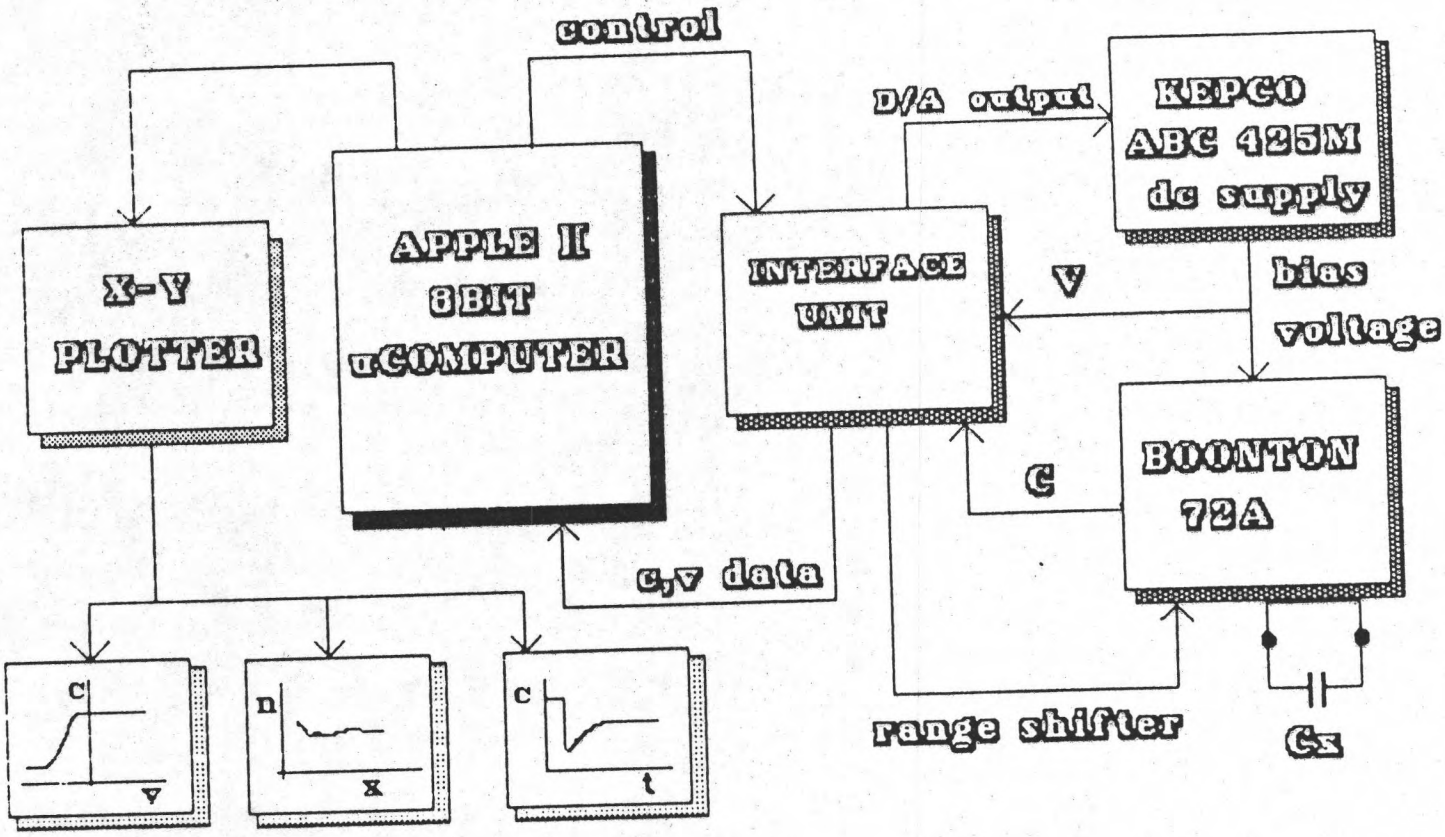
บทที่ 4

ระบบ ซี-วี

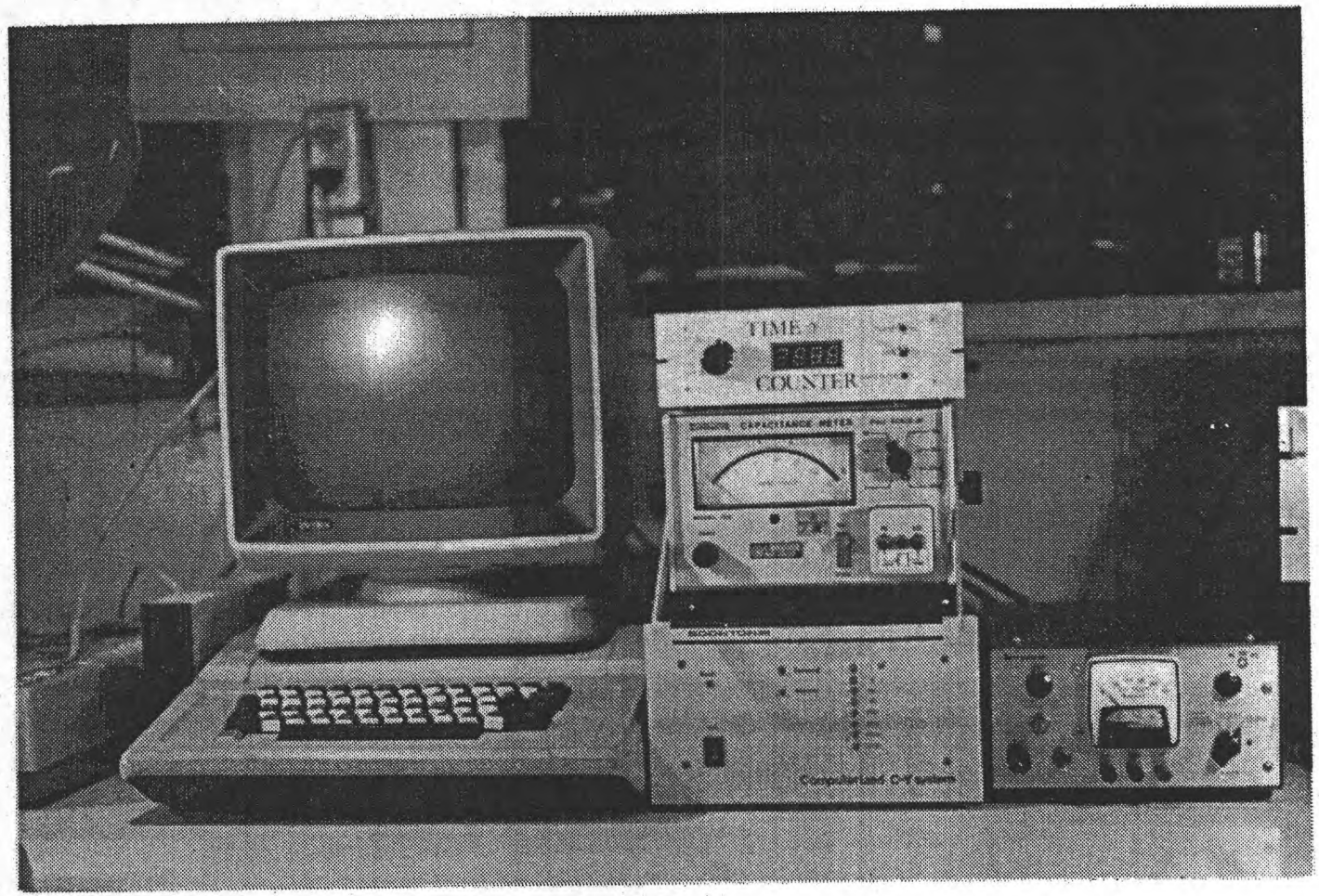
แนวความคิดในการออกแบบระบบที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการนำอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมคือเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า Boonton 72A และเครื่องจ่ายไฟตรงแบบโปรแกรมได้ Kepco ABC 425M มาเชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์แอปเปิลทู โดยสร้างวงจรอินเตอร์เฟสขึ้นเอง ซึ่งประกอบด้วยวงจรเลือกย่านการวัดค่าความจุไฟฟ้า , วงจรแปลงข้อมูลจากดิจิตอลให้เป็นอนาลอก ใช้ในการควบคุมแรงดันไบแอสและวงจรแปลงข้อมูลจากอนาลอกให้เป็นดิจิตอลใช้ในการอ่านค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่ใช้ไบแอส โปรแกรมหลักที่ใช้ในการควบคุมการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเขียนด้วยภาษาเบสิก จึงง่ายต่อการดัดแปลงและพัฒนาระบบให้มีความสามารถมากขึ้น

ระบบ ซี-วี นี้ยังสามารถวัดลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลาได้อีกด้วย โดยใช้งานร่วมกับเครื่องวัดคาบเวลาที่ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์แอปเปิลทู ในรูปที่ 4.1 แสดงถึงไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบ ซี-วี และในรูปที่ 4.2 เป็นระบบ ซี-วี ที่ได้สร้างและทดลองใช้แล้ว ในบทนี้จะได้กล่าวถึงส่วนประกอบของระบบ ซี-วี และโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลตามลำดับ



COMPUTERIZED C-V SYSTEM

รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบ ซี-วี

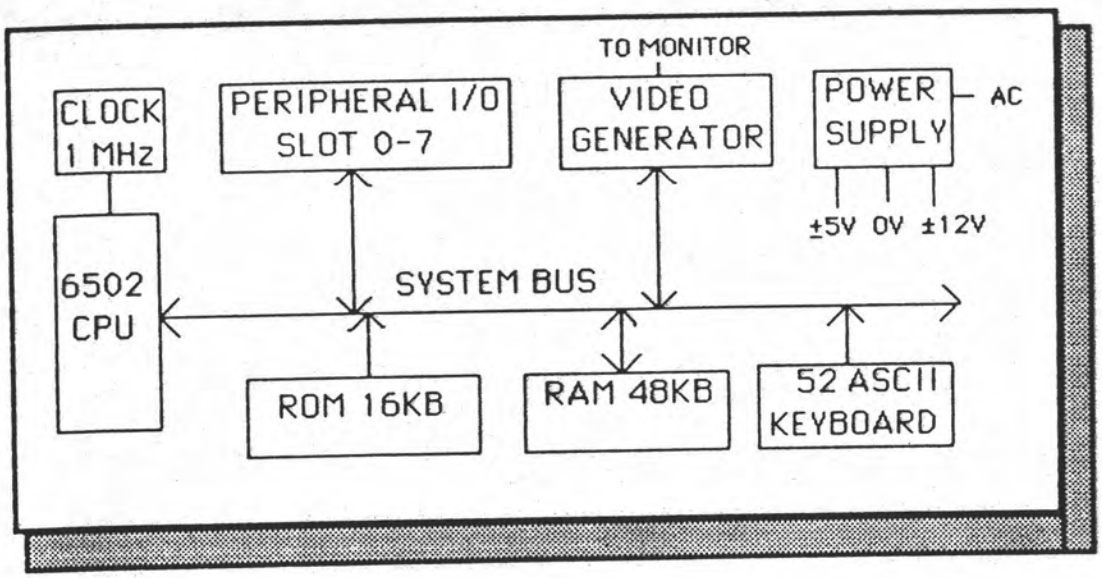


รูปที่ 4.2 ระบบซี-วีที่ได้สร้างเสร็จแล้ว

4.1 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์แอปเปิลทู

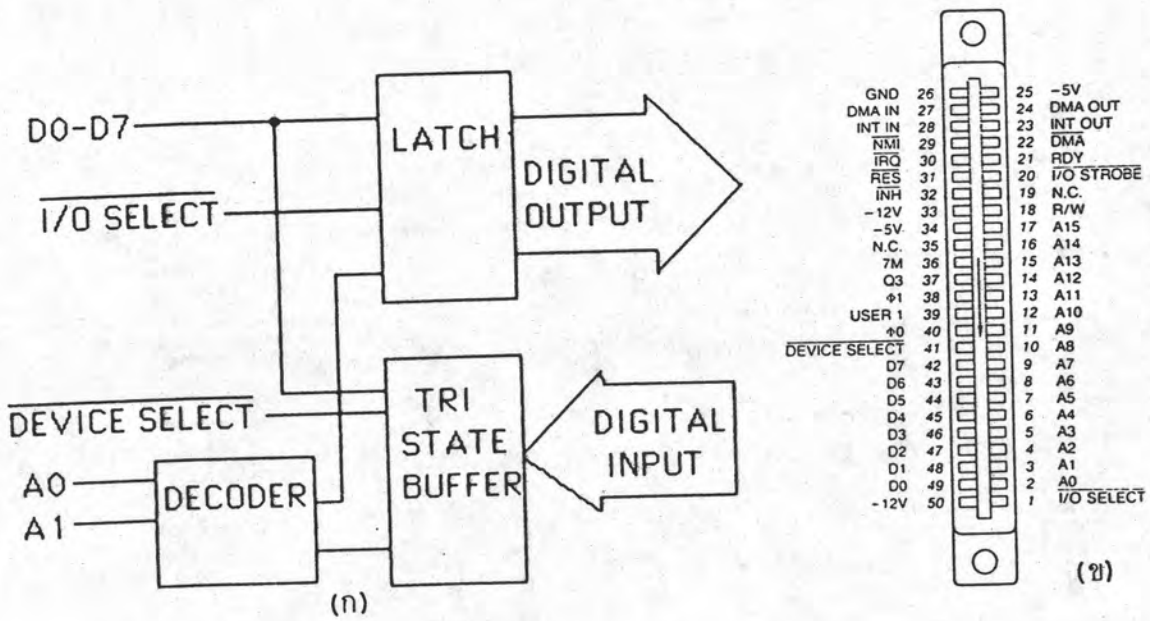
เป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์แอปเปิลทูเป็นไมโครคอมพิวเตอร์ชนิด 8 บิทที่ได้รับความสำเร็จสูงสุดในด้านประสิทธิภาพและความสะดวกของการใช้งาน จนมีผู้เลียนแบบผลิตออกสู่ตลาดในชื่อการค้าต่าง ๆ มากมาย จึงทำให้มีราคาถูกลง ปัจจุบันถึงแม้ว่าจะมีเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิท ได้รับการผลิตและมีการใช้งานกันมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องแอปเปิลทูเนื่องจากประสิทธิภาพและราคาของเครื่องเหมาะสมกับระบบที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องแอปเปิลทูที่ใช้ประกอบด้วยบอร์ดซีพียูขนาดหน่วยความจำพื้นฐาน 48 KB, คีย์บอร์ดขนาด 52 คีย์ แผ่นควบคุมเครื่องบันทึกจานแม่เหล็ก, เครื่องบันทึกจานแม่เหล็ก 1 เครื่อง และจอภาพชนิดโมโนโครม การเชื่อมต่อกับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดจะกระทำผ่านทางสลอต (slot) หมายเลข 5 โดยมีวงจรอินเตอร์เฟสที่ได้สร้างขึ้นมาโดยใช้วัสดุภายในประเทศเป็นส่วนเชื่อมต่อ สำหรับวงจรอินเตอร์เฟสจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4 โครงสร้างของเครื่องแอปเปิลทู แสดงดังรูปที่ 4.3 การรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องแอปเปิลทูกับวงจรอินเตอร์เฟสจะติดต่อผ่านทางอินพุทพอทและเอาท์พุทพอทขนาด 24 บิท โดยมีกลุ่มของสัญญาณที่ใช้ในการอินเตอร์เฟส ดังนี้

1. DØ-D7 เป็นบัสข้อมูลขนาด 8 บิท ชนิดสองทางใช้รับส่งข้อมูล
2. AØ และ A1 เป็นสายแอดเดรสเพื่อใช้บ่งตำแหน่งของพอท
3. $\overline{\text{DEVICE SELECT}}$ เป็นสัญญาณควบคุมการอ่านข้อมูลจากอินพุทพอท
4. $\overline{\text{I/O SELECT}}$ เป็นสัญญาณควบคุมการเขียนข้อมูลไปยังเอาท์พุทพอท
5. +5V และ GND เป็นแหล่งจ่ายไฟเพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเตอร์เฟสส่วนที่เป็นวงจรดิจิตอล



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของเครื่องแอปเปิลทู

สำหรับการเชื่อมต่อกับอินพุทพอท, เอาท์พุทพอท และการจัดขาของขั้วต่อขยายระบบ แสดงดังรูปที่ 4.4 ก. และรูปที่ 4.4 ข. ตามลำดับ



