



ปีการศึกษา 2534

เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์



- โดย
1. นายสมชาย อัมภาเหินดี
 2. นายสุรสิน ธิติประเสริฐ
 3. นายพินิจ ล่ำสันต์

พศ. นิกร สุขุมตันติ อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027982

1.8 ก.ค. 2534

ชื่อเรื่อง	เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์
ชื่อนักศึกษา	1. นายสมชาย อัมภา เหน็ด 2. นายสุรสิน ธิติประเสริฐ 3. นายพินิจ ล่ำสันต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. นิกธ สุธุตมตันติ
ปีการศึกษา	2534

บทคัดย่อ

ปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ แสดงผลด้วยตัวเลข และได้ออกแบบและสร้าง โหลดเซลล์ ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบ คาน และสเตรนเกจแบบความต้านทาน โดยโหลดเซลล์นี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าน้ำหนักของวัตถุ ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ความสามารถในการรับน้ำหนักของโหลดเซลล์ 10 กิโลกรัม และได้ ออกแบบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโหลดเซลล์ วงจรขยายสัญญาณนี้ประกอบด้วยวงจรขยาย แบบสเตจเมเนเตชั่น วงจรกรองสัญญาณ วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล และ วงจรแสดงค่าน้ำหนักเป็นตัวเลข 3 หลักครึ่ง เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์เครื่องนี้หลังจาก ทดสอบและ เปรียบเทียบแล้ว มีค่าความไม่เป็นเชิงเส้น และความแม่นยำในการชั่ง $\pm 1\%$ เต็ม พิกัด อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้สำหรับงานทั่ว ๆ ไป

ก

เลขหมู่ T. 33149 ๕4
เลขทะเบียน 027982
วัน, เดือน, ปี ๒๕๓๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027982

Project Report	An Electronic Scale
Name	1. Mr.Somchai Imkumnert 2. Mr.Surasin Thitiprasert 3. Mr.Pinit Lamsant
Project Report Advisor	Asis. Prof. Nikron sukutamati
Academic Year	1991

Abstract

This project presents the design and construction of a digital displayed electronic scale. By design and construction Load Cell which comprised the sensing elements is beam type, to which the resistance straingages are bonded. Load Cell is designed to convert the weight of object to electrical signal. The load cell can bear the maximum 10 kilogram load. The indicator is designed to amplify electrical signal from load cell by using instrumentation amplifier, filter, A-D converter and displaying the weight in 3 1/2 digits. This scale has been tested and prove to have nonlinearity and accuracy $\pm 1\%$, which are reasonable for general measurement.

ข
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับการทำปฏิญานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณ ผศ.นิกร สุขุมตันติ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้คำแนะนำ และเพื่อน ๆ ทุกท่านที่ภาควิชาเครื่องกล ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ทุกท่านที่สละ เวลาแนะนำและ ได้แนะนำทางการออกแบบชิ้นส่วนทางด้านเครื่องกลเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม ในด้านต่าง ๆ ทั้งทุนทรัพย์ ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำปฏิญานิพนธ์นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารศึกษา

2534

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้จัดทำ

1. นายสมชาย อิ่มกาเหน็ด

2. นายสุรสิน ธิติประเสริฐ

3. นายพินิจ ล่ำสันต์

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(พศ. นิกร สุขตมตันติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

..... อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่	
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์	3
3. การออกแบบสร้างและทดสอบอินดิเคเตอร์	37
4. การออกแบบสร้างและทดสอบโพลดเซลล์	50
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก ก. รายละเอียดและคุณสมบัติของ ไอซีเบอร์ต่างๆ	63
ภาคผนวก ข. พระราชบัญญัติเกี่ยวกับเครื่องชั่ง	67
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของเหล็กที่ใช้ทำชิ้นส่วนรับน้ำหนัก	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

เครื่องชั่งน้ำหนักในปัจจุบันที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปนั้นเป็นแบบกลไกประกอบด้วยสปริงคาน และชิ้นส่วนที่เป็นกลไกเคลื่อนที่ต่าง ๆ ซึ่งข้อดีของเครื่องชั่งแบบนี้คือ ราคาถูกสร้างง่าย และใช้งานได้ทนทาน แต่ก็มีข้อเสียคือความแม่นยำจำกัด เมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งความผิดพลาดจะเพิ่มมากขึ้นอาจจะเนื่องมาจากสปริงเกิดความล้า หรือเกิดความผิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว ทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาอย่างใกล้ชิด และปรับเทียบเครื่องชั่งอยู่เสมอ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการนี้สูงและไม่สะดวกที่จะต้องทำกันบ่อย ๆ ดังนั้นจึงเกิดความต้องการเครื่องชั่งที่ให้ความแม่นยำ พร้อมทั้งสะดวกในการใช้งานนั้น

โดยอาศัยกฎของฮุก (Hooke's law) คุณสมบัติของสเตรนเกจแบบความต้านทาน (Resistance strain gage) เทคนิคการสร้างโหลดเซลล์ (load cell) และความก้าวหน้าทางอิเล็กทรอนิกส์ จะสามารถสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความแม่นยำและสะดวกต่อการใช้งานได้ น้ำหนักที่ต้องการซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยโหลดเซลล์ ซึ่งเมื่อผ่านการขยายและเปรียบเทียบแล้ว ก็จะสามารถแสดงผลออกมาเป็นค่าน้ำหนักโดยตรง และที่สำคัญคือข้อมูลในการชั่งซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า ยังง่ายต่อการที่จะนำไปโปรเซส เช่น การคำนวณ การบันทึก การพิมพ์รายงาน การส่งตลอดจนการใช้งานกับระบบควบคุมต่าง ๆ ก็เป็นไปได้ง่ายขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของปริิมาณพันธ์

1.1.1 ศึกษาและออกแบบสร้าง โหลดเซลล์ ซึ่งเป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง โดยจะศึกษาเกี่ยวกับ

ก. วงจรของสเตรนเกจที่จะนำมาใช้

ข. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ โหลดเซลล์ที่จะสร้างขึ้น เช่น ค่าสัญญาณออกสูงสุดจากการออกแบบ ค่าแรงดันป้อนโหลดเซลล์ ผลของอุณหภูมิต่อสัญญาณออก

ค. การเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนรับน้ำหนักของตัวโหลดเซลล์

1.1.2 ศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ

คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. โหลดเซลล์

ข. วงจรจ่ายไฟโหลดเซลล์

ค. วงจรขยายสัญญาณ

ง. วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

จ. วงจรแสดงผลด้วยตัวเลข

1.2 เนื้อหาของปริิณยานิพนธ์

สำหรับปริิณยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาและออกแบบสร้าง โหลดเซลล์ โดยอาศัยคุณสมบัติของสเตรนเกจแบบความต้านทาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นส่วนทรานสดิวเซอร์ และส่วนที่ 2 คือส่วนอินติเคเตอร์

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ ทรานสดิวเซอร์ที่เรียกว่า โหลดเซลล์ และชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบสร้างและทดสอบอินติเคเตอร์ คือ ส่วนของวงจรจ่ายไฟป้อนโหลดเซลล์ วงจรขยายสัญญาณ วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และวงจรแสดงผล

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบสร้างและทดสอบโหลดเซลล์ คือ ชิ้นส่วนรับน้ำหนักและการติดตั้งสเตรนเกจความต้านทาน

ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก เป็นรายละเอียดและคุณสมบัติของไอซีเบอร์ต่าง ๆ พระราชบัญญัติเกี่ยวกับเครื่องชั่งรายละเอียดของเหล็กที่ใช้ทำชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริิณยานิพนธ์

1.3.1 ได้เครื่องต้นแบบของเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ 1 เครื่อง ขนาด 10 กิโลกรัม

1.3.2 จากข้อมูลในการสร้าง โหลดเซลล์ จะสามารถนำไปประยุกต์ในการสร้างให้มีพิภักการชั่งน้ำหนักที่สูงกว่าเป็นเมตริกตันได้ นอกจากนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวทรานสดิวเซอร์แบบอื่น ๆ ได้อีก เช่น เครื่องวัดอัตราเร่ง, วัดแรงบิด, วัดความดัน, ความเค้น, ความเครียด ฯลฯ

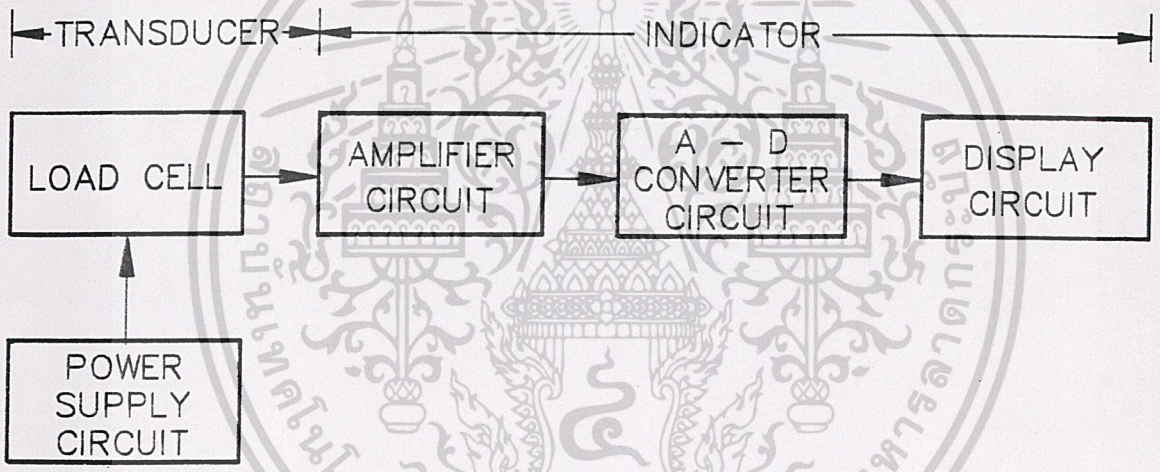
1.3.3 นำสัญญาณไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามน้ำหนัก ไปประยุกต์ใช้กับงานควบคุม ด้วยระบบไมโครคอมพิวเตอร์ได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีของ เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์

ในยุคที่การพัฒนาทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงได้มีการประดิษฐ์ เครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ขึ้น ซึ่งไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวได้จึงลดการสึกหรอ ทำให้รักษาความแม่นยำได้เป็นระยะเวลานาน

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนปริมาณทางฟิสิกส์ ซึ่งในที่นี้คือน้ำหนักของวัตถุที่นำมาชั่ง ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้จากตัวทรานสดิวเซอร์ให้สามารถอ่านค่าน้ำหนักออกมาโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.0



รูปที่ 2.0 แสดงบล็อกไดอะแกรมต่าง ๆ ของ เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์

2.1 ทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้เปลี่ยนค่าน้ำหนักไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้ามีชื่อเรียกว่า โหลดเซลล์ ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น Capacitive load cell, Reluctive load cell และ Piezoelectric load cell แต่ในปริญญานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษา และสร้าง โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจความต้านทาน (Resistance strainage load cell) ซึ่งเป็นโหลดเซลล์แบบที่ใช้กันมากที่สุด มีขนาดรับน้ำหนักตั้งแต่ 5 กก. จนถึง 1,000,000 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 3
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมอร์แบบเสตรนเกจมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ชิ้นส่วนรับน้ำหนัก (Sensing Element) และเสตรนเกจแบบความต้านทาน เมื่อมีน้ำหนักมากกระทำต่อชิ้นส่วนรับน้ำหนัก จะเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ขึ้นในเนื้อของวัสดุ ส่วนเสตรนเกจจะทำหน้าที่เปลี่ยนความเครียดให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

2.1.1 ชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

ในการทำงานของชิ้นส่วนรับน้ำหนักนั้น จะเกิดการยืดหรือหดตัวเท่านั้น (ประมาณ 1/100-10 มิลลิเมตร) จึงไม่มีการเสียดสีของชิ้นส่วน ทำให้ลดการสึกหรอและลดความผิดพลาดได้ จากทฤษฎีของฮุคจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก (แรง) ที่กระทำต่อชิ้นส่วนรับน้ำหนัก กับค่าความเครียดดังนี้

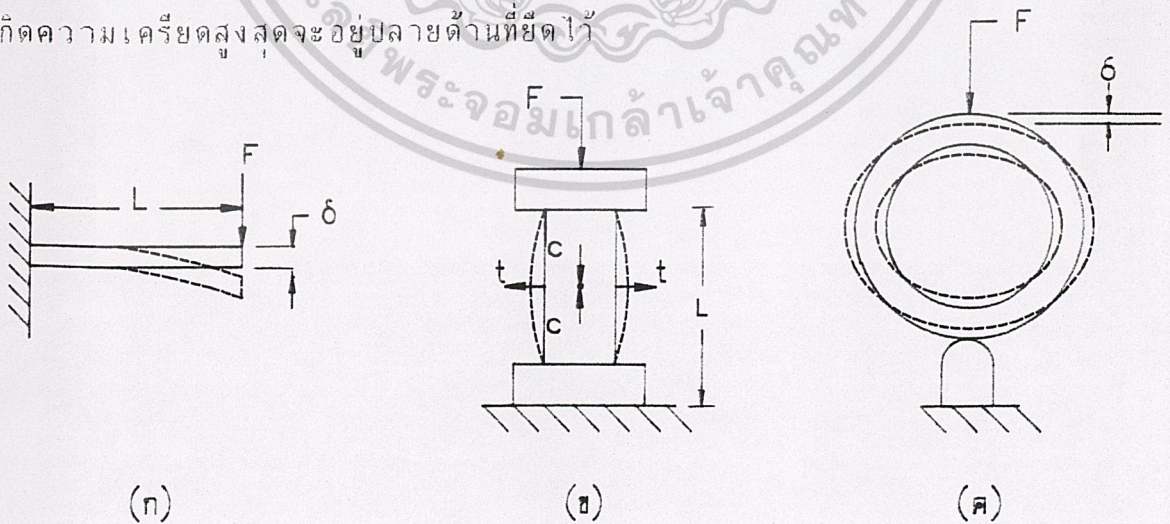
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \dots\dots\dots (2.0)$$

- เมื่อ E = โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (กก./ซม²) σ = ความเค้น (กก./ซม²)
 ϵ = ความเครียด (ซม./ซม.) F = น้ำหนักที่กระทำ (กก.)
 A = พื้นที่หน้าตัดชิ้นส่วนรับน้ำหนัก (ซม²) L = ความยาวเดิม (ซม.)
 ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (ซม.)

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักที่ใช้ทำโพลีเมอร์มีรูปร่างต่าง ๆ กันดังนี้

ก. แบบคาน (Beam)

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักที่มีรูปร่างแบบคานนี้ จะเป็นแบบที่ง่ายที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) โดยจะยึดปลายด้านหนึ่งไว้ ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่รับน้ำหนัก จุดที่เกิดความเครียดสูงสุดจะอยู่ปลายด้านที่ยึดไว้



รูปที่ 2.1 แสดงชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบต่าง ๆ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. แบบคอลัมน์ (Column)

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคอลัมน์แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 (ข) จุดที่เกิดความเค้นดัดสูงจะอยู่ตรงกลาง c หมายถึงแรงดัดหรือแรงกด ส่วน t หมายถึงแรงดึงที่เกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุ

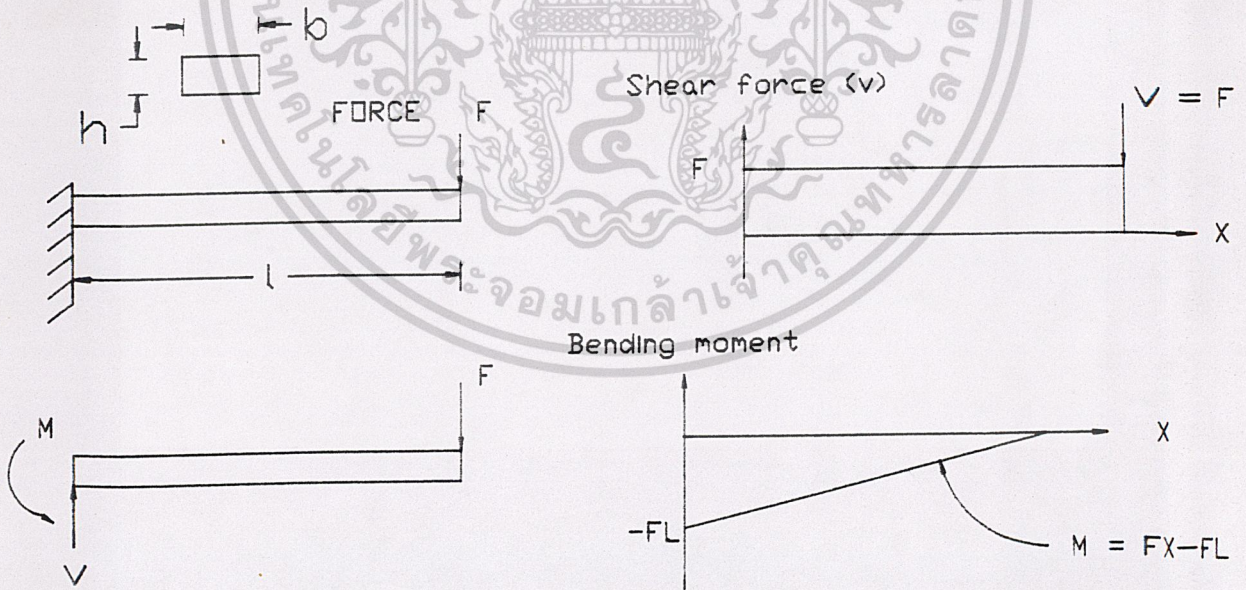
ค. แบบวงแหวน (Proving ring)

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวน แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 (ค) เป็นแบบที่มีความไวค่อนข้างสูง ค่าความเค้นดัดสูงที่สุดจะเกิดที่จุดมีแรงกระทำและส่วนโค้งที่ทำมุม 90 องศา กับจุดแรงกระทำ

จากการวิจัยของบริษัทฟิลลิปส์ ซึ่งเป็นผู้ผลิตโพลีเอสเตอร์รายหนึ่ง ได้สรุปถึงความเหมาะสมในการใช้งาน ของชิ้นส่วนรับน้ำหนักที่มีรูปร่างทั้ง 3 แบบ ดังนี้

1. แบบคานใช้กับโพลีเอสเตอร์ในช่วง 20 กก. ถึง 500 กก.
2. แบบวงแหวนใช้กับโพลีเอสเตอร์ในช่วง 200 กก. ถึง 2 ตัน
3. แบบคอลัมน์ใช้กับโพลีเอสเตอร์ในช่วง 2 ตัน ถึง 1,000 ตัน

สำหรับปริมาณพันธะได้ตั้งไว้ที่ระดับสูงสุดที่จะชั่งเท่ากับ 10 กก. ดังนั้นชิ้นส่วนรับแรงที่จะเลือกใช้จึงเป็น แบบคาน

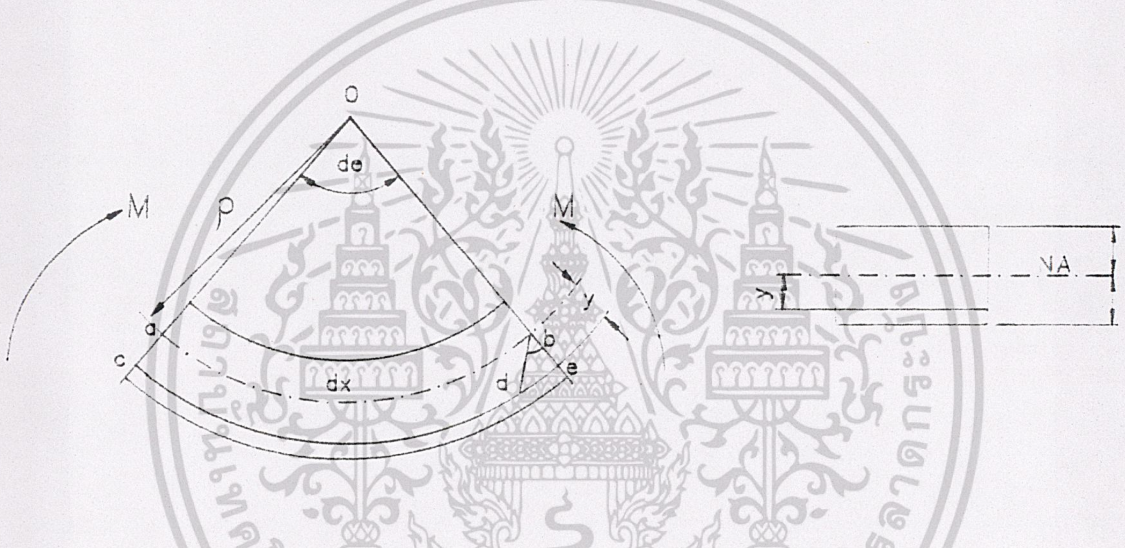


รูปที่ 2.2 แสดง Shear force และ Bending-moment diagram (ไม่คติน้ำหนักคาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
5
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความเค้นดัด (Bending Stress)

เพื่อที่จะห้องการทราบค่าความเค้นสูงสุดของคาน เพื่อหาขนาดของคาน การหา
 ค่าความเค้นดัด σ ที่เกิดขึ้นในคาน ให้ตัดส่วนหนึ่งของคานในรูปที่ 2.3 ออกมายาว dx
 เมื่อคานโค้งงอไปตามโมเมนต์ดัด ความยาวด้านบนของคานจะถูกทำให้หดสั้นลง ส่วนด้าน
 ล่างจะยืดออก ดังนั้นด้านล่างและด้านบนของคานจะเกิดความเค้นดึง (Tensile
 stress) และความเค้นอัด (Compressive stress) ตามลำดับ (ซึ่งความเค้นทั้ง
 สองชนิดนี้ คือ ความเค้นดัดนั่นเอง) ฉะนั้นในระหว่างด้านบนและด้านล่างของคาน จะมี
 ชั้นที่ไม่ยืดและไม่หดซึ่งมีชื่อเรียกว่า neutral surface ให้ชั้นนี้แทนด้วย ab ซึ่งเท่ากับ
 ความยาว dx เดิมที่หน้าตัดของคาน neutral surface นี้จะกลายเป็นเส้นซึ่งมีชื่อเรียก



รูปที่ 2.3 แสดงการหาความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในคาน

ว่า neutral axis (NA) เนื่องจากไม่มีการยืดหรือหดตัวเกิดขึ้นที่ neutral surface
 ดังนั้น ความเค้นดัดที่นี้จึงมีค่าเป็นศูนย์

ข้อสมมุติฐานที่ใช้ในการหาสูตรของความเค้นดัดคือ

- 1) ก่อนที่จะมีแรงมากระทำ คานมีลักษณะตรง
- 2) ความเค้นที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่เกิน elastic limit ของวัสดุที่ใช้ทำคาน
- 3) หน้าตัดของคานหลังจากที่คานถูกงอโค้งแล้ว ยังเป็นหน้าตัดที่เรียบอย่างเดิม
- 4) วัสดุของคานมีเนื้อเดียวกันตลอด

ให้ p เป็นรัศมีความโค้งของ neutral surface ab ให้พิจารณาที่ชั้นใด ๆ

(c อยู่ห่างจาก ab เป็นระยะทาง y, c เป็นบวกตั้งรูป) ลากเส้น bd ขนานกับ oc และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น $ab = cd = dx$

ส่วนยี่ดของคานในชั้นนั้นคือระยะ de ดังนั้นความเครียดที่เกิดขึ้นคือ

$$\epsilon_x = \frac{de}{dx}$$

แต่ $dx = pd$ และมุม dbe เท่ากับ $d\theta$ ด้วย ฉะนั้น

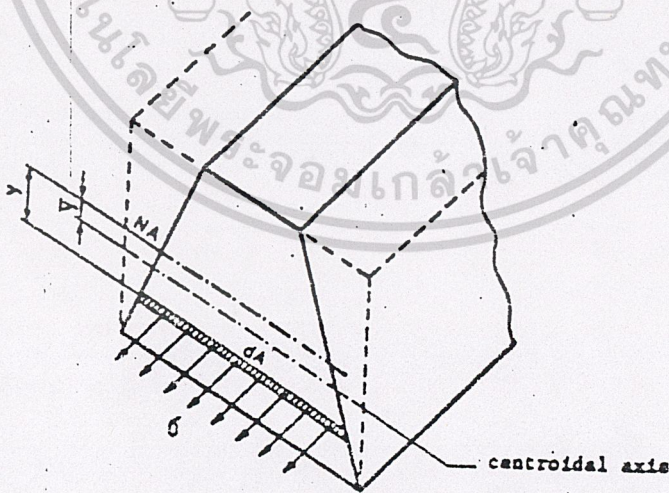
$$\epsilon_x = \frac{y d\theta}{pd\theta} = \frac{y}{p}$$

จากกฎของฮุก

$$\sigma = E\epsilon_x$$

$$\sigma = \frac{Ey}{p}$$

ฉะนั้นความเค้นดัดที่เกิดขึ้นภายในคานจึงเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับระยะทางจาก NA ค่า σ นี้จะเป็นแรงอัดเหนือแกน NA (y เป็น $-$) และเป็นแรงดึงใต้แกน NA (y เป็น $+$) ในการหาตำแหน่งของ NA ให้พิจารณาคานซึ่งมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ตามรูปที่ 2.4 (ซึ่งความจริงจะใช้หน้าตัดใดๆ ที่มีสมมาตรก็ได้)



รูปที่ 2.4 แสดงการหาตำแหน่ง NA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าแกน NA อยู่ห่างจาก Centroidal axis ของหน้าตัดเป็นระยะ y ตามรูป 2.4 ให้ dA เป็น element ของพื้นที่หน้าตัด ซึ่งความเค้นอัดกระทำเนื่องจากคานนี้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นแรงรวมซึ่งกระทำที่หน้าตัดต้องเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_A \sigma dA = 0$$

แทนค่าสมการ (2.1) ลงในสมการข้างบน

เนื่องจาก E เป็นค่าคงที่

ρ

$$\int_A \frac{E y}{\rho} dA = 0$$

เป็นโมเมนต์ของพื้นที่หน้าตัดของคานรอบแกน NA ฉะนั้น

$$\int_A y dA = \bar{y} A = 0$$

เนื่องจากค่าพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด A ไม่เท่ากับศูนย์ $\bar{y} = 0$ แสดงว่าแกน NA ทับกับ Centroidal axis เสมอ

จากรูป 2.3 และ 2.4 จะเห็นว่าผลรวมของโมเมนต์ตัด ซึ่งเกิดจากความเค้นตัด σ ที่หน้าตัดของคาน จะต้องเท่ากับโมเมนต์ตัด M

$$M = \int_A \sigma y dA$$

แทนค่า σ จากสมการ (2.1) ลงในสมการข้างบนนี้

$$M = \frac{E}{\rho} \int_A y^2 dA$$

แต่ $\int_A y^2 dA$ เป็นโมเมนต์ อินเนอร์เซีย ของหน้าตัดรอบแกน NA ให้แทนด้วยอักษร I

$$M = \frac{E I}{\rho} \quad \text{แทนค่า } \frac{I}{\rho} \text{ ลงใน (2.1) จะได้}$$

ρ

ρ

$$\sigma = \frac{M y}{I}$$

I

จะเห็นว่าความเค้นตัดจะมากที่สุดที่ระยะ y ที่ไกลจากแกน NA ที่สุด ฉะนั้นค่า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความเค้นดึงสูงสุด ตามรูป 2.3 คือ

$$\sigma = \frac{MC_1}{I}$$

ซึ่ง I ของพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ $\frac{bh^3}{12}$

จากรูป 2.3 $C_1 = \frac{h}{2}$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{bh^2}$$

นอกจากความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในคานแล้ว ยังมีความเค้นเฉือนอีก ซึ่งจะ ไม่พิกสุน์ที่มาแต่จะขอยกสูตรมาให้ เนื่องจากโดยทั่วไปของคานแบบสี่เหลี่ยมค่าความเค้นเฉือนจะมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นดัด

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}$$

จากรูปที่ 2.2 จะได้

$$\tau_{max} = \frac{3F}{2bh}$$

$$\sigma_{max} = \frac{6FL}{bh^2} ; L > h$$

$$\sigma_{max} > \tau_{max}$$

2.1.2 สเตรนเกจแบบความต้านทาน

ในการใช้งาน สเตรนเกจแบบความต้านทานจะถูกติดไว้กับผิวของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก เมื่อความเค้นถูกส่งผ่านมายังสเตรนเกจ จะทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจเปลี่ยนแปลง และจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งจะได้กล่าวถึงเรื่องการแปลงในภายหลัง

สเตรนเกจแบบความต้านทานยังแบ่งออกเป็น สเตรนเกจแบบเส้นลวด

(Wire strain gauge) สเตรนเกจแบบแผ่นโลหะบาง (Foil strain gauge) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำ

ก. สเตรนเกจแบบเส้นลวดและแบบแผ่นโลหะบาง

สเตรนเกจทั้ง 2 แบบดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 มีหลักการทำงานเหมือนกันคือ ค่าความต้านทานของเส้นลวดและแผ่นโลหะบางจะเปลี่ยนไปเพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวขึ้นในสเตรนเกจ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความยาวนี้จะมีความสัมพันธ์กับความเครียดดังแสดงในสมการ 2.0 ไว้แล้ว ค่าความต้านของสเตรนเกจมีสมการดังนี้

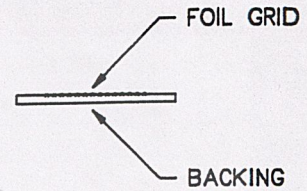
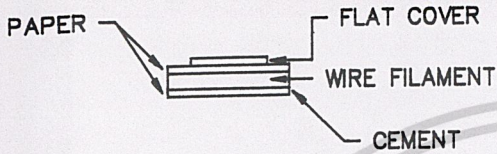
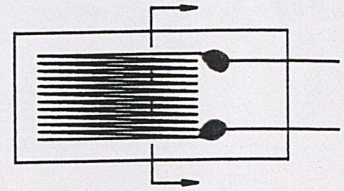
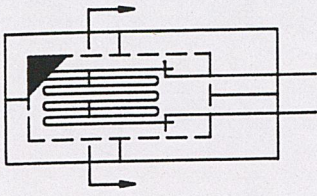
$$R = \rho L \dots\dots\dots (2.3)$$

A

- เมื่อ R = ค่าความต้านทานของสเตรนเกจ (โอห์ม)
 ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของ โลหะที่ทำสเตรนเกจ (โอห์ม-ซม.)
 L = ค่าความยาวทั้งหมดของ โลหะ (ซม.)
 A = พื้นที่หน้าตัดข้างของ โลหะ (ซม.²)

จากสมการ (2.3) จะเห็นว่าค่าความต้านทานจะมากขึ้น หรือลดลง เมื่อความยาว (L) เพิ่มขึ้นหรือลดลง ตามลำดับ สำหรับค่าความไวของสเตรนเกจ หรือเกจแพคเตอร์ (Gage factor) เป็นอัตราส่วนของความต้านทาน ที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วย กับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วย ซึ่งเขียนเป็นสมการได้

$$\text{Gage factor} = G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \dots\dots\dots (2.4)$$



รูปที่ 2.5 แสดง โครงสร้างของสเตรนเกจแบบเส้นลวดและแผ่นโลหะบาง

โลหะที่จะใช้ทำสเตรนเกจจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีค่าเกจแฟคเตอร์สูง และค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานต่ำ จากตารางที่ 1 โลหะ Advance, Copel และ Constantan จะเหมาะสมและใช้กันมากในปัจจุบัน

วัสดุที่ใช้ทำแผ่นรอง (Backing Material) จะต้องเป็นวัสดุที่สามารถยืดหยุ่นได้ดี และที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้แก่

1. กระดาษซึ่งบางมาก จะใช้กับสเตรนเกจแบบเส้นลวด
2. Polyimide มีความเหนียวและยืดหยุ่นดี ใช้กับงานทั่ว ๆ ไป
3. Epoxy และ Phenolic-glass จะให้ความถูกต้องและความแข็งแรง เส้นดี สามารถใช้กับอุณหภูมิที่สูง 400°ซ แต่มีจุดอ่อนคือเปราะและแตกