw[SUPCSR] OR Bit3; (* enable A/D *)
    On_X_Ray;
    Off_X_Ray;
end;

```

```

procedure ADwait( d1 :LongInt);
var ii : LongInt;
begin
  ii := d1;
  repeat
    DMAbufferdone := (Portw[SUPCSR] AND Bit15) = Bit15;
    ii := ii-1;
  until (DMAbufferdone OR ADerrorflag OR (ii<=0 ));
  writeln('...DMAbufferdone = ',DMAbufferdone,' ADerrorflag = ',ADerrorflag);
end;

procedure chkBuffer(Buf :DMABuffer1; bs :word);
var i :word;
    all0 :boolean;
begin
  all0 := TRUE;
  writeln('Buffer ',bs contain : '); writeln;
  for i:=1 to (bs) do (* check number = bs *)
    begin
      if Buf[i] <> 0 then
        begin
          writeln(' Buf1[i] = ',Hexit(buf[i]));
          all0 := FALSE
        end;
      end;
    if (all0) then
      writeln(' All buffer ',s values are zeroes. ');
end;

procedure chkHandler;
begin
  writeln('Handler Segment := ',Hexit(Seg(ADIntHandler)));
  writeln('Handler Offset := ',Hexit(OFS(ADIntHandler)));
end;

procedure InterruptReset;
begin
  inline($FA); (* disable all interrupts *)
  Port[$21] := Port[$21] AND $FE; (* enable system clock *)
  MaskStatus := Port[IntMaskReg];
  Port[IntMaskReg] := (MaskStatus OR IRQ_line);
  inline($FB); (* enable all interrupts *)
end;

procedure ADok;
begin
  Portw[SUPCSR] := Bit14 OR Bit13 OR Bit10; (*A/D Clocked DMA mode*)
end;

procedure ClearPipeline;
begin
  Portw[SUPCSR] := Bit6 OR Bit9; (* Clear A/D pipeline and BUFFER B *)
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure chkDMA;
begin
  writeln('Low byte for DMA Base Offset(now) = ',Hexit(Port[BaseReg5]));
  writeln('Hi byte for DMA Base Offset(now) = ',Hexit(Port[BaseReg5]));
  writeln('DMA Page byte      = ',Hexit(Port[PageReg5]));
  writeln('Low byte DMA Count = ',Hexit(Port[CountReg5]));
  writeln('Hi byte DMA Count = ',Hexit(Port[CountReg5]));
  writeln('Status byte DMA   = ',Hexit(Port[$D0]));
end;

function Convert(Adv :longint):real;
var
  AnalogV :real;
const
  NOC = 65536;          { Number Of Code used by the 16 Bits A/D converter }
  Full_range = 20;     { Full range for the Bipolar range }
begin
  if Adv <= 32767 then { +FS - 1LSB }
    AnalogV := Adv * (Full_range)/ NOC
  else
    begin
      Adv := (65536 -Adv);
      AnalogV := -Adv * (Full_range)/ NOC
    end;
  Convert := AnalogV;
end;

procedure DoNothing;
begin end;

function Created(var Fi :FiVartyp):boolean;
begin
  {$I-} Reset(Fi); {$I+}
  Created := (IOresult = 0);
end;

procedure EnterFiName;
label AGAIN;
begin
  AGAIN:
    clrscr;
    write('Enter filename to save data: ');
    readln(FiName);
    assign(FiVar,FiName);
    if Created(FiVar) then
      begin writeln;
        write('** Overwrite the file ',FiName,' :(y/n)? ');
        readln(ch); if upcase(ch) = 'N' then goto AGAIN;
          if upcase(ch) = 'Y' then DoNothing else
            begin write('~H,chr(7)); goto AGAIN; end;
        end
      end;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure OpenFile;
begin rewrite(FiVar); end;

procedure CloseFile;
begin close(Fivar); end;

procedure ChangePattern;           { Change from 2's binary code to real number }
var
  DS,SegOff : word;
  Segment,X : word;
  Value      : word;
  DataValue  : real;               { Real value uses 6 bytes }
procedure WriteToFile;
begin
  writeln(Fivar,DataValue);       { one data uses 1 line }
end;
begin
  SegOff := Offset1;
  DS := $9000;
  Segment := DS;

  for X := 1 to Bufsize do
  begin
    Value := Memw[Segment:SegOff];
    DataValue := Convert(Value);
    WriteToFile;
    SegOff := SegOff + 2;
    if SegOff = 0 then
      Segment := Segment + $1000;
  end
end;   { ChangePattern }

procedure Display;
var
  SegOff,Segment : Word;
  DS, Value,X : Word;
  MinValHex, MaxValHex, HexValue : Str4;
  Maxval,MinVal : Word;
begin
  if AErrorflag then
    writeln(' A/D Error Bit Was Set !!');
  MaxVal := $8000;
  MinVal := $7FFF;

  SegOff := Offset1;
  DS := $9000;
  Segment := DS;

  for X := 1 to Bufsize do
  begin
    if Value > MaxVal then MaxVal := Value;
    if Value < MinVal then MinVal := Value;
    SegOff := SegOff + 2;
  end
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        if SegOff = 0 then          Segment := Segment + $1000;
    end;
    MinValHex := Hexit(MinVal);
    MaxValHex := Hexit(MaxVal);
        window(1,1,80,25);   clrscr;
        GotoXY(60,23); Write('Maximum = ',MaxValHex);
        GotoXY(60,24); Write('Minimum = ',MinValHex);
        GotoXY(5,20); Window(5,4,75,20);

    SegOff := Offset1;   Segment := DS;

writeln; write(' ');
for X := 1 to Bufsize do
    begin
        Value := Memw[Segment:SegOff];
        HexValue := Hexit(Value);
        Write(' ',HexValue,' ');
        SegOff := SegOff + 2;
        if SegOff = 0 then
            Segment := Segment + $1000;
        if (X MOD 8) = 0 then begin writeln; write(' '); end;
        end; (* end of for *)
    Window(1,1,80,25); clrscr;
end;

procedure Loopflag;
begin
    repeat
        ADerrorflag := (Portw[ADCSR] AND Bit15) = Bit15;
        if ADerrorflag then
            writeln('A/D Error Bit was Set !!!');
        writeln('...inloop: DMAbufferdone = ',DMAbufferdone,' ADerrorflag = ',ADerrorflag);
    until DMAbufferdone OR ADerrorflag;
end;

procedure SetDMA(var Buff : DMABuffer1);
begin
    Port[ModeReg] := $45;          (* Set mode for write DMA ch.5 No-Autoinit.*)
    Port[FlipFlop] := $0;         (* Reset F/F *)

    bout := LO(adr shr 1);
    writeln('Low byte for DMA Base address (Shr 1) = ',Hexit(bout));
    Port[BaseReg5] := bout;      (* Write Low byte to DMA Base register *)

    bout := LO(adr shr 9);
    writeln('High byte for DMA Base address (Shr 9) = ',Hexit(bout));
    Port[BaseReg5] := bout;      (* Write High byte to DMA Base register *)

    bout := LO(adr shr 16);
    writeln('DMA Page byte = ',Hexit(bout));
    Port[PageReg5] := adr shr 16;

    writeln('Buffer size = ',Bufsize);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

size := Bufsize -1;
bout := LO(size);
writeln('Low byte for DMA Count = ',Hexit(bout));
Port[CountReg5] := bout;      (* Write low byte to DMA count register *)

bout := LO(size shr 8);
writeln('High byte for DMA Count = ',Hexit(bout));
Port[CountReg5] := bout;      (* Write high byte to DMA count register *)
end;

procedure DMA_AD;
var
    SegOff,Segment :Word;
    Timer ,i      : integer;
    DS ,Value     : Word;
    Ready         : Boolean;
    HexS, MinValHex, MaxValHex,
    HexValue      : Str4;
    Maxval,MinVal: Word;
begin
    EnterPiName;

    Initial;

    InterruptReset;

    EnterChannel;

    ADClockSpeed := $29B;      (* choose Sampling rate 10 kHz. *)

    setboard;

    chkReg;   chkHandler;
    SetInterrupt;

    GetIntadr; chkReg;

    InitBuffers;      (* zero out buffer *)

    Portw[SUPCSR] := Bit10 OR Bit14;

    (* set DMA mode and Interrupt on error *)

    writeln(' start conversion...');
    writeln('...DMA Setting : ');      (* now set DMA channel 5 *)

    SetDMA(Buff1);

    ADstart;          (* then Control_X_RAY *)

    ADwait(WAITDELAY);      (* Wait buffer to be done *)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

OpenFile;
ChangePattern;
CloseFile;

InterruptReset;

Loopflag;          (* to Check error *)
ClearPipeline;

Display;

InterruptReset;
ADok;
BoardInit;
end;

begin { Main }
  Bufsize := 24*1024;      (* Data buffer size 24k *)

  DMA_AD;                (* use only DMA single ch. *)

  loopflag; wait;
end.

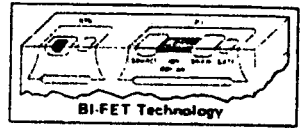
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Operational Amplifiers/Buffers



LF155/LF156/LF157 Series Monolithic JFET Input Operational Amplifiers

LF155, LF155A, LF255, LF355, LF355A, LF355B Low Supply Current

LF156, LF156A, LF256, LF356, LF356A, LF356B Wide Band

LF157, LF157A, LF257, LF357, LF357A, LF357B Wide Band Decompensated ($A_{V_{MIN}} = 5$)

General Description

These are the first monolithic JFET input operational amplifiers to incorporate well matched, high voltage JFETs on the same chip with standard bipolar transistors (BI-FET Technology). These amplifiers feature low input bias and offset currents, low offset voltage and offset voltage drift, coupled with offset adjust which does not degrade drift or common-mode rejection. The devices are also designed for high slew rate, wide bandwidth, extremely fast settling time, low voltage and current noise and a low 1/f noise corner.

- Photocell amplifiers
- Sample and Hold circuits

Common Features

(LF155A, LF156A, LF157A)

■ Low input bias current	30 pA
■ Low Input Offset Current	3 pA
■ High input impedance	$10^{12} \Omega$
■ Low input offset voltage	1 mV
■ Low input offset voltage temperature drift	$3 \mu V/^{\circ}C$
■ Low input noise current	$0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
■ High common-mode rejection ratio	100 dB
■ Large dc voltage gain	106 dB

Advantages

- Replace expensive hybrid and module FET op amps
- Rugged JFETs allow blow-out free handling compared with MOSFET input devices
- Excellent for low noise applications using either high or low source impedance—very low 1/f corner
- Offset adjust does not degrade drift or common-mode rejection as in most monolithic amplifiers
- New output stage allows use of large capacitive loads (10,000 pF) without stability problems
- Internal compensation and large differential input voltage capability

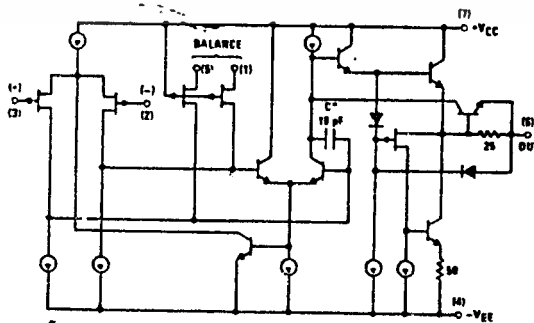
Uncommon Features

	LF155A	LF156A	LF157A	UNITS
Extremely fast settling time to 0.01%	4	1.5	1.5	μs
Fast slew rate	5	12	50	V/ μs
Wide gain bandwidth	2.5	5	20	MHz
Low input noise voltage	20	12	12	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Applications

- Precision high speed integrators
- Fast D/A and A/D converters
- High impedance buffers
- Wideband, low noise, low drift amplifiers
- Logarithmic amplifiers

Simplified Schematic



DC Electrical Characteristics (Note 3)												
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	LF155/6/7			LF255/6/7 LF355B/68/7B			LF355/6/7			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V _{OS}	Input Offset Voltage	R _S = 50Ω, T _A = 25°C Over Temperature		3	5 7		3	5 6.5	3	10 13		mV mV
ΔV _{OS} /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R _S = 50Ω		5		5		5				μV/°C
ΔTC-ΔV _{OS}	Change in Average TC with V _{OS} Adjust	R _S = 50Ω, (Note 4)		0.5		0.5		0.5				μV/°C per mV
I _{OS}	Input Offset Current	T _J = 25°C, (Notes 3, 5) T _J ≤ T _{HIGH}		3	20 20		3	20 1	3	50 2		μA nA
I _B	Input Bias Current	T _J = 25°C, (Notes 3, 5) T _J ≤ T _{HIGH}		30	100 50		30	100 5	30	200 8		μA nA
R _{IN}	Input Resistance	T _J = 25°C		10 ¹²		10 ¹²		10 ¹²				Ω
A _{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V _S = ±15V, T _A = 25°C V _O = ±10V, R _L = 2k Over Temperature	50	200		50	200		25	200		V/mV V/mV
V _O	Output Voltage Swing	V _S = ±15V, R _L = 10k V _S = ±15V, R _L = 2k	±12 ±10	±13 ±12		±12 ±10	±13 ±12		±12 ±10	±13 ±12		V
V _{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	V _S = ±15V	-11	+15.1 -12		-11	+15.1 -12		±10	+15.1 -12		V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio		85	100		85	100		80	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	85	100		85	100		80	100		dB

DC Electrical Characteristics T_A = 25°C, V_S = ±15V

PARAMETER	LF155A/155, LF255, LF355A/355B		LF355		LF156A/156, LF256/356B		LF356A/356		LF157A/157 LF257/357B		LF357A/357		UNITS
	TYP	MAX	TYP	MAX	TYP	MAX	TYP	MAX	TYP	MAX	TYP	MAX	
Supply Current	2	4	2	4	5	7	5	10	5	7	5	10	mA

AC Electrical Characteristics T_A = 25°C, V_S = ±15V

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	LF155/255/ 355/355B	LF156/256, LF356B	LF156/256/ 356/356B	LF157/257, LF357B	LF157/257/ 357/357B	UNITS
			TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	
SR	Slew Rate	LF155/6: A _v = 1, LF157: A _v = 5	5	7.5	12	30	50	V/μs V/μs
GBW	Gain Bandwidth Product		2.5		5		20	MHz
t _s	Settling Time to 0.01%	(Note 7)	3		1.5		1.5	μs
e _n	Equivalent Input Noise Voltage	R _S = 100Ω f = 100 Hz f = 1000 Hz	25 20		15 12		15 12	nV/√Hz nV/√Hz
i _n	Equivalent Input Current Noise	f = 100 Hz f = 1000 Hz	0.01 0.01		0.01 0.01		0.01 0.01	pA/√Hz pA/√Hz
C _{IN}	Input Capacitance		3		3		3	pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการชิ้นนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ก็เนื่องจากพระคุณของอาจารย์ที่ช่วยให้คำแนะนำ
สั่งสอนได้ให้ความรู้ตั้งแต่เริ่มเข้ามาศึกษาในสถาบันจนถึงปัจจุบัน และขอขอบคุณ ศจ.ดร.ไพรัช
ธัชพงษ์ และ อาจารย์พลผดุง ผดุงกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. คู่มือ/เทียบเบอร์ ไอซี TTL. พิมพ์ครั้งที่ 5. นวัตกรรมพิมพ์, 2530.
2. นพพร โชติภักดิ์, อาวิน แสงอรุณ. "วงจรรับรังสีเอ็กซ์และระบบการแปลงข้อมูลเป็นข้อมูลเชิงเลขสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ภาพตัดขวางอวัยวะ" วิทยุอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2532.
3. Barnes, John R. *Electronic System Design (Interference and Noise Control Techniques)*, Prentice-Hall, U.S.A., 1987.
4. Dailey, Denton J. *Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits*, McGraw-Hill, U.S.A., 1989.
5. EggeBrecht, Lewis C. *Interfacing to the IBM Personal Computer*, Howard W. Sams & Co., Inc., U.S.A., 1983.
6. Franco, Sergio. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuit*, McGraw-Hill, U.S.A., 1988.
7. IBM. *PC-AT Technical Reference*, U.S.A., 1983.
8. Jump, Dennis N. *Programmers's Guide to MS-DOS Revised and Expanded*, Prentice-Hall, U.S.A., 1987.
9. Millman, Jacob., and Grabel, Arwin. *Microelectronics*, McGraw-Hill, Singapore, 1987.
10. Schildt, Herbert. *Advanced Turbo Pascal*, McGraw-Hill, U.S.A., 1988.
11. Tran Tien Lang. *Electronics of Measuring Systems (Design and Measurement in Electronic Engineering)*, Wiley, Great Britain, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้