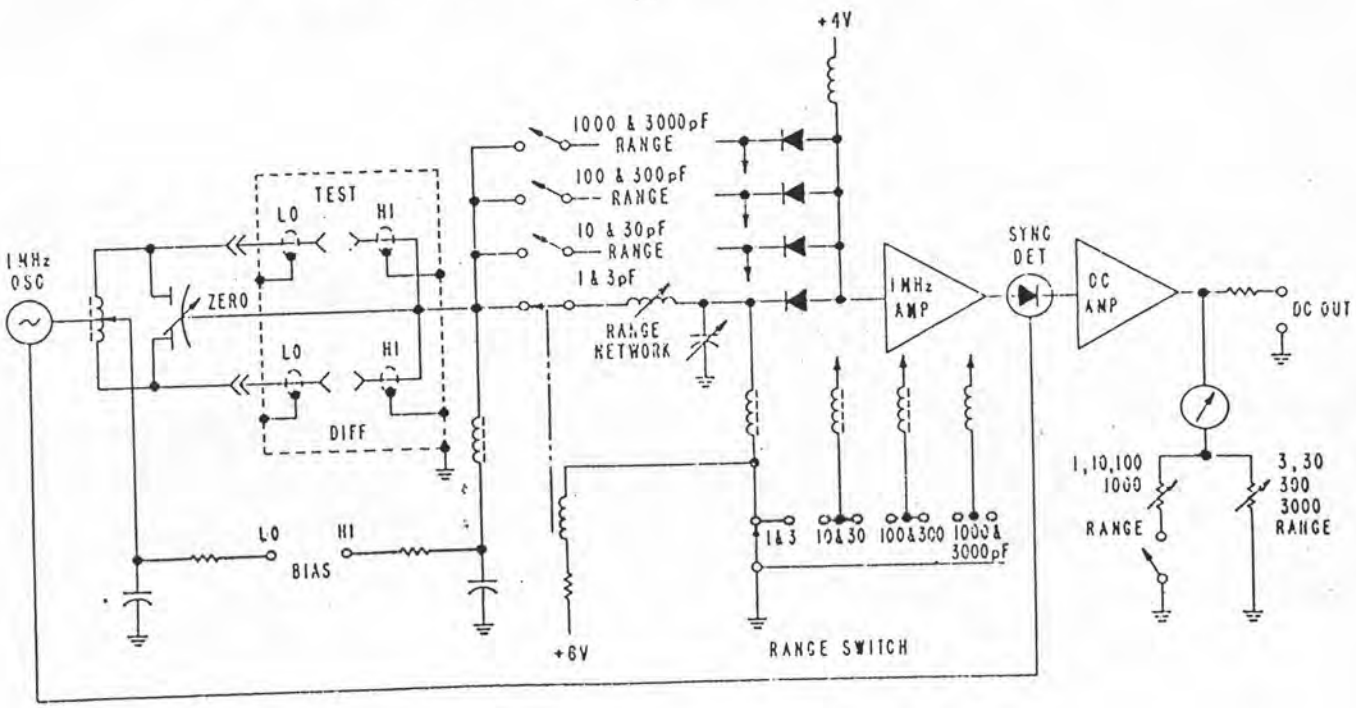
รูปที่ 4.4 ก. แสดงการเชื่อมต่อกับอินพุทและเอาท์พุทพอท

ข. การจัดขาขั้วต่อขยายระบบ

4.2 เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า Boonton 72A [12]

ส่วนประกอบของระบบ ซี-วี ที่สำคัญคือ เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้าในระบบที่ได้ออกแบบมานี้ เราใช้เครื่อง Boonton 72A ซึ่งเป็นเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้าแสดงผลด้วยมิเตอร์ชนิดเข็ม และมีย่านการวัด 8 ย่าน ตั้งแต่ 1 pF ไปจนถึง 3000 pF โดยย่านการวัดสามารถเลือกได้จากสวิทช์ที่หน้าปัดหรือใช้การควบคุมจากวงจรภายนอกได้ อุปกรณ์ที่ใช้ภายในเครื่องเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำทั้งสิ้น และสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบได้จากวงจรกำเนิดความถี่ที่ควบคุมด้วยผลึกแร่ ทำให้เครื่องมีเสถียรภาพและมีความเชื่อถือได้สูง

สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบมีความถี่คงที่เท่ากับ 1 MHz มีขนาด 15 mV_{rms} และยังสามารถป้อนแรงดันไฟตรงใช้ในการไบแอสอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ ทำให้สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงานได้ด้วย หลักการทำงานของเครื่องลองพิจารณาดูวงจรย่นย่อในรูปที่ 4.5 เอาท์พุท (output) จากวงจรกำเนิด

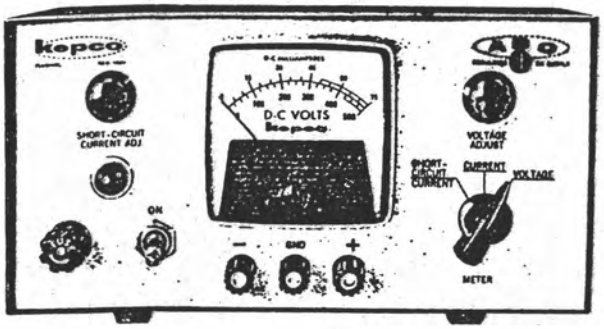


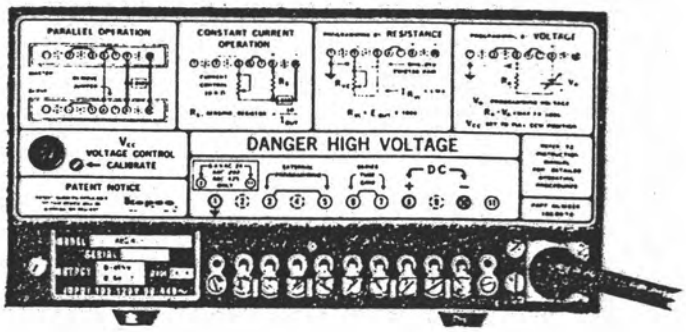
รูปที่ 4.5 วงจรย่นย่อเครื่องวัดความจุไฟฟ้า Boonton 72A

ความถี่คงที่ 1 MHz จะป้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขั้วเซนเตอร์แทป (center tap) ต่อลงที่ RF กราวด์ (ground) สัญญาณนี้จะคัปปลิ้ง (coupling) ผ่านไปยังขดทุติยภูมิโดยที่ปลายด้านหนึ่งของขดทุติยภูมิจะต่อกับขั้ว LO TEST ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะต่อกับขั้ว LO DIFF ขั้ว HI จะต่อเข้าด้วยกันและจะต่อตรงไปยังภาคต่อไป ตัวเก็บประจุปรับค่าได้ที่ต่อกับขั้ว HI และขดทุติยภูมินั้นใช้ในการปรับศูนย์เมื่อยังไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุที่จะนำมาวัด เมื่อต่อตัวเก็บประจุที่ขั้ว LO และ HI กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าซัสเซบแตนซ์ (susceptance) ของตัวเก็บประจุนั้น กระแสนี้จะผ่านไปยังวงจรอภินาท อนุกรม LC ไปยังกราวด์ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรอภินาท นี้จะป้อนให้กับวงจรขยายแรงดันแบบจูน (tune) ความถี่ที่ 1 MHz เอาท์พุทที่ได้จะป้อนให้กับวงจรตรวจจับแบบซิงโครนัส (synchronous) เพื่อดีมอดูเลท (demodulate) ที่ความถี่ 1 MHz ให้เป็นแรงดันไฟตรง โดยจะนำไปขยายด้วยวงจรขยายแรงดันไฟตรงอีกที แรงดันไฟตรงที่ขยายแล้วจะป้อนให้กับมิเตอร์ชนิดเข็ม แสดงผลที่หน้าปัดของเครื่อง และป้อนออกที่ขั้ว DC OUT ในหัวข้อต่อไปจะพบว่าแรงดันไฟตรงนี้จะป้อนให้กับวงจรแปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิตอลเพื่อเก็บข้อมูลที่เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในลักษณะข้อมูลดิจิตอลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป

4.3 เครื่องจ่ายไฟตรงแบบโปรแกรมได้ Kepco ABC 425M

แรงดันไฟตรงที่ใช้ในการไบแอสโครงสร้าง MIS ได้จากเครื่องจ่ายไฟตรงแบบโปรแกรมได้ Kepco ABC 425 M [13] โดยสามารถโปรแกรมให้เอาท์พุทมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 50 โวลท์ ริบเปิล (ripple) และสัญญาณรบกวนน้อยกว่า 0.5 mV_{rms} ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของเครื่อง Kepco แสดงดังรูปที่ 4.6





รูปที่ 4.6 เครื่องจ่ายไฟตรงแบบโปรแกรมได้ Kepco ABC 425 M

การโปรแกรมเอาท์พุทของเครื่อง Kepco นี้อาศัยวงจรอินเตอร์เฟสกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีวงจรแปลงข้อมูลดิจิตอลเป็นอนาลอก

ให้เอาท์พุทมีค่า 0 ถึง 10 โวลท์ แรงดันไฟตรงนี้ใช้ในการโปรแกรมแรงดันไฟตรงเอาท์พุทของเครื่อง Kepco การเชื่อมต่อเพื่อโปรแกรมแรงดันไฟตรงเอาท์พุทของเครื่อง Kepco แสดงดังรูปที่ 4.7

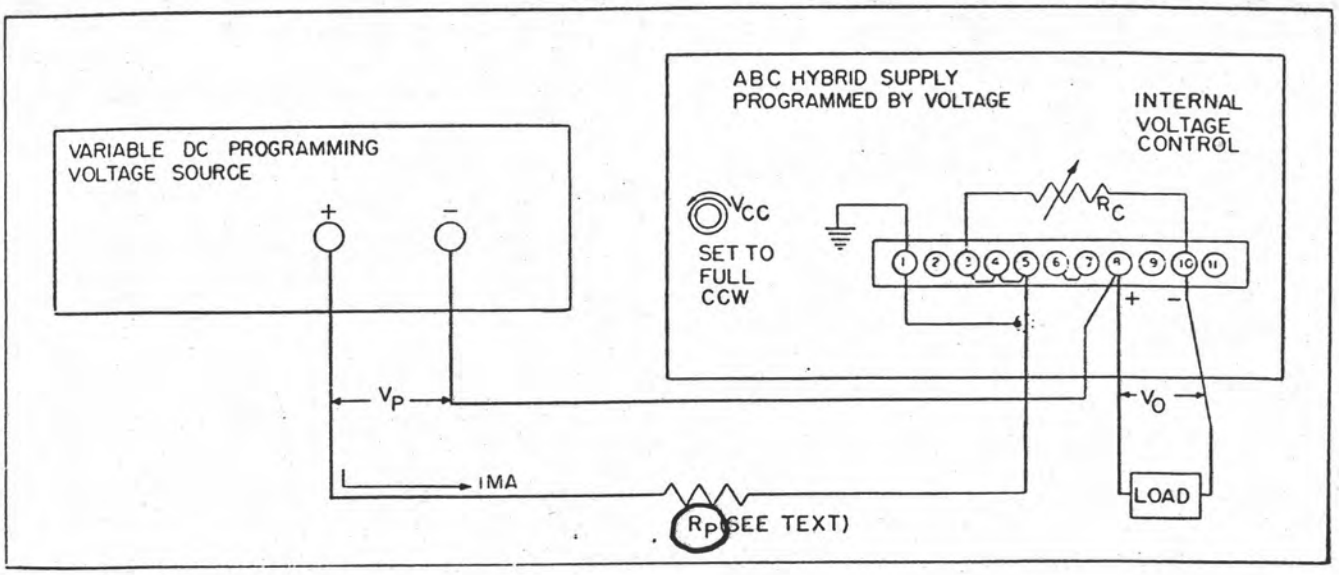
ค่าแรงดันไฟตรงที่ได้จากเครื่อง Kepco มีค่าดังสมการ

$$V_o = \frac{R_C}{R_p} \cdot V_P \qquad 4.1$$

เมื่อ V_o คือแรงดันไฟตรงเอาท์พุทที่ได้รับการโปรแกรม

V_p คือแหล่งกำเนิดแรงดันไฟตรง

R_C คือความต้านทานภายในเครื่อง



รูปที่ 4.7 การเชื่อมต่อเพื่อโปรแกรมแรงดันไฟตรงเอาท์พุทของ
เครื่อง Kepco ABC 425 M

R_P คือความต้านทานภายนอกที่ใช้ในการโปรแกรม

สำหรับ R_C นั้นในหัวข้อต่อไปจะพบว่าเราตัดออกโดยต่อความต้านทานภายนอก ค่า 10 KΩ และ 50 KΩ สำหรับ R_P หาได้จากสมการที่ 4.2

$$R_P = \frac{V_P(max)}{.001} \qquad 4.2$$

เมื่อ $V_P(max)$ คือค่าสูงสุดของแหล่งกำเนิดแรงดันมีค่าเท่ากับ 10 โวลท์ ได้มาจากวงจรแปลงข้อมูลจากดิจิตอลให้เป็นอนาลอก ขนาด 8 บิท ดังนั้นจากสมการ 4.1 เมื่อกำหนด R_C เท่ากับ 10 KΩ และ 50 KΩ จะได้อัตราขยายของเครื่องจ่ายไฟตรงมีค่าเท่ากับ 1 และ 5 ตามลำดับ จากการเลือกใช้ R_C สองค่านี้ เครื่องจ่ายไฟตรง Kepco จะสามารถโปรแกรมให้มีเอาท์พุท 0 – 10 โวลท์ หรือ 0 – 50 โวลท์ ตามความต้องการใช้งาน

ค่าแรงดันไฟตรงเอาท์พุทจากเครื่อง Kepco นี้จะใช้ในการไบแอสโครงสร้าง MIS โดยป้อนให้กับเครื่อง Boonton 72A ที่ขั้ว HI และ LO และป้อนให้กับวงจรแบ่งแรงดันไฟตรง เพื่อให้มีค่าเหลือ 0 - 5 โวลท์ เพื่อจะป้อนให้กับวงจรแปลงข้อมูลอนาลอกให้เป็นดิจิตอล เพื่อเก็บข้อมูลแรงดันไบแอสในลักษณะข้อมูลดิจิตอล ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนของวงจรเชื่อมต่อกับเครื่อง Kepco ต่อไป

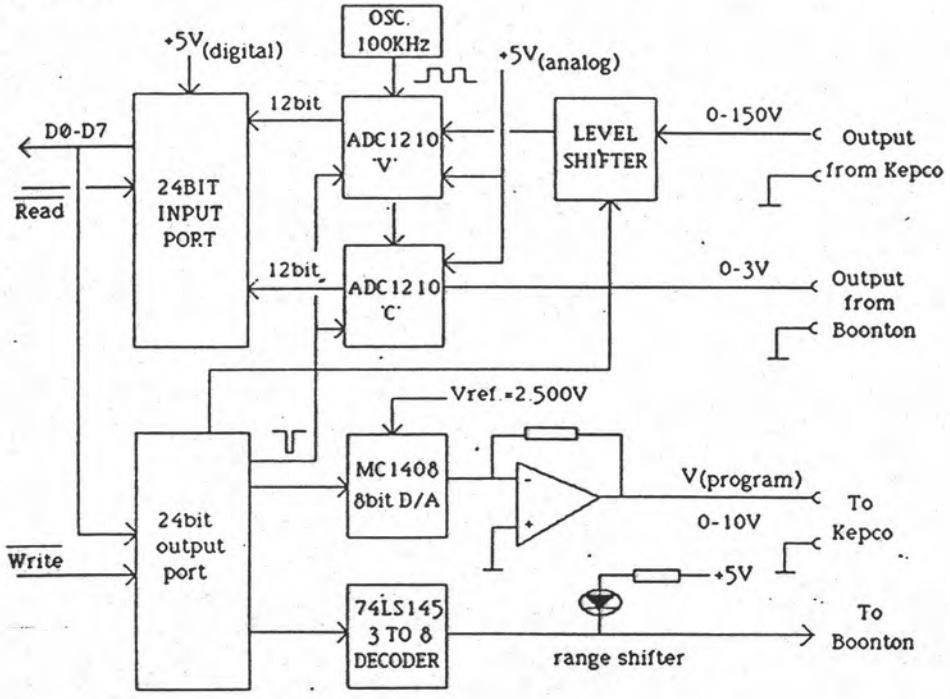
4.4 ส่วนอินเตอร์เฟสกับระบบไมโครคอมพิวเตอร์

ส่วนอินเตอร์เฟสกับระบบไมโครคอมพิวเตอร์ที่ได้ออกแบบสำหรับโครงการนี้ ได้กำหนดให้ทำหน้าที่ดังต่อไปนี้

1. ควบคุมการเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า
2. ควบคุมแรงดันโปรแกรมเพื่อนำไปใช้โปรแกรมแรงดันไบแอส
3. อ่านข้อมูลอนาลอก 2 ค่าคือ ค่าความจุไฟฟ้าจากเครื่อง Boonton 72A และแรงดันไบแอสจากเครื่อง Kepco ABC 425 M ที่เวลาเดียวกัน

จากหน้าที่ที่ได้กำหนดเพื่อใช้ในการออกแบบวงจรอินเตอร์เฟสได้ออกแบบและสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นไดอะแกรมของส่วนอินเตอร์เฟสกับระบบไมโครคอมพิวเตอร์ที่ได้สร้างขึ้นมาโดยใช้วัสดุส่วนใหญ่ภายในประเทศ ข้อมูลที่ติดต่อระหว่างเครื่องแอปเปิลทูและส่วนอินเตอร์เฟสจะรับส่งผ่านทางอินพุทพอท (input port) และเอาท์พุทพอท (output port) แบบขนานขนาด 24 บิท การเชื่อมต่อกระทำผ่านสลอต หมายเลข 5 ของเครื่องแอปเปิลทูทางด้านอินพุทพอทจะต่อกับไอซีแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นข้อมูลดิจิตอลขนาด 12 บิท 2 ตัว เพื่อใช้ในการอ่านค่าแรงดันไบแอสจากเครื่อง Kepco และอ่านค่าความจุไฟฟ้าจากเครื่อง Boonton 72A ส่วนเอาท์พุทพอทจะต่อกับวงจรแปลงข้อมูลดิจิตอลให้เป็นแรงดันไฟตรงขนาด 0 - 10 โวลท์ เพื่อใช้เป็นแรงดันในการโปรแกรมแรงดันไบแอส นอกจากนี้ยังใช้เชื่อมต่อกับวงจรถอดรหัสเพื่อควบคุมช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้าของเครื่อง Boonton 72A และใช้ควบคุมวงจรวัดคาบเวลาอีกด้วย ในหัวข้อต่อไปจะได้กล่าวถึงรายละเอียดการทำงานและวงจรแต่ละ

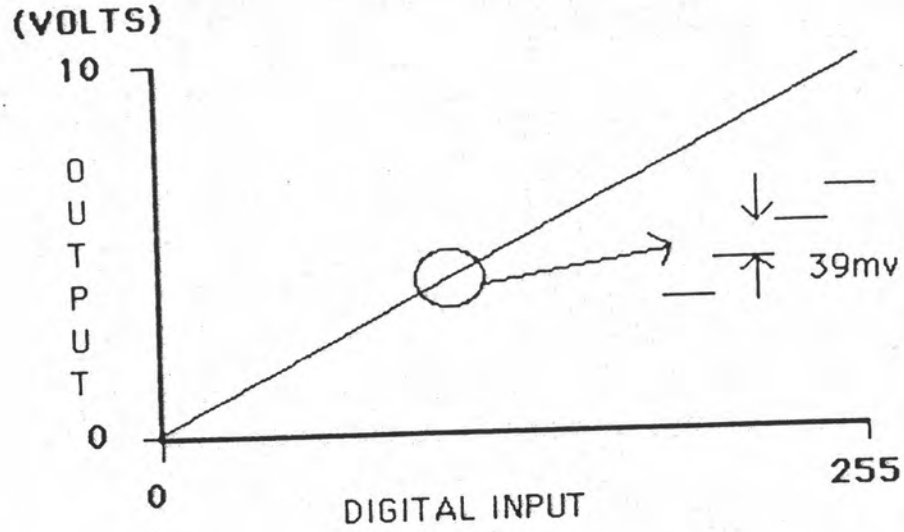
ส่วนตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ไดอะแกรมของส่วนอินเตอร์เฟส

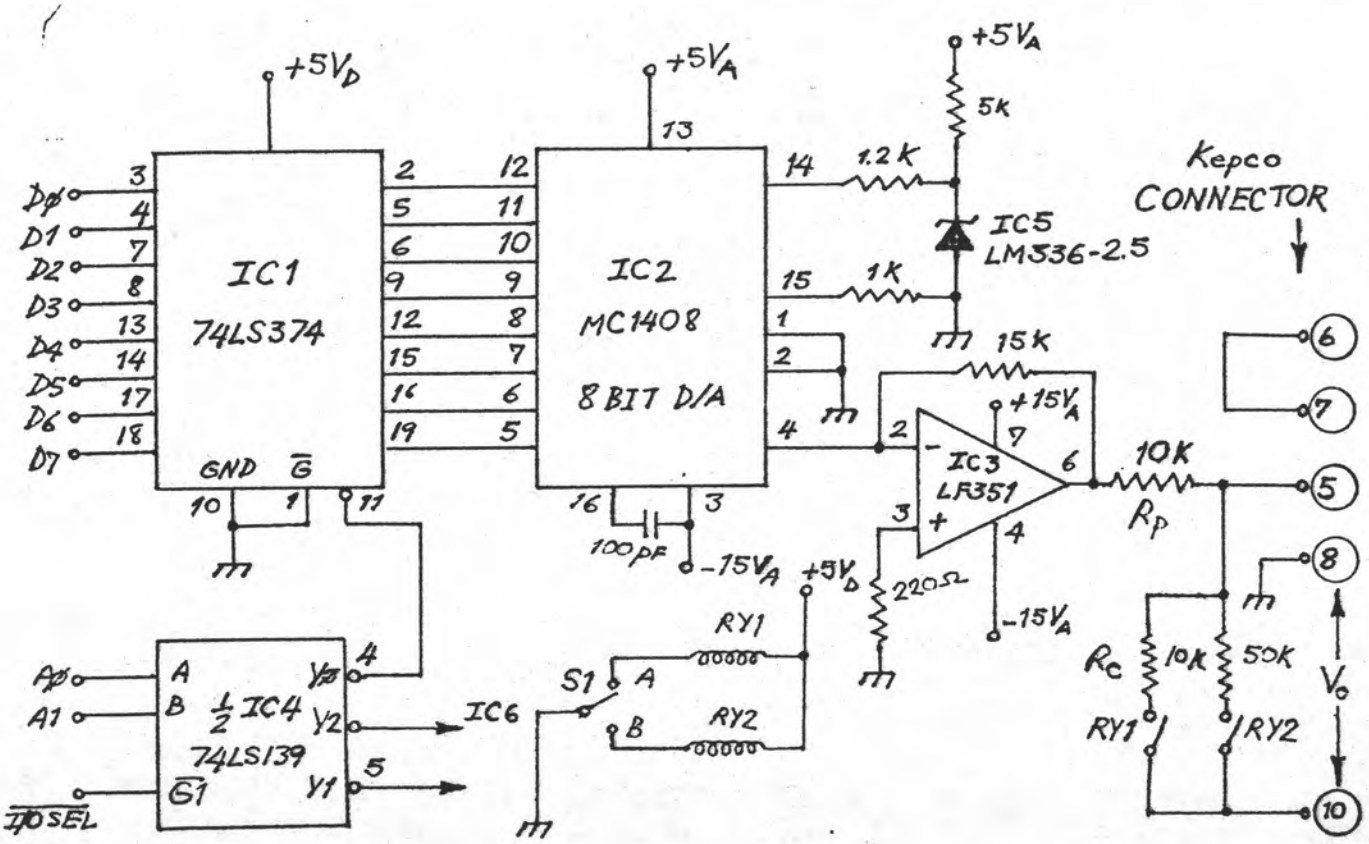
4.4.1 วงจรกำเนิดแรงดันไฟตรงเพื่อใช้โปรแกรมเอาท์พุทของเครื่อง Kepco

การโปรแกรมแรงดันไฟตรงเพื่อนำไปใช้ควบคุมเครื่อง Kepco กระทำโดยป้อนข้อมูลดิจิตอลขนาด 8 บิท ให้กับวงจรเปลี่ยนข้อมูลดิจิตอลให้เป็นอนาลอก โดยมีความละเอียด (resolution) ของแรงดันไฟตรงมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของแรงดันไฟตรงหารด้วยค่าสูงสุดของข้อมูล 8 บิท คือ 255 เช่นถ้าค่าสูงสุดของแรงดันไฟตรงเอาท์พุทมีค่า 10 โวลท์ ความละเอียดในการแปลงข้อมูลมีค่าประมาณ 39 มิลลิโวลท์ เป็นต้น ลักษณะของเอาท์พุทที่ได้จากวงจรแปลงข้อมูลดิจิตอลเป็นอนาลอกแสดงดังรูปที่ 4.9 แรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรแปลงข้อมูลนี้จะนำไปป้อนให้กับเครื่อง



รูปที่ 4.9 เอาท์พุทของวงจรแปลงข้อมูลดิจิตอลเป็นอนาลอกขนาด 8 บิท

Kepco เพื่อโปรแกรมแรงดันไบแอสต่อไป ในรูปที่ 4.10 เป็นวงจรกำเนิดแรงดันไฟตรงดังกล่าว IC_1 เป็นเอาท์พุทพอทขนาด 8 บิท ทำหน้าที่เป็นตัวแลทช์ (latch) ข้อมูลเพื่อป้อนให้กับ IC_2 ข้อมูลนี้จะถูกแปลงให้เป็นกระแสเอาท์พุทที่ขา 4 ของ IC_2 โดยมี IC_3 ทำหน้าที่เป็นวงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดัน เอาท์พุทขาที่ 6 ของ IC_3 นี้จะมีค่า 0 - 10 โวลท์ เมื่อค่าดิจิตอลอินพุทที่ป้อนให้กับ IC_2 มีค่า 0 - 255 แรงดันไฟตรงที่ได้จะป้อนให้กับเครื่อง Kepco ที่ขา 5 และขา 8 เพื่อใช้โปรแกรมแรงดันเอาท์พุท V_o S_1 เป็นตัวเลือกอัตราขยายของเครื่อง Kepco ที่ตำแหน่ง A และ B มีค่าเท่ากับ 1 และ 5 ตามลำดับ ค่าแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากเครื่อง Kepco จึงมีได้ 2 ช่วงคือ 0 - 10 โวลท์ และ 0 - 50 โวลท์

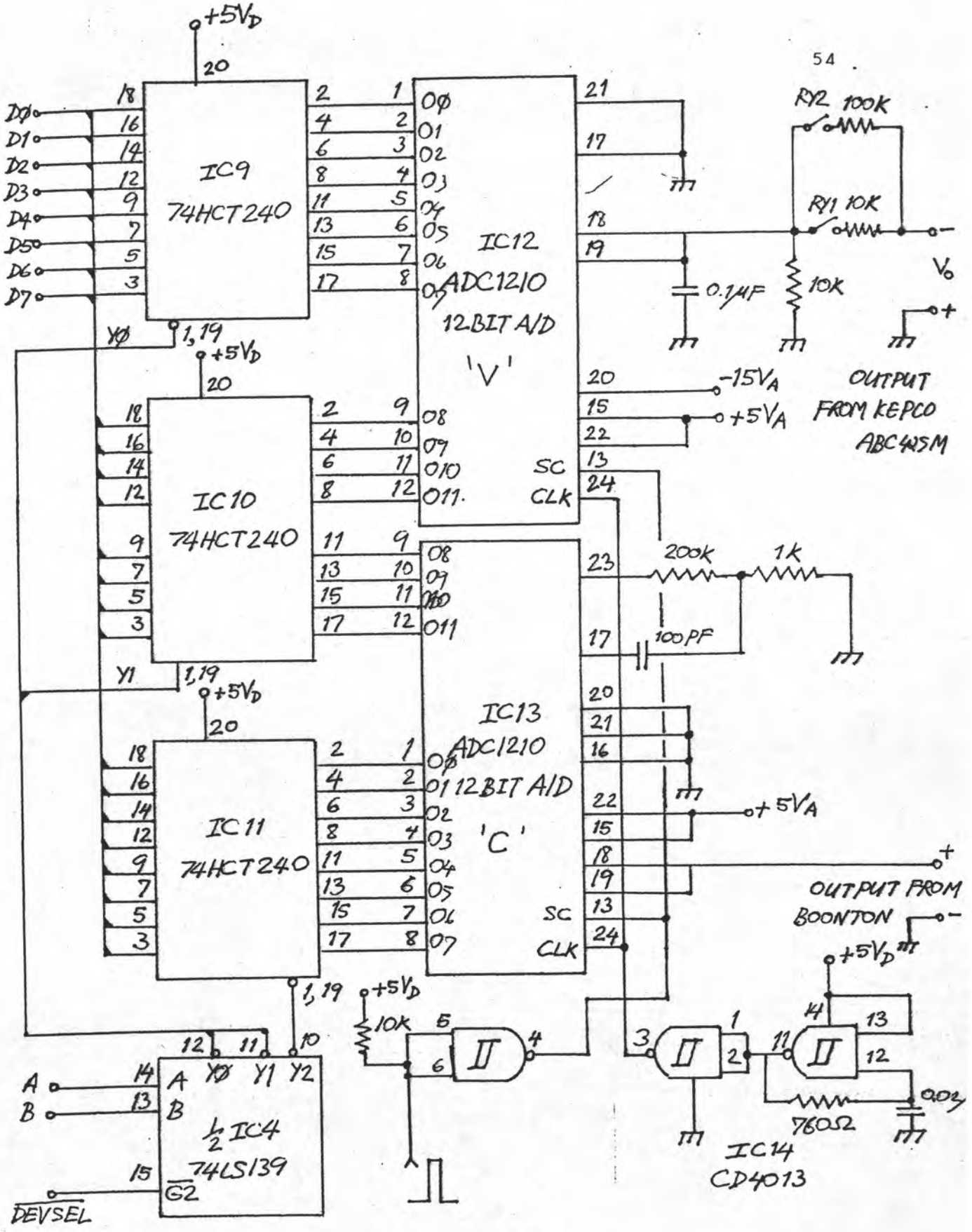


รูปที่ 4.10 วงจรกำเนิดแรงดันไฟตรงเพื่อใช้โปรแกรมเอาท์พุทเครื่อง Kepco

4.4.2 วงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไบแอส

ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเครื่อง Boonton 72A และแรงดันไบแอสที่ได้จากเครื่อง Kepco เป็นแรงดันไฟตรงมีค่าสูงสุด 3 โวลท์และ 50 โวลท์ ตามลำดับ ในการอ่านข้อมูลนี้เข้าไปเก็บในหน่วยความจำของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องแปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นข้อมูลดิจิตอลก่อน โดยใช้วงจรแปลงข้อมูลอนาลอกให้เป็น

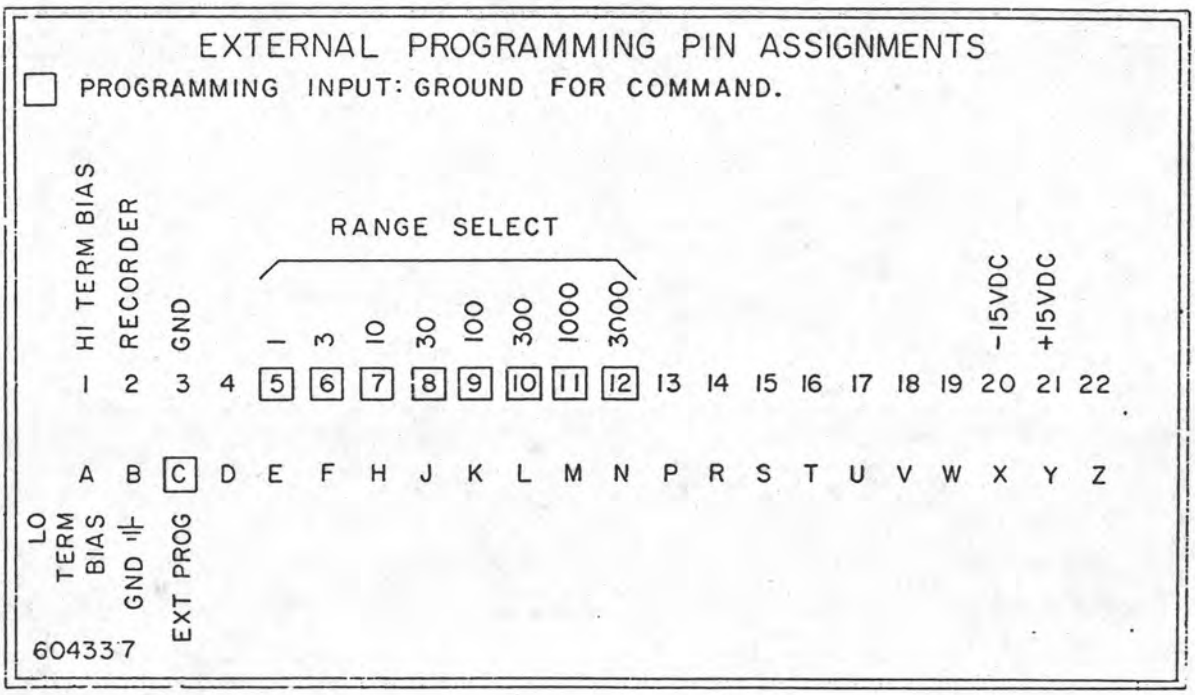
ดิจิตอล ในรูปที่ 4.11 เป็นวงจรอ่านข้อมูลความจุไฟฟ้าและแรงดันไบแอส IC_{12}, IC_{13} เป็นไอซีแปลงข้อมูลอนาลอกให้เป็นดิจิตอลชนิดซีมอสขนาด 12 บิท ความผิดพลาดเชิงเส้นมีค่า $\pm$ 0.012 % ของค่าเต็มสเกล และความผิดพลาดในการแปลงข้อมูลมีค่า $\pm$ 0.01 % ของค่าเต็มสเกล ช่วงเวลาในการแปลงข้อมูลมีค่าเท่ากับ 120 ไมโครวินาที เมื่อแปลงข้อมูลเสร็จเอาท์พุทที่เป็นดิจิตอลจะคงค่าที่ขา $O_0 - O_{11}$ และจะอ่านโดยซีพียูของแอปเปิลทูผ่านทางอินพุทพอทขนาด 24 บิท โดยใช้ IC_9, IC_{10} และ IC_{11} ตำแหน่งของแต่ละตัวจะถูกเลือกโดย IC_4 สำหรับอินพุทของ IC_{13} จะต่อโดยตรงกับขั้ว DC OUT ของเครื่อง Boonton เนื่องจากเอาท์พุทที่ขั้ว DC OUT มีค่าสูงสุด 3 โวลท์ ส่วนอินพุทของ IC_{12} จะต่อกับวงจรแบ่งแรงดันก่อน เนื่องจาก V_o มีค่าเกินค่าเต็มสเกลของ C_{12} คือ 5 โวลท์ เมื่อ S_1 ในรูปที่ 4.10 เลือกที่ตำแหน่ง A และ B วงจรแบ่งแรงดันนี้จะหาร V_o ด้วย 2 และ 10 ตามลำดับ ช่วงเวลาในการแปลงข้อมูลจะกำหนดโดยความถี่เอาท์พุทที่ได้จากขา 3 ของ IC_{14} ซึ่งกำหนดโดย R ค่า 760 Ω และ C ค่า 0.02 μF ความถี่ที่ได้มีค่าเท่ากับ 100 KHz



รูปที่ 4.11 วงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไบแอส

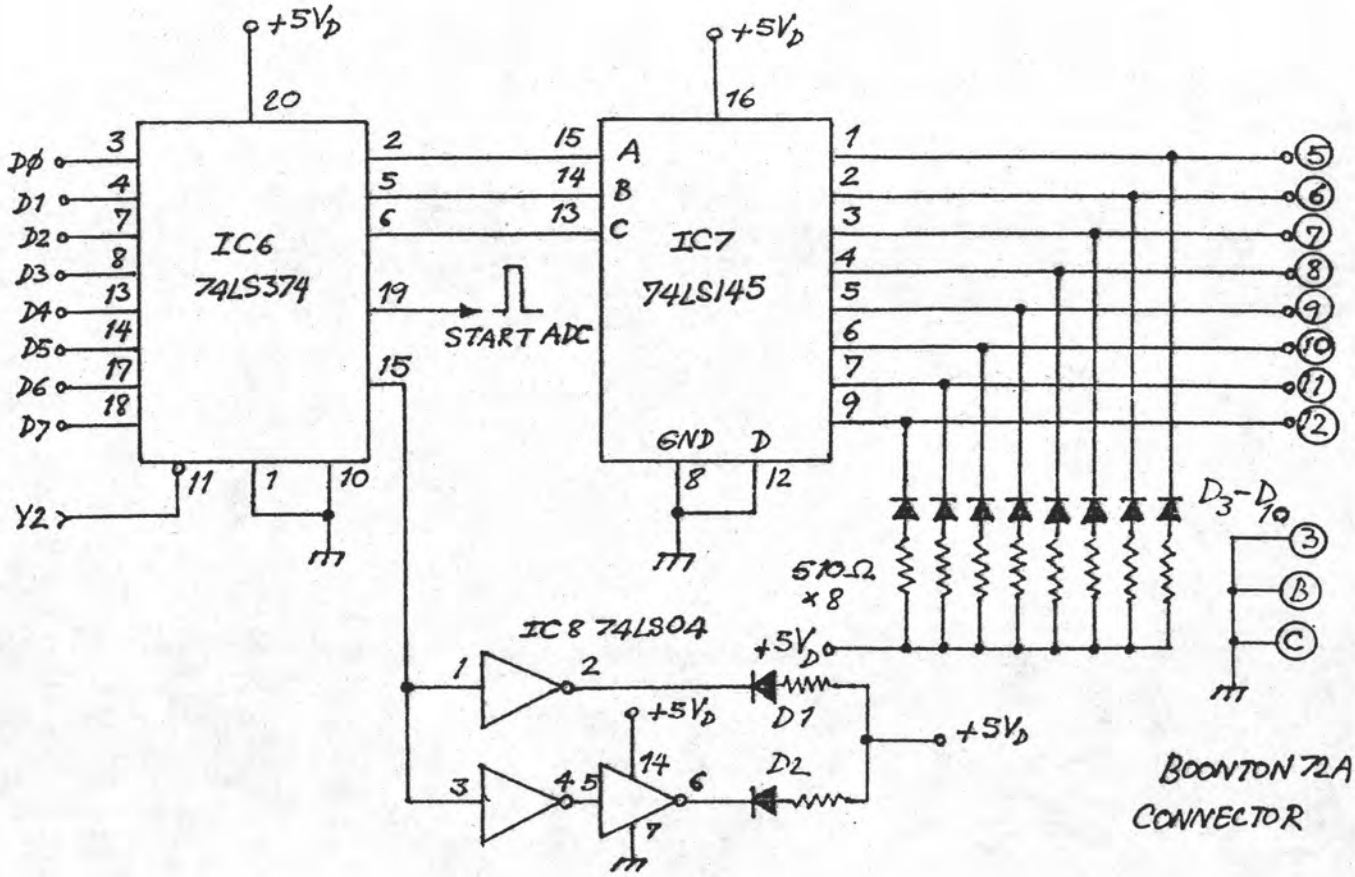
4.4.3 วงจรเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า

การเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้าของเครื่อง Boonton 72A กระทำได้สองลักษณะคือเลือกได้จากการบิดสวิทช์เลือกช่วงจากวัดที่หน้าปัดของเครื่อง และเลือกได้จากการควบคุมโดยใช้วงจรภายนอก ในระบบที่ได้ออกแบบเราเลือกการควบคุมแบบหลังเนื่องจากวงจรที่ใช้ในการควบคุมออกแบบได้ง่ายกว่า และสามารถต่อโดยตรงเข้ากับขั้วต่อด้านหลังของเครื่อง Boonton 72A การควบคุมการเลือกช่วงการวัดกระทำโดยการป้อนแรงดันไฟตรงขนาดประมาณ 0.5 โวลท์เข้าที่ขั้วต่อด้านหลังของช่วงที่ต้องการเลือก และต่อขั้ว B และ C เข้าด้วยกันและต่อลงกราวด์ เป็นการบอกยกเลิกการใช้สวิทช์เลือกช่วงที่หน้าปัดเครื่อง เปลี่ยนมาเป็นการเลือกช่วงการวัดโดยการควบคุมจากวงจรภายนอก สำหรับขั้วต่อและการโปรแกรมช่วงการวัดแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงขั้วต่อด้านหลังของเครื่อง Boonton 72A ที่ใช้โปรแกรมช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า

ในรูปที่ 4.13 เป็นวงจรเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า IC_6 เป็นเอาท์พุทพอททำหน้าที่แลชท์ข้อมูลที่ป้อนให้กับขา A, B, C ของ IC_7 เอาท์พุทที่ได้จาก IC_7 จะเป็นระดับแรงดันไฟตรงประมาณ 0.5 โวลท์ ที่ขา 1 ไปจนถึงขา 9 เมื่อขา A, B, C มีค่าเป็น 0 -7 สำหรับ D_3 - D_{10} เป็นภาคแสดงผลช่วงการวัดปัจจุบัน ส่วน D_1 และ D_2 ใช้บอกทิศทางของการไบแอสว่าเป็นการไบแอสเดินหน้าหรือย้อนกลับ นอกจากนี้ขา 19 ของ IC_6 ยังใช้เป็นขากำเนิดพัลส์เพื่อใช้สั่งให้ IC_{12} และ IC_{13} ในวงจรอ่านค่าแรงดันไบแอสและค่าความจุไฟฟ้าเริ่มการแปลงข้อมูลอีกด้วย

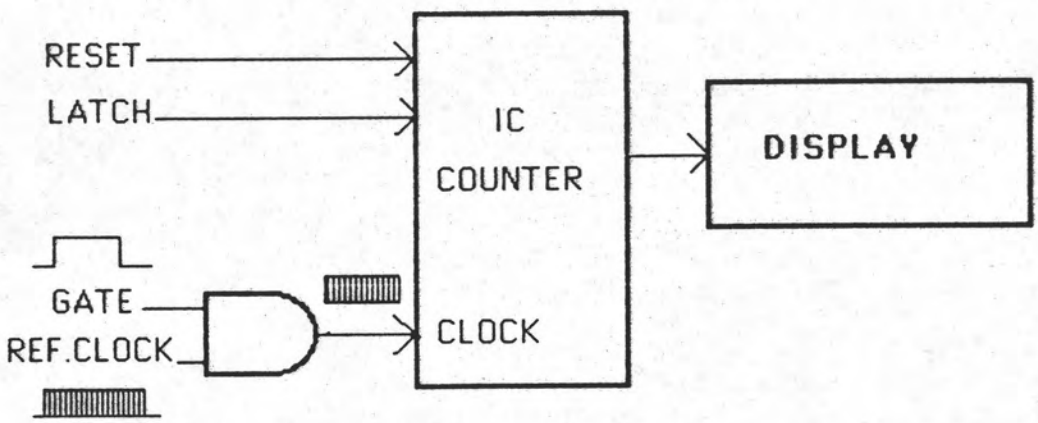


รูปที่ 4.13 วงจรเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า

4.4.4 วงจรวัดคาบเวลา

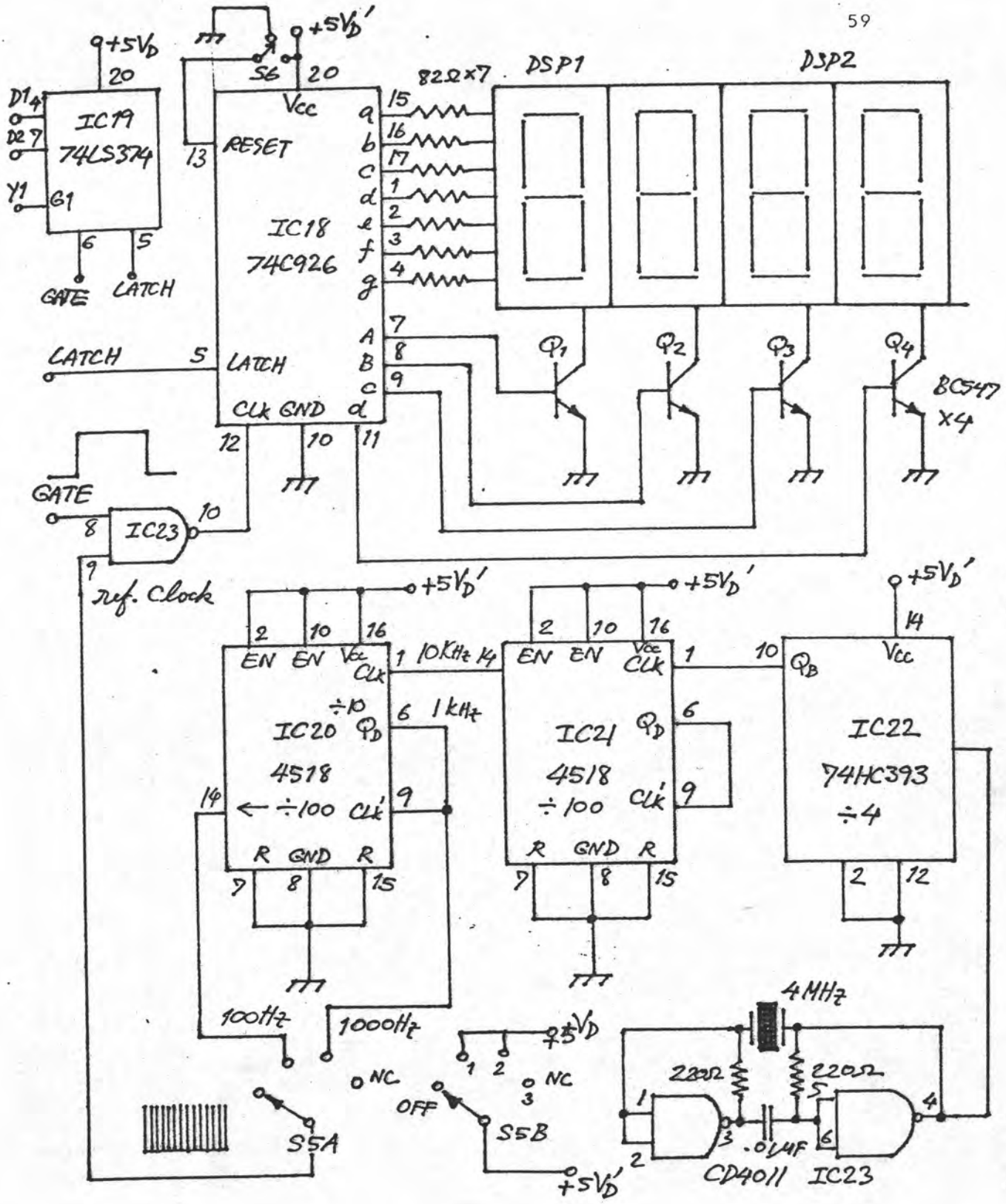
หลักการวัดคาบเวลาแสดงดังรูปที่ 4.14 สัญญาณนาฬิกาความถี่คงที่จะผ่านไปให้กับวงจรนับเมื่อสัญญาณ GATE เป็นระดับลอจิก "1" ค่าที่นับโดยวงจรนับจะเป็นจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณนาฬิกาที่นับได้ในช่วงที่สัญญาณ GATE เป็นลอจิก "1" คาบเวลาที่วัดได้จะมีค่าดังสมการ

$$T = \text{จำนวนนับ} \times \frac{1}{\text{ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา (Hz)}} \qquad 4.3$$



รูปที่ 4.14 หลักการวงจรวัดคาบเวลา

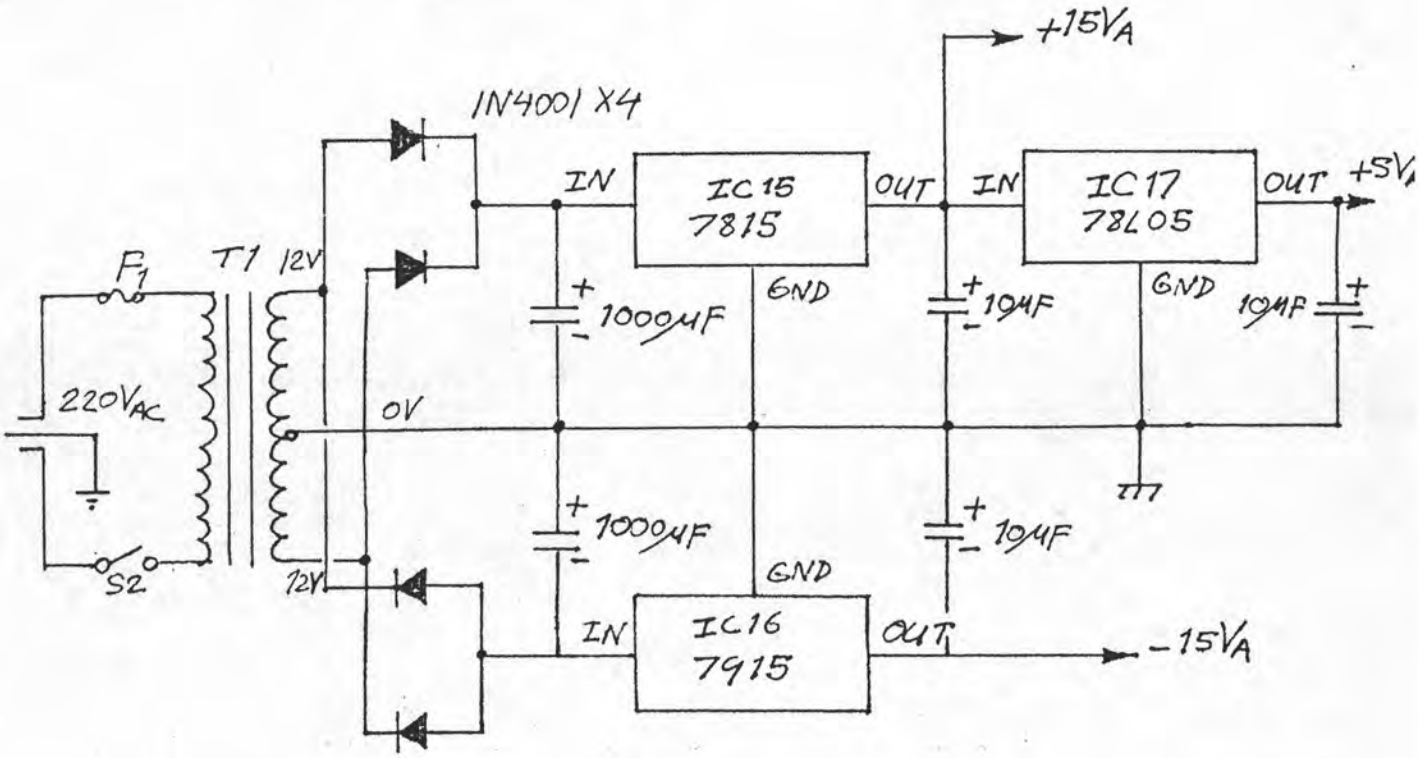
วงจรวัดคาบเวลาแสดงดังรูปที่ 4.15 สัญญาณนาฬิกาความถี่มาตรฐานกำเนิดโดยวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมโดยผลึกแร่ 4 MHz จะป้อนให้กับ IC_{22} ทำการหารด้วย 4 และหารด้วย 100 ด้วย IC_{21} เหลือ 10 KHz จากนั้นจะหารด้วย 10 โดย IC_{20} ให้เอาท์พุทออกที่ขา 9 เป็น 1 KHz และหารด้วย 10 อีกครั้งจะได้ 100 Hz เราใช้ความถี่ของสัญญาณนาฬิกานี้เป็นความถี่มาตรฐานป้อนผ่าน S5A ไปให้กับ IC_{23} ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการป้อนสัญญาณนาฬิกานี้ให้กับ IC_{18} ทำการนับค่าที่นับได้จะแสดงผลบนภาคแสดงผลแบบแอลอีดี 7 ส่วนขนาด 4 หลัก สำหรับสัญญาณ GATE และ LATCH ได้มาจากเอาท์พุทพอท IC_{19} ซึ่งสามารถควบคุมโดยตรงจากโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการวัด S_6 เป็นสวิทช์ในการเคลียร์ค่าที่นับได้ก่อนหน้านี้เพื่อทำการนับใหม่ในโปรแกรมที่ทำการเก็บข้อมูลความจุไฟฟ้า-เวลา จะรับค่าที่นับได้จากวงจรนับเพื่อนำไปคำนวณเวลาในการเก็บข้อมูลแต่ละจุดเพื่อที่จะสร้างแฟ้มข้อมูล ความจุไฟฟ้า-เวลาต่อไป



รูปที่ 4.15 วงจรวัดคาบเวลา

4.4.5 ภาคจ่ายไฟตรงให้กับวงจรแปลงข้อมูล

ภาคจ่ายไฟตรงสำหรับไอซีดิจิตอล เราใช้แรงดัน + 5 โวลท์จากเครื่องแอปเปิลทู มีสัญญลักษณ์ในวงจรเป็น V_D ส่วนภาคจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรอนาลอกอันได้แก่ไอซีแปลงข้อมูลจากอนาลอกเป็นดิจิตอลและไอซีแปลงข้อมูลจากดิจิตอลเป็นอนาลอกได้จากวงจรข้างล่าง มีสัญญลักษณ์เป็น V_A จากวงจรในรูปที่ 4.16 T_1 ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟสลับให้เหลือประมาณ 12 V_{AC} ป้อนให้กับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทั้งขึกลบและขึกบวก โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001 จำนวน 4 ตัวไฟตรงที่ได้จะผ่านตัวเก็บประจุขนาด 1000 μF เพื่อกรองแรงดันให้เรียบ แรงดันไฟตรงที่ได้จะมีค่าประมาณ 18 โวลท์ จากนั้นจะป้อนให้กับไอซีเรกูเลเตอร์เพื่อทำการปรับแรงดันเอาท์พุทให้เหลือ + 15 โวลท์, -15 โวลท์ ด้วย IC15 และ IC16 ตามลำดับ โดยมีตัวเก็บประจุกรองแรงดันที่เอาท์พุทค่า 10 μF สำหรับแรงดัน + 5 โวลท์ เราใช้ IC17 ทำการลดระดับแรงดันที่ได้จาก IC15 ให้เหลือ +5 โวลท์เพื่อจ่ายให้กับวงจรแปลงข้อมูลต่อไป



รูปที่ 4.16 ภาคจ่ายไฟตรงให้กับวงจรแปลงข้อมูล

4.5 ขั้นตอนการทำงานของระบบ ซี-วี

จากรายละเอียดการทำงานของภาคต่าง ๆ ในหัวข้อที่ผ่านมาเมื่อประกอบภาคต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ดังไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นเฉพาะ ในระบบที่ได้ออกมานี้ได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้กับบันทึกข้อมูล ความจุ-แรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า-เวลา จากการประกอบส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันและควบคุมการทำงานโดยโปรแกรม ระบบ ซี-วี มีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

4.5.1 การเก็บบันทึกข้อมูล ความจุ-แรงดันไฟฟ้า

แรงดันไบแอสจะถูกโปรแกรมและป้อนให้กับเครื่อง Kepco ค่าแรงดันเอาท์พุทจาก Kepco จะป้อนให้กับเครื่อง Boonton เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าและป้อนให้กับวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไบแอส โปรแกรมจะทำการควบคุมเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า ในช่วงของการวัดที่ค่าความจุไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่ามากกว่า 25 % ของค่าเต็มสเกลในแต่ละช่วง ค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไบแอสที่อ่านได้จะเก็บบันทึกลงในหน่วยความจำ และในขั้นตอนต่อไปโปรแกรมก็จะสั่งเพิ่มค่าแรงดันไบแอสเพื่อเก็บข้อมูลในจุดต่อไป เมื่อเก็บบันทึกข้อมูลเสร็จ โปรแกรมก็จะสร้างแฟ้มข้อมูล ความจุ-แรงดันไฟฟ้า เพื่อนำไปพลอตกราฟและวิเคราะห์ผลต่อไป

4.5.2 การเก็บบันทึกข้อมูล ความจุไฟฟ้า-เวลา

แรงดันไบแอสสำหรับการวัดในหัวข้อนี้จะเป็นพัลส์ขนาดความสูง ควบคุมโดยโปรแกรมโดยการป้อนข้อมูลดิจิตอลเริ่มต้นเป็น 0 (เอาท์พุทที่ได้ประมาณ 0 V) จากนั้นส่งข้อมูลดิจิตอล 255 (เอาท์พุทที่ได้ประมาณ 9 V) ไปยังวงจรแปลงข้อมูลดิจิตอลเป็นอนาลอก ซึ่งจะไปควบคุมเครื่อง Kepco ต่อไป เอาท์พุทที่ได้จากเครื่อง Kepco จึงมีลักษณะเป็นพัลส์ ที่จุดนี้โปรแกรมจะควบคุมให้เครื่องวัดคาบเวลาเริ่มต้นทำงาน ขณะเดียวกันจะสุ่มข้อมูล ความจุไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงข้อมูลอนาลอกให้เป็นดิจิตอลโดยวงจรอ่านข้อมูลความจุไฟฟ้า จนกระทั่งครบ 100 ข้อมูล

โปรแกรมจะสั่งให้เครื่องวัดคาบเวลาหยุดการนับสัญญาณความถี่มาตรฐาน ค่าที่นับได้จะป้อนให้กับเครื่องแอปเปิลทูโดยผู้ใช้ จากนั้นโปรแกรมก็จะทำการคำนวณช่วงเวลาในการสุ่มข้อมูลและความจุไฟฟ้าแต่ละจุดเพื่อสร้างแฟ้มข้อมูล ความจุไฟฟ้า-เวลาต่อไป

สำหรับรายละเอียดแผนผังการทำงานและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมจะกล่าวในหัวข้อต่อไป และในภาคผนวกตามลำดับ จากขั้นตอนการทำงานโดยสรุปที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าการทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมควบคุม ดังนั้นเราสามารถดัดแปลงระบบ ซี-วี เพื่อให้ระบบมีความสามารถมากขึ้น และมีการทำงานเป็นไปตามความประสงค์ของผู้ใช้ โดยการดัดแปลงแก้ไขโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเท่านั้น

4.6 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

โปรแกรมที่ใช้งานกับระบบ ซี-วี มีทั้งหมด 5 โปรแกรม ดังนี้

1. โปรแกรม CVMASTER++++ เป็นโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลความจุ-แรงดันไฟฟ้า

2. โปรแกรม ND-PROFILE เป็นโปรแกรมสร้างแฟ้มข้อมูลความเข้มข้นสารเจือปน-ระยะทาง โดยการนำข้อมูลความจุ-แรงดันไฟฟ้ามาคำนวณ

3. โปรแกรม TRANSIENT2 เป็นโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลความจุไฟฟ้า-เวลา

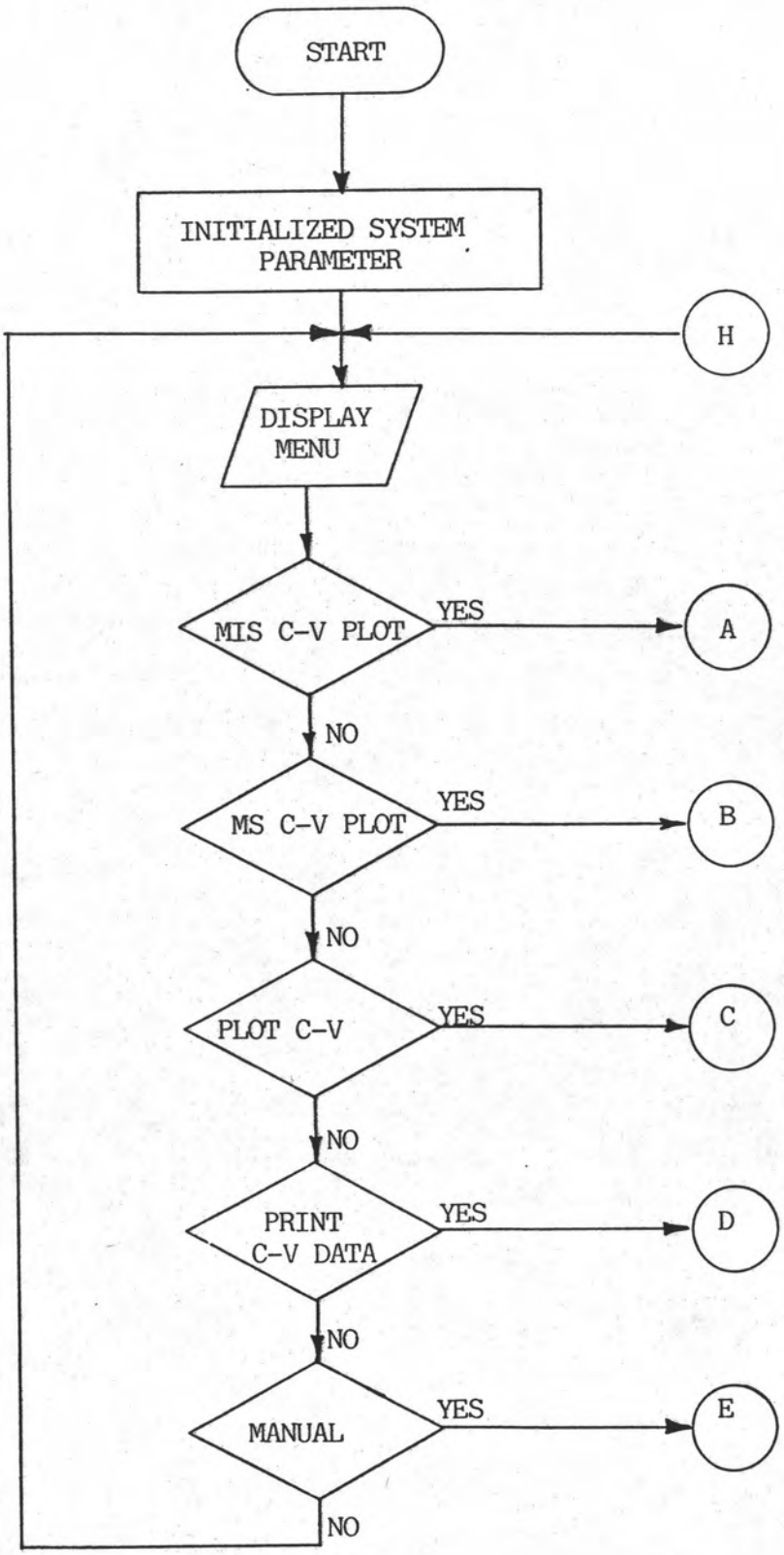
4. โปรแกรม CVANAYSIS เป็นโปรแกรมคำนวณปริมาณบ่งชี้ทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เป็นฐานของโครงสร้าง MIS

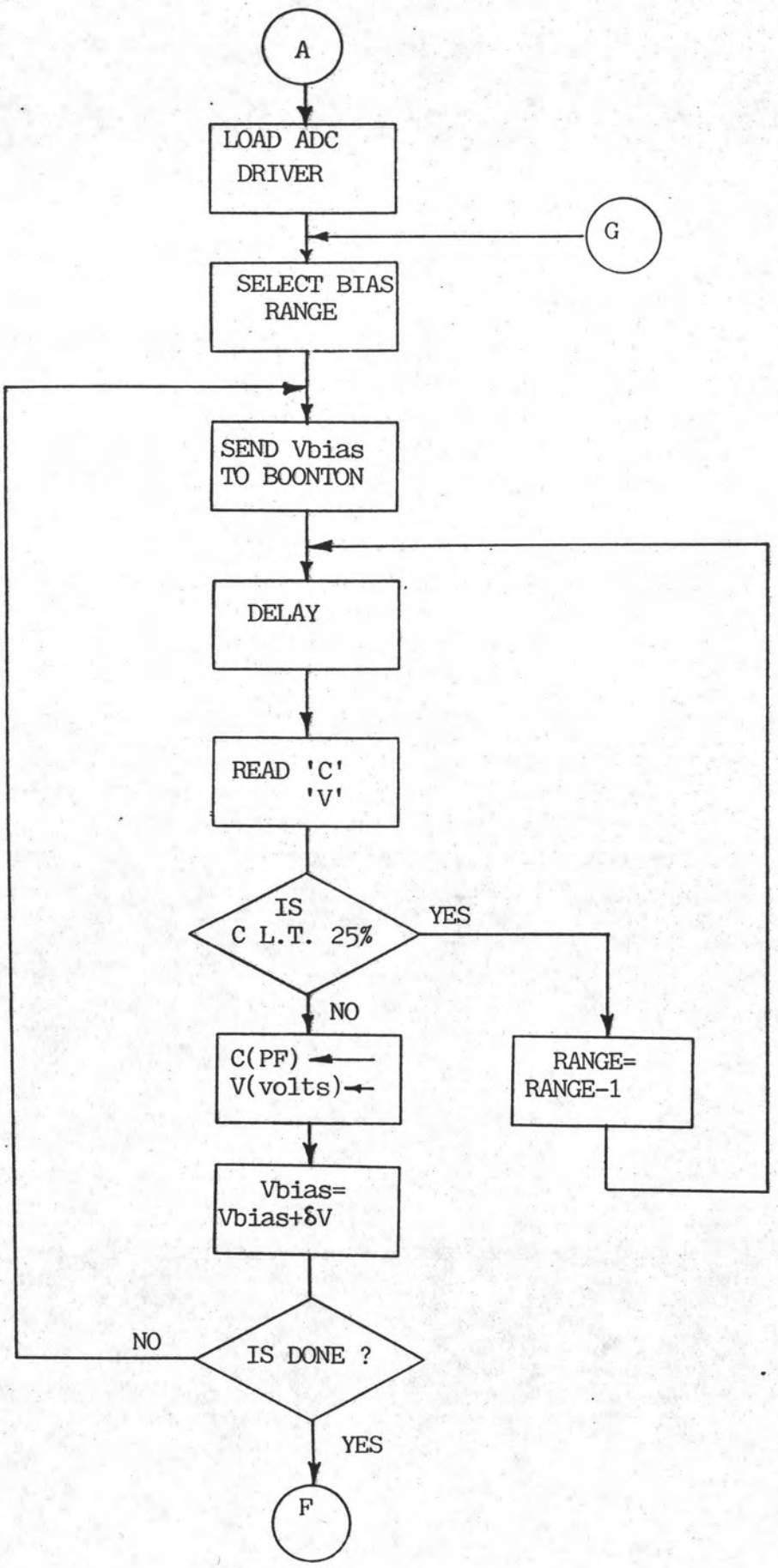
5. โปรแกรม SCIPLOT เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ช่วยในการพลอตกราฟ

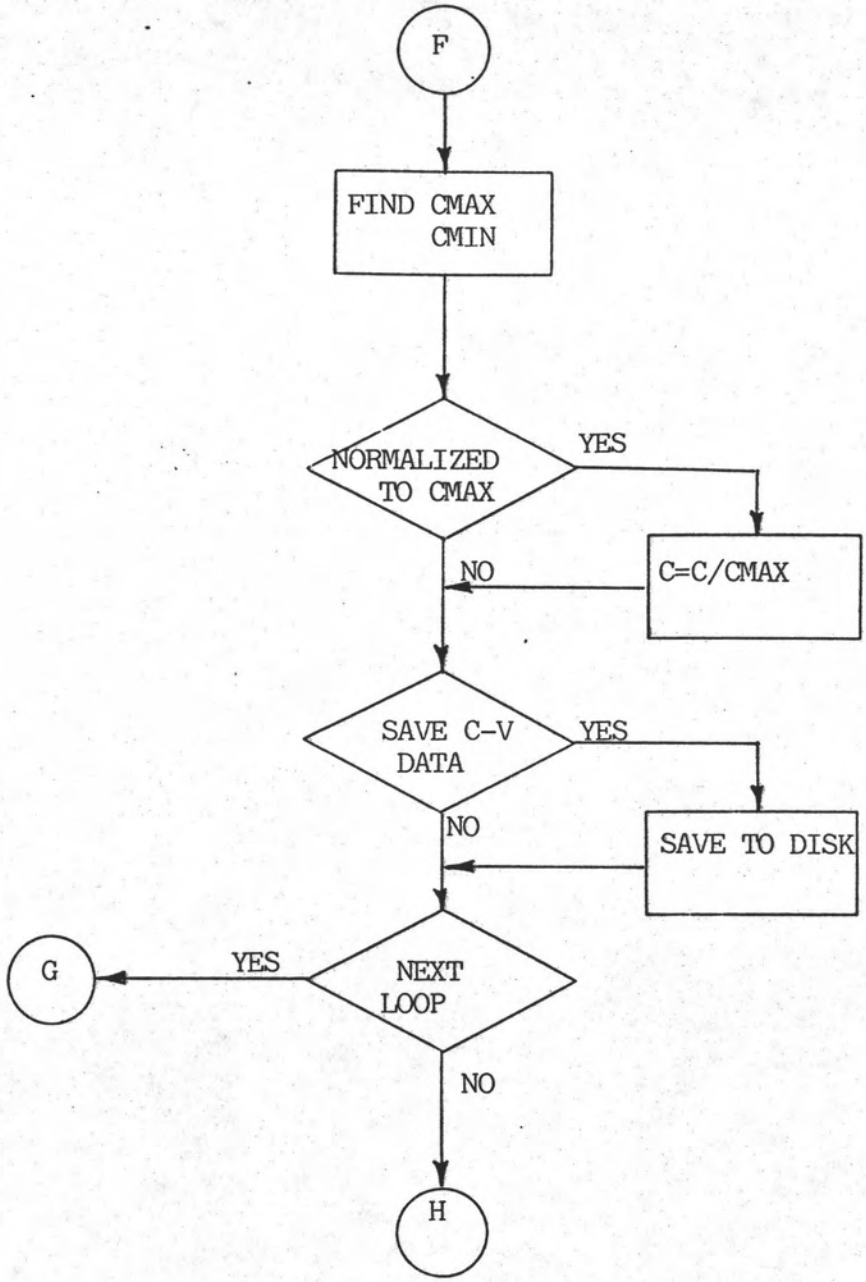
สำหรับโปรแกรม 1 ถึง 4 เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองเพื่อใช้ในระบบ ซี-วี เขียนด้วยภาษาเบสิกเกือบทั้งหมด มีโปรแกรมย่อยบางส่วนที่เขียนด้วยภาษาเครื่องเพื่อให้เครื่องทำงานได้เร็วขึ้น ในหัวข้อนี้เป็นแผนผังการทำงาน (flow chart) ของแต่ละโปรแกรม ตามลำดับ สำหรับโปรแกรม SCIPLOT เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป การทำงานของโปรแกรมดูได้จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 19

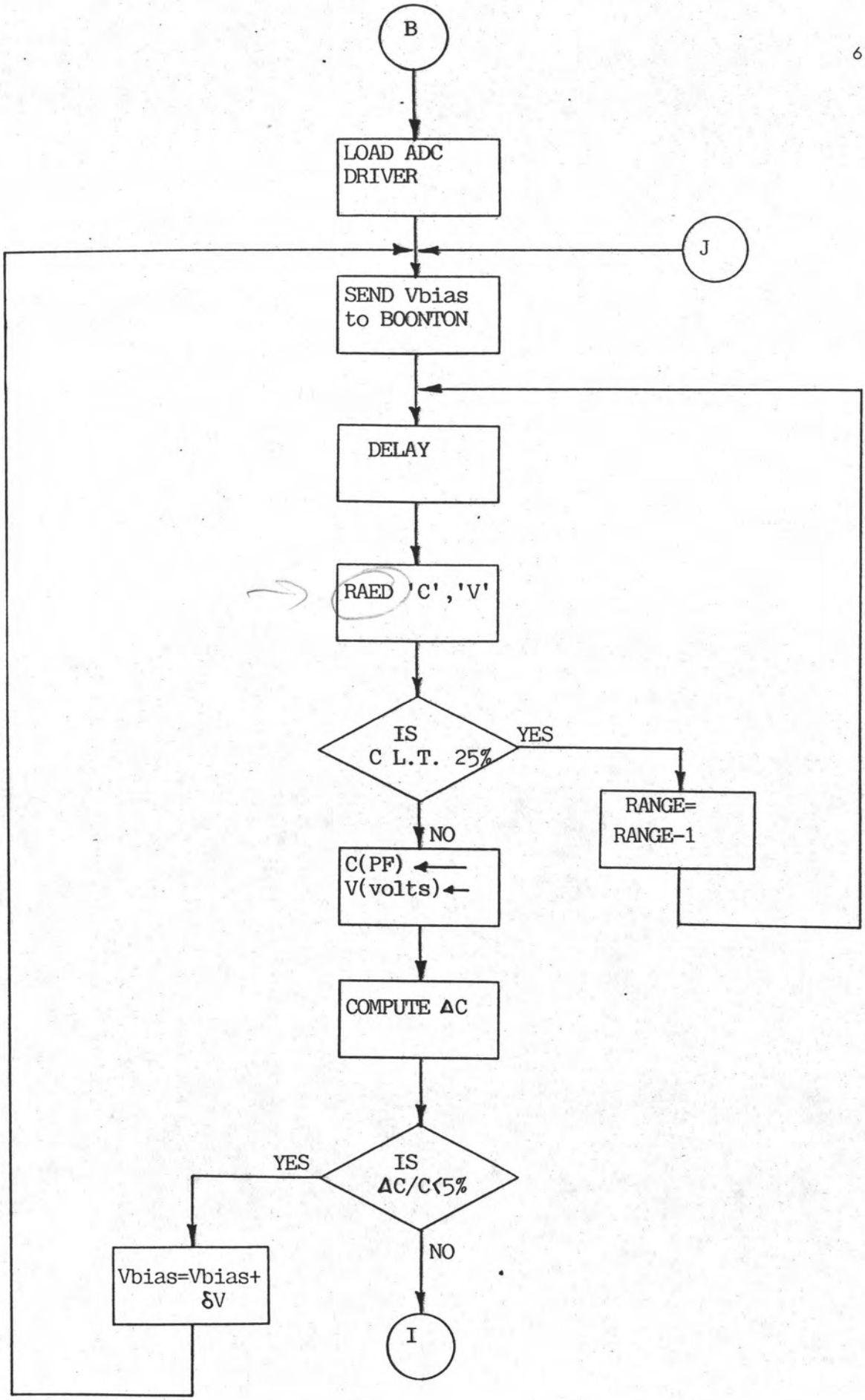
4.6.1 โปรแกรม CVMASTER++++

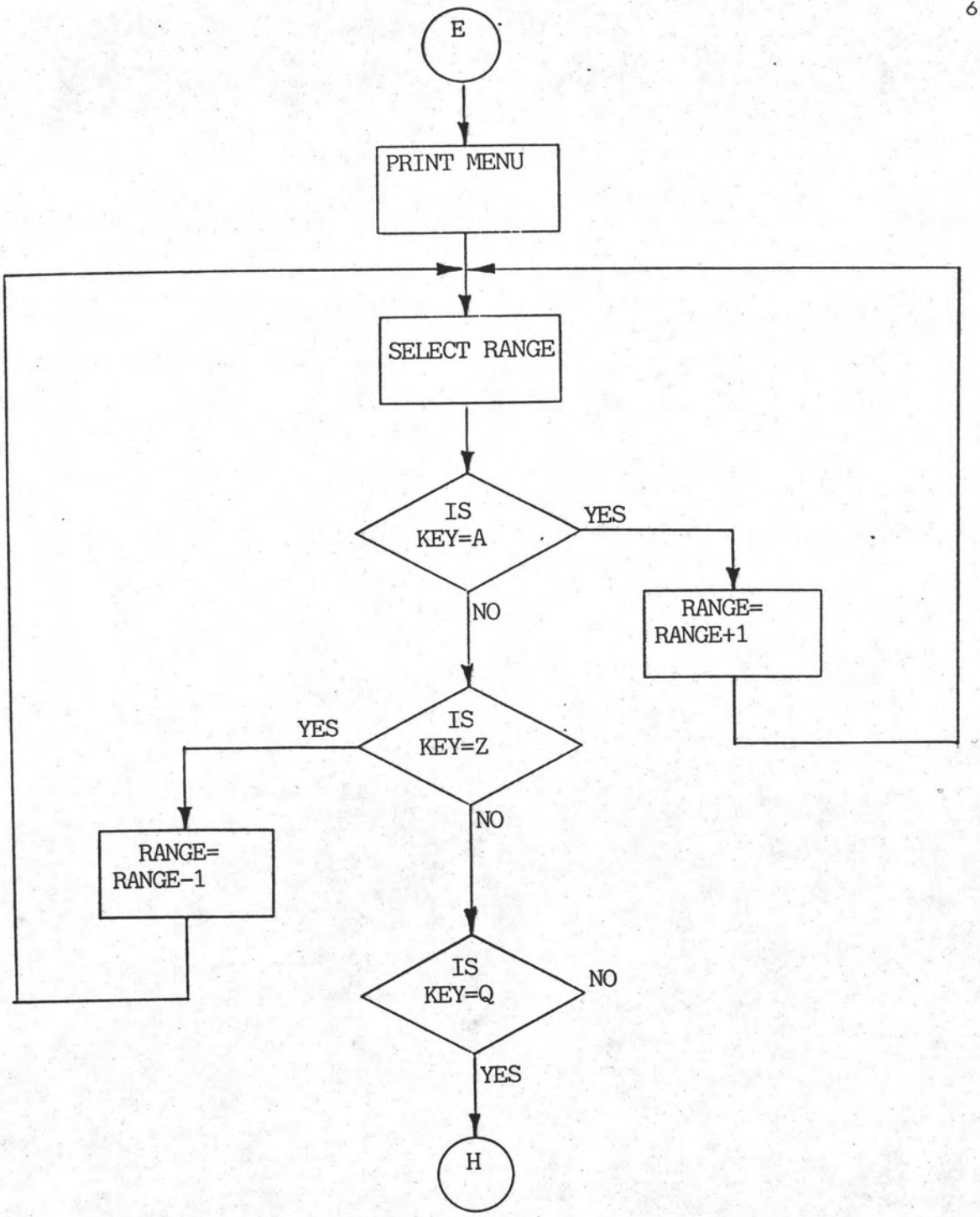
แผนผังการทำงานของโปรแกรม CVMASTER++++ เป็นดังนี้




A
LOAD ADC DRIVER
G
SELECT BIAS RANGE
SEND Vbias TO BOONTON
DELAY
READ 'C' 'V'
IS C L.T. 25%
YES
NO
C(PF) ←
V(volts) ←
RANGE= RANGE-1
Vbias= Vbias+δV
NO
IS DONE ?
YES
F

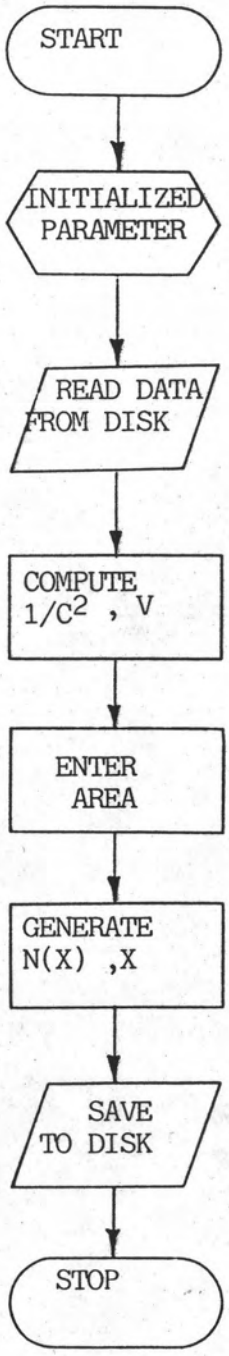

F
FIND CMAX
CMIN
NORMALIZED
TO CMAX
YES
NO
C=C/CMAX
SAVE C-V
DATA
YES
NO
SAVE TO DISK
G
YES
NEXT
LOOP
NO
H


B
LOAD ADC DRIVER
J
SEND Vbias to BOONTON
DELAY
RAED 'C','V'
IS C L.T. 25%
YES
RANGE= RANGE-1
NO
C(PF) ←
V(volts) ←
COMPUTE ΔC
IS ΔC/C<5%
YES
NO
Vbias=Vbias+ δV
I


E
PRINT MENU
SELECT RANGE
IS KEY=A
YES
NO
RANGE= RANGE+1
IS KEY=Z
YES
NO
RANGE= RANGE-1
IS KEY=Q
NO
YES
H

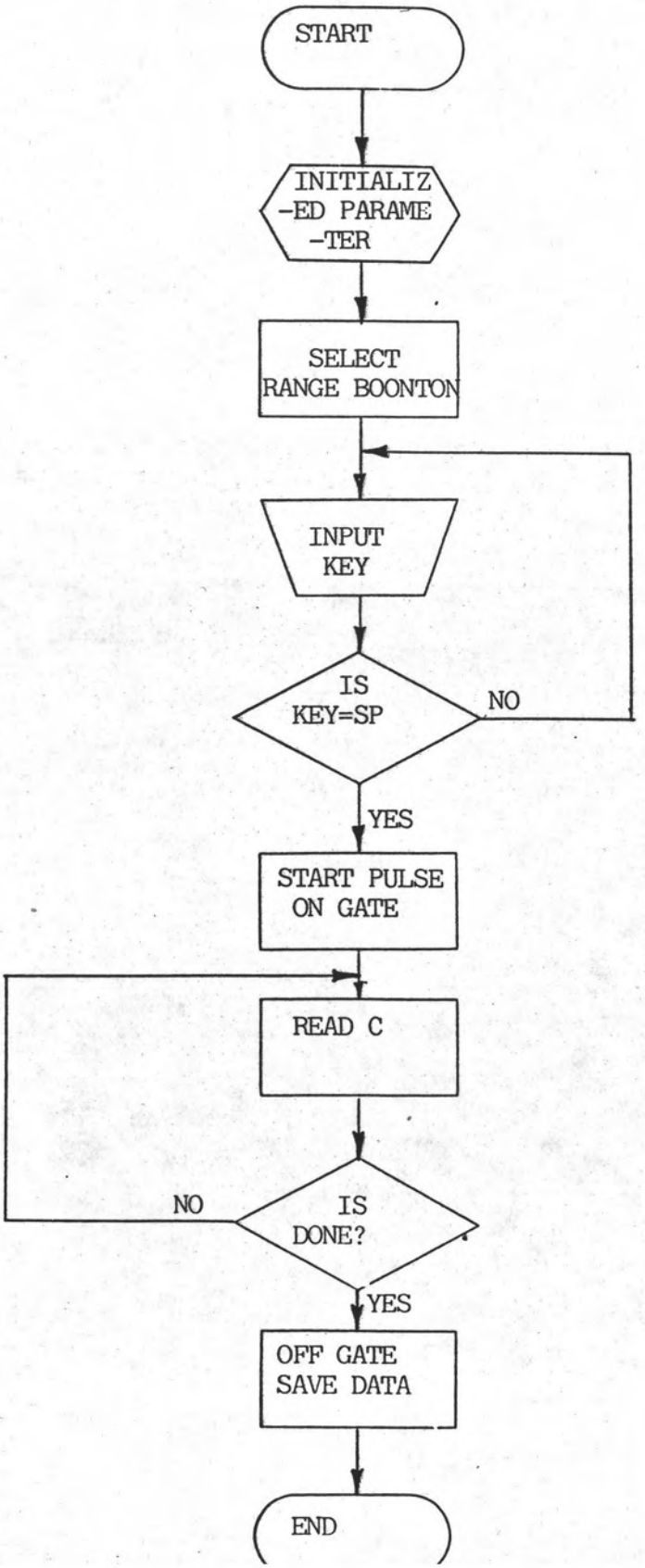
4.6.2 โปรแกรม ND-PROFILE

แผนผังการทำงานของโปรแกรม ND-PROFILE เป็นดังนี้



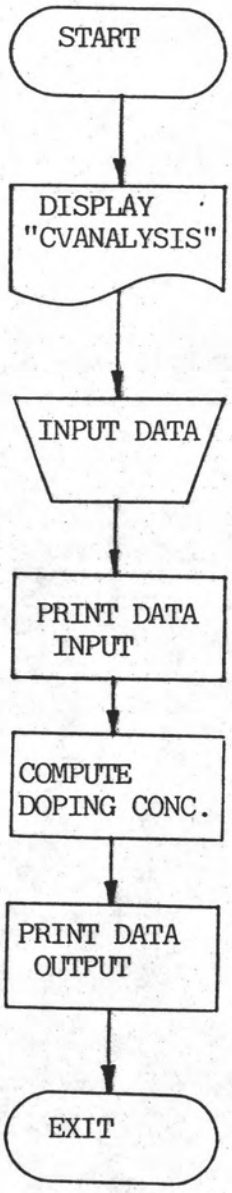
4.6.3 โปรแกรม TRANSIENT2

แผนผังการทำงานของโปรแกรม TRANSIENT2 เป็นดังนี้



4.6.4 โปรแกรม CVANALYSIS

แผนผังการทำงานของโปรแกรม CVANALYSIS เป็นดังนี้

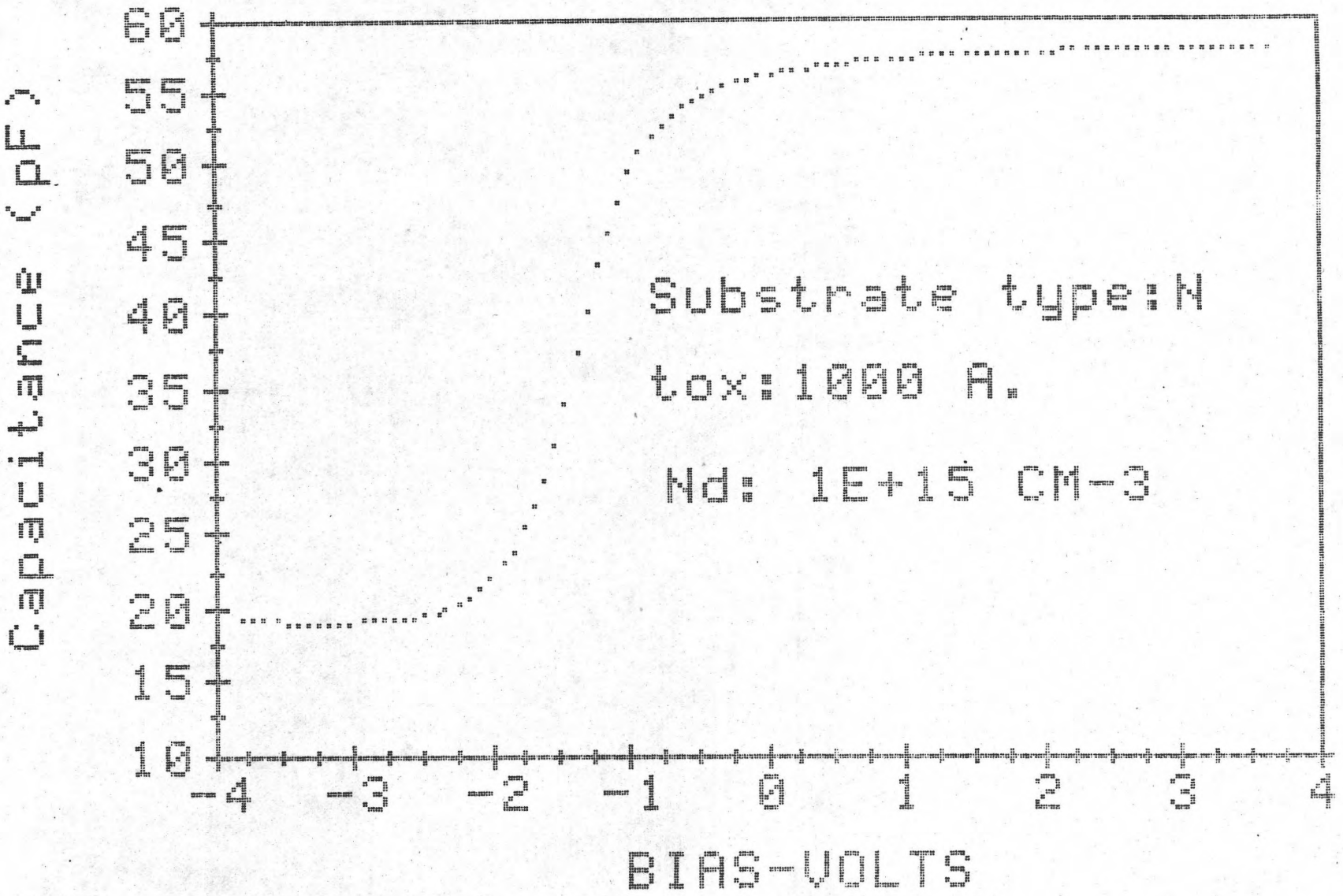


4.7 การทดสอบกับตัวอย่างมาตรฐานและโครงสร้าง MIS ที่มี $CuInSe_2$ เป็นฐานรองรับ

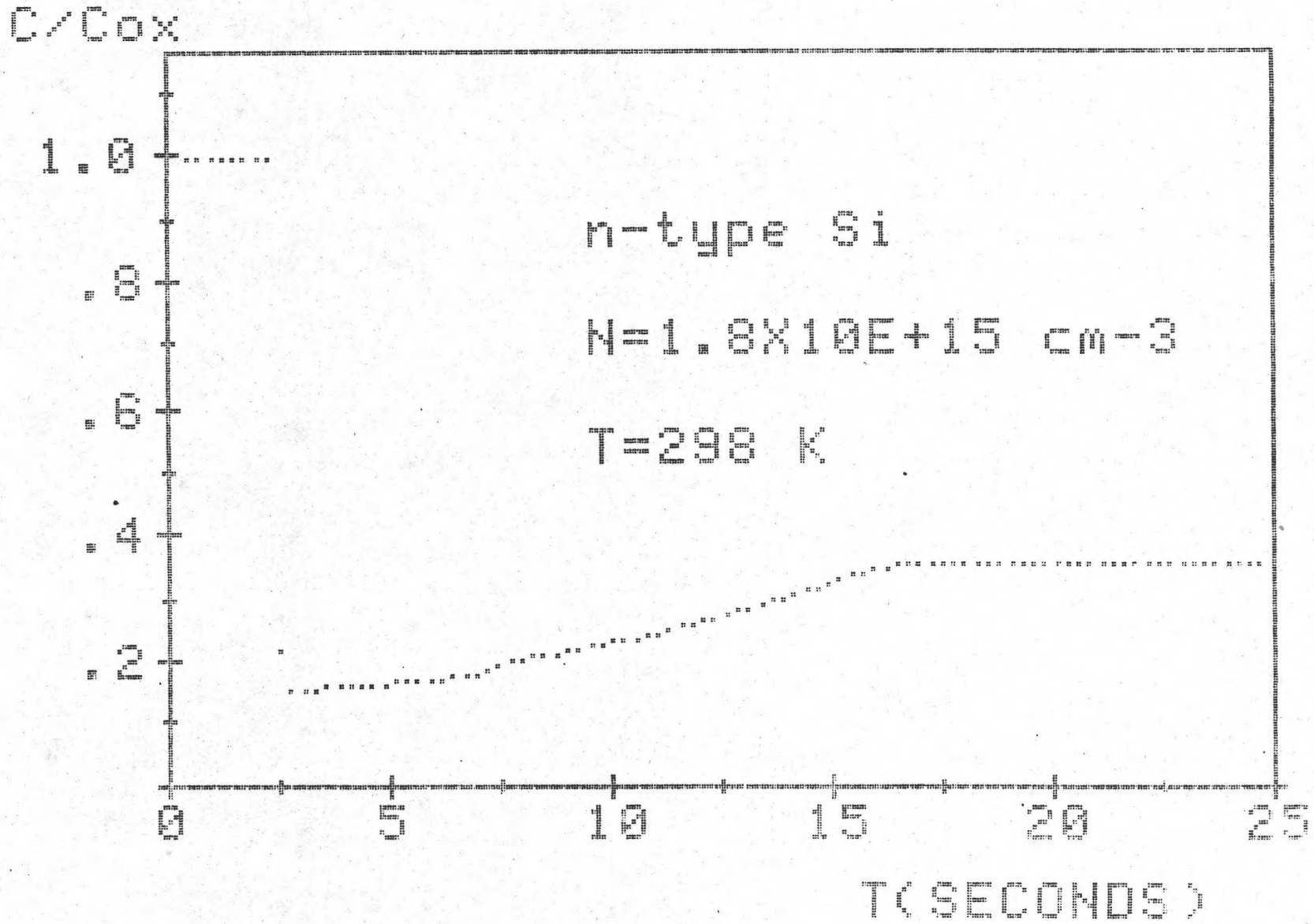
ตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบมีโครงสร้างเป็นแบบ MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) โดยมี Si โด๊ปด้วยฟอสฟอรัสปริมาณ 10^{15} cm^{-3} ชั้นออกไซด์หนา 1000 Å และขั้วโลหะด้านบนเป็นอลูมิเนียมขนาดพื้นที่ 9.5×10^{-3} cm^2 สำหรับตัวอย่างนี้ได้ทำการวัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าและลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลา พบว่าจากการวัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า เราคำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 1.8×10^{15} cm^{-3} และจากลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลา เราคำนวณช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่อุณหภูมิห้องได้เท่ากับ 54 μs กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 ตามลำดับ สำหรับการวัดโปรไฟล์ได้ทดสอบกับซิลิคอนไดโอดเบอร์ 1N5401 โดยสมมุติว่ารอยต่อเป็นแบบชั้นข้างเดียว แสดงดังรูปที่ 4.20 และในรูปที่ 4.21 เป็นตัวอย่างการวัดโปรไฟล์ของรอยต่อแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มี $CuInSe_2$ เป็นสารตัวนำและ In เป็นโลหะ

เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นโครงสร้าง MIS ที่มีชั้นฉนวนเป็นโฟโต้รีซิสต์ ดังนั้นตัวอย่างมาตรฐานที่เราใช้ในการทดสอบควรมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน ตัวอย่างที่เราใช้เป็นโครงสร้าง MIS มีชั้นสารกึ่งตัวนำเป็น GaAs ชนิดเอ็นที่รู้ค่าปริมาณความเข้มข้นพาหะแล้วมีค่าเท่ากับ 10^{18} cm^{-3} ได้วัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้างนี้ แสดงดังรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23

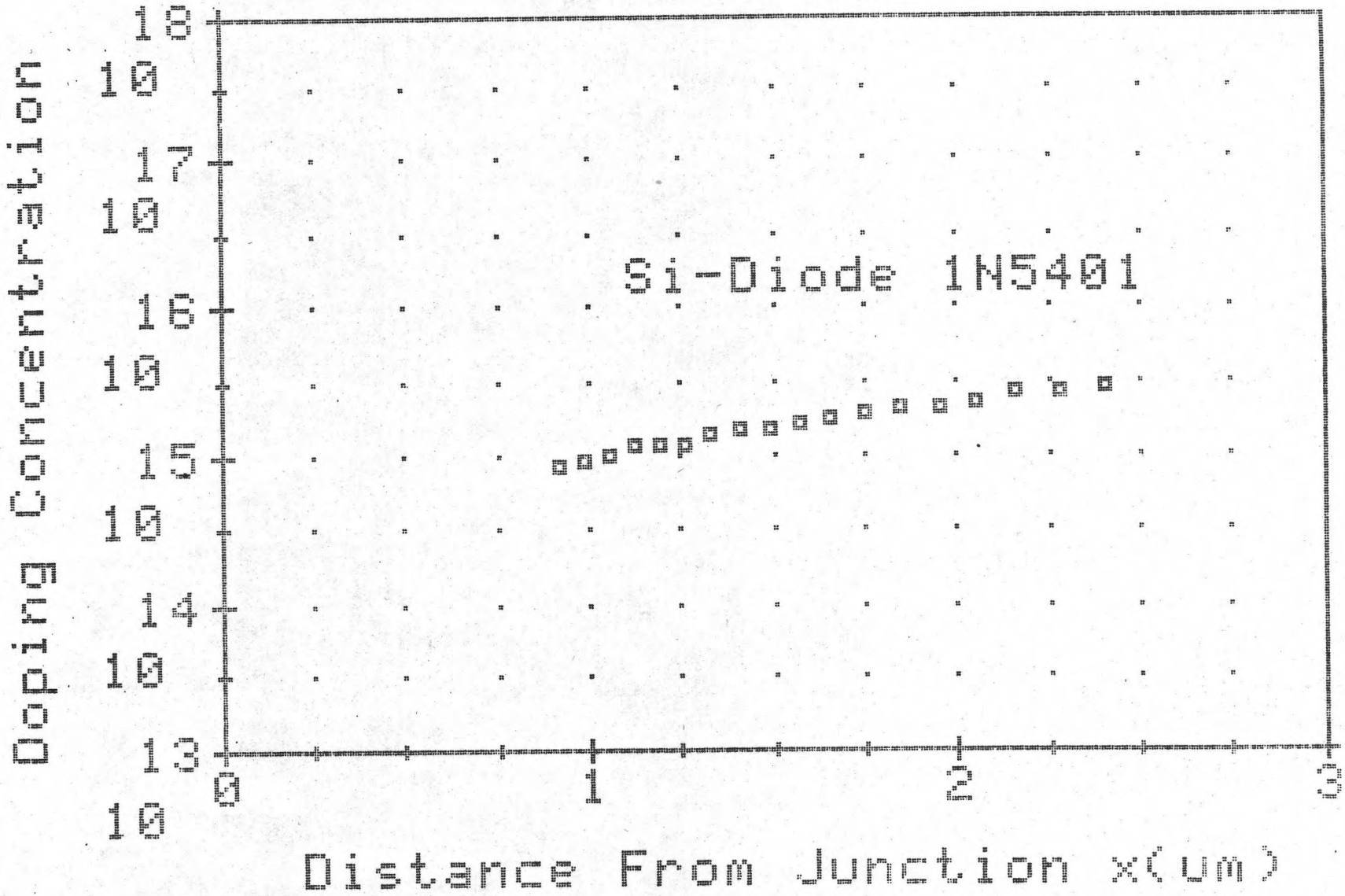
เราคำนวณปริมาณความเข้มข้นพาหะได้เท่ากับ 3.8×10^{18} cm^{-3} และ 4.8×10^{18} cm^{-3} ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่มี $CuInSe_2$ เป็นแผ่นรองรับได้ทำการวัดลักษณะความจุงแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 เป็นตัวอย่างมีโครงสร้างเป็น MIS ที่มี $CuInSe_2$ ชนิดพีเป็นแผ่นรองรับ จากกราฟเราคำนวณปริมาณความเข้มข้นพาหะได้เท่ากับ 1.0×10^{16} cm^{-3} ในรูปที่ 4.24 และ 5.7×10^{15} cm^{-3} ในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.18 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MOS มี Si เป็นฐานรอง

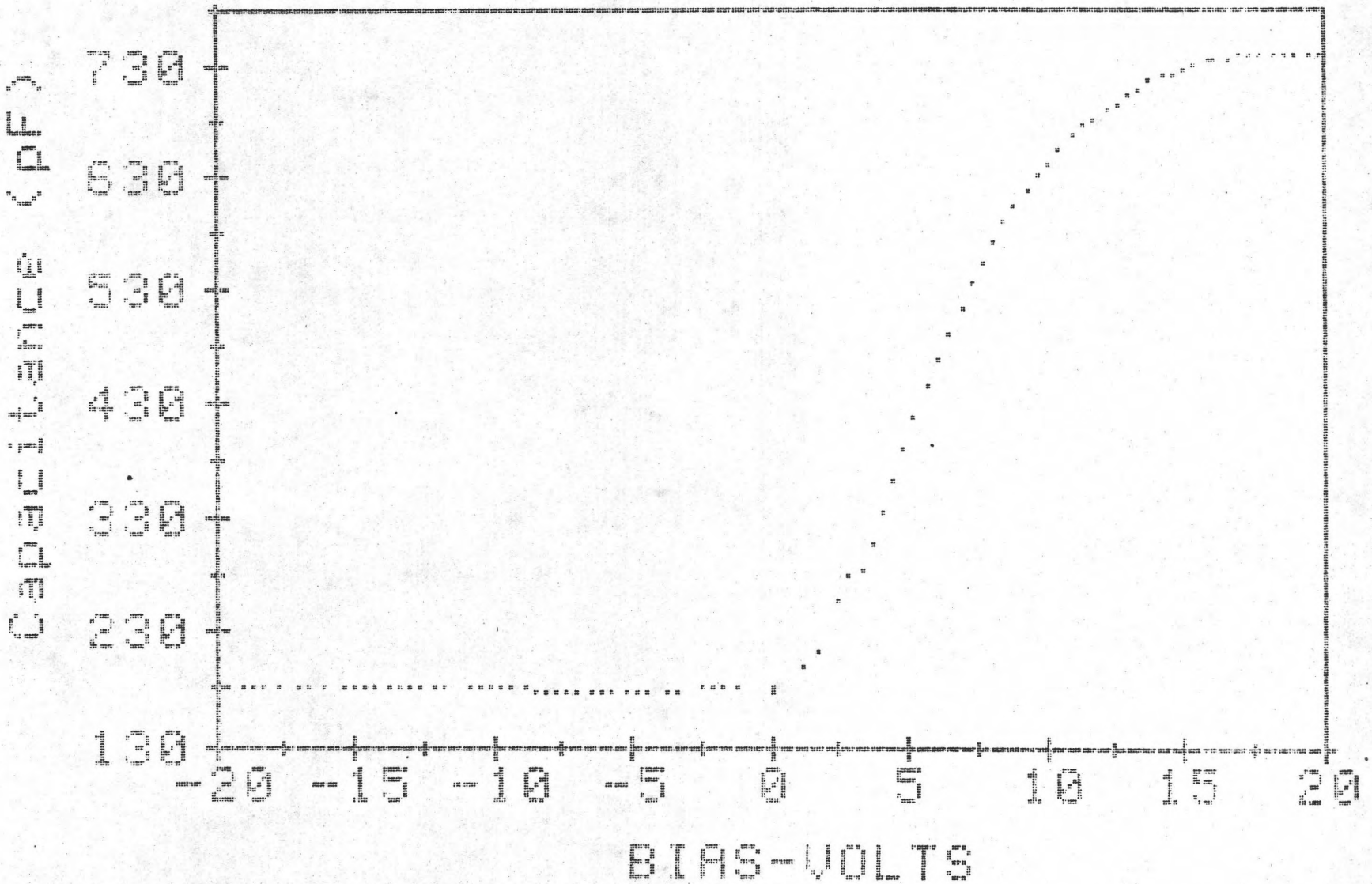


รูปที่ 4.19 ลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลาของโครงสร้างแบบ MOS มี Si เป็นฐานรอง จากกราฟคำนวณช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยได้เท่ากับ 54 μs

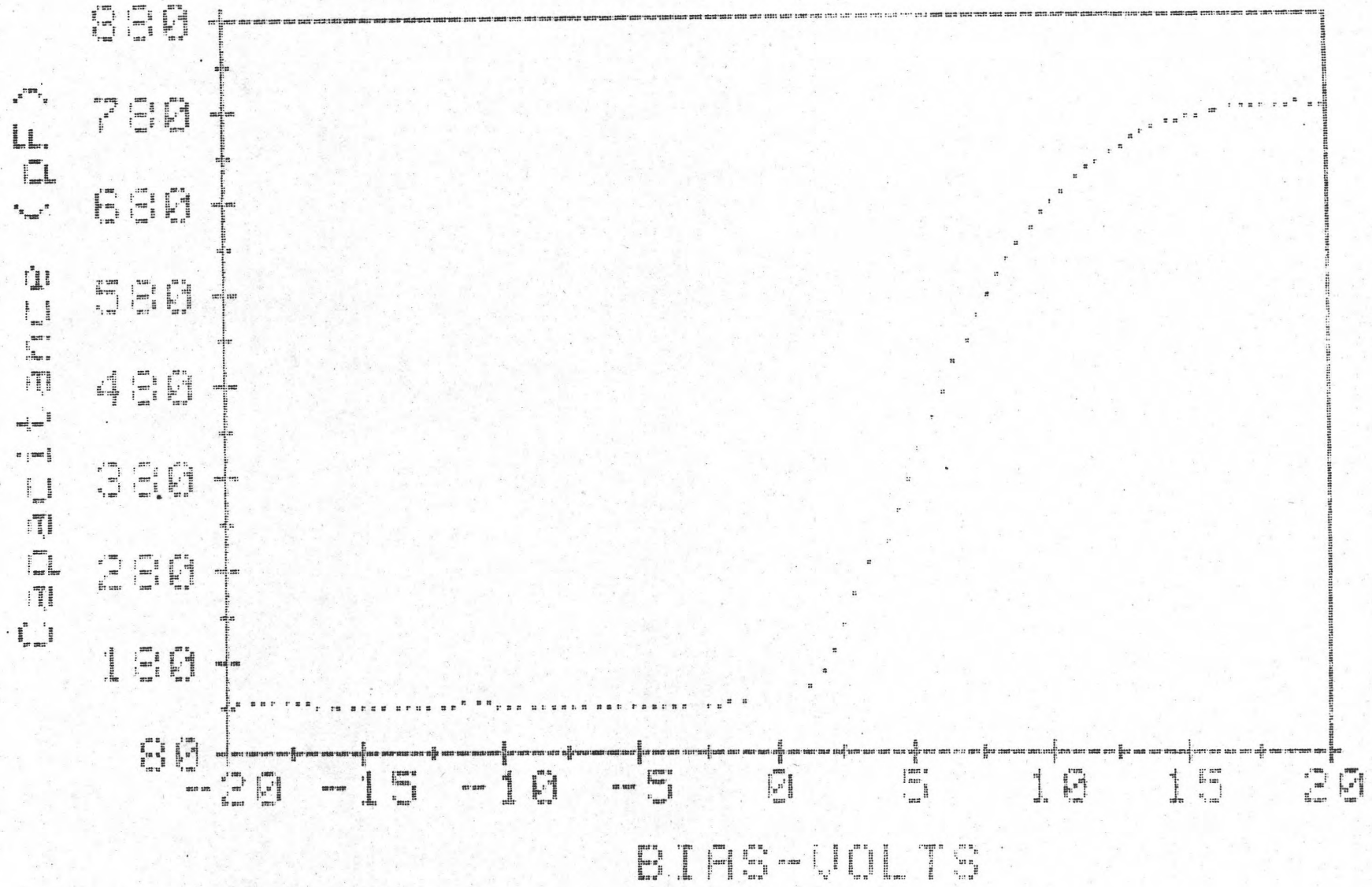


รูปที่4.20 โปรไฟล์สารเจือปนของซิลิคอนไดโอดเบอร์ IN 5401

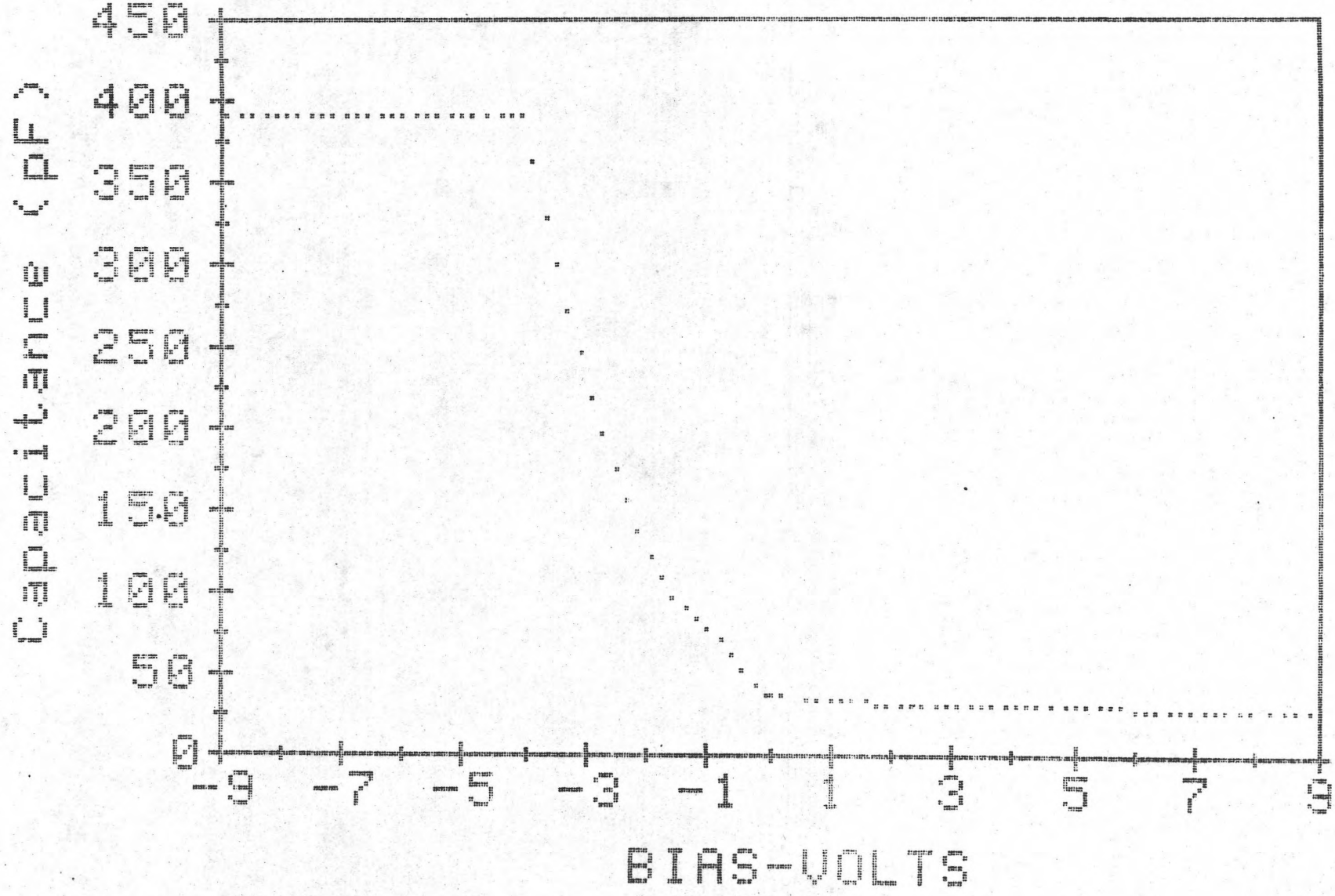
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างโปรไฟล์สารเจือปนของรอยต่อ $In/CuInSe_2$



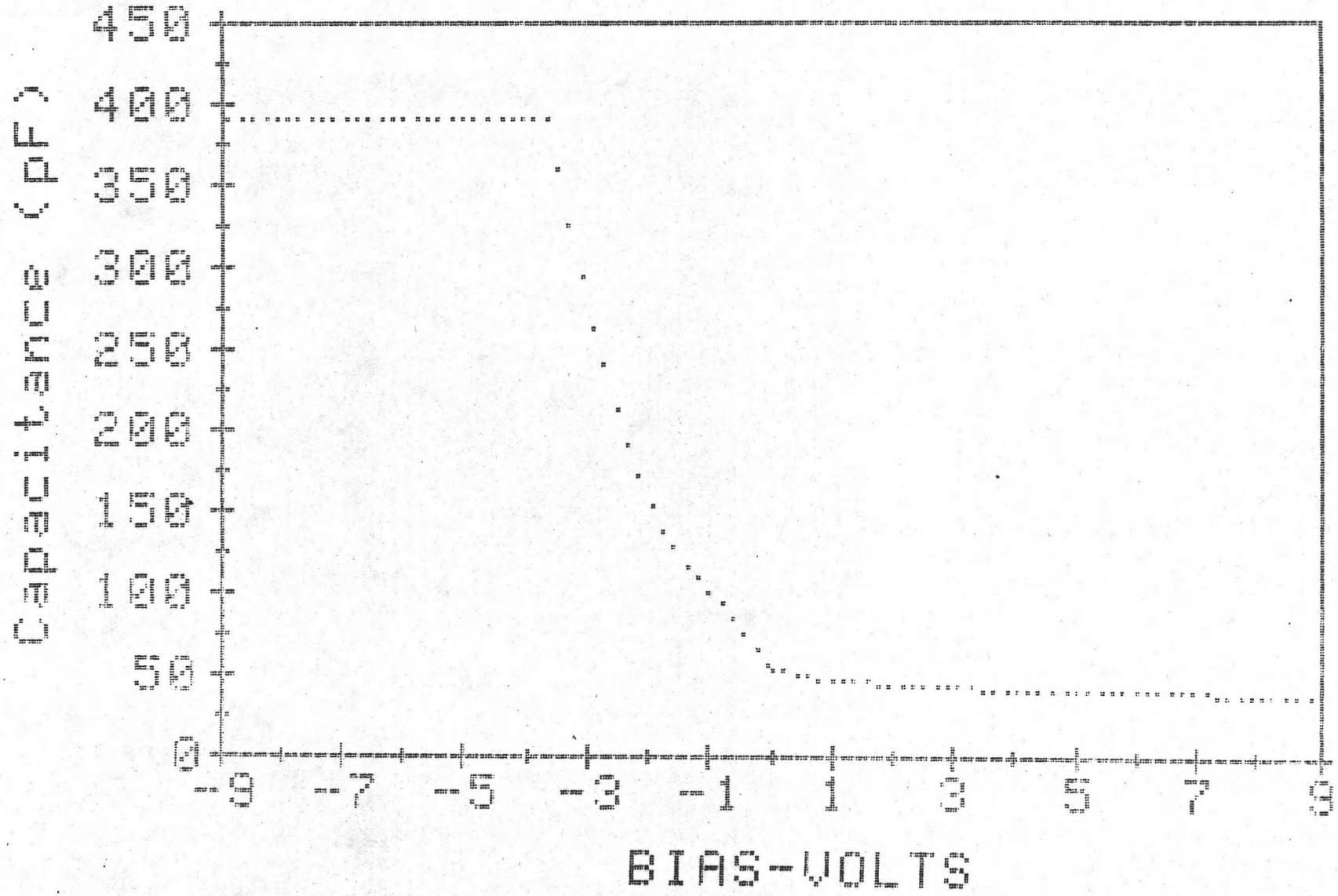
รูปที่ 4.22 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS มี GaAs ชนิดเอ็น เป็นแผ่นรองรับ คำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 3.8×10^{18} cm^{-3}



รูปที่ 4.23 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS มี GaAs ชนิดเอ็น เป็นแผ่นรองรับ คำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 4.8×10^{18} cm^{-3}



รูปที่ 4.24 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS มี $CuInSe_2$ ชนิดพีเป็นแผ่นรองรับ คำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 1.0×10^{16} cm^{-3}



รูปที่ 4.25 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS มี $CuInSe_2$ ชนิดพีเป็นแผ่นรองรับ คำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 5.7×10^{15} cm^{-3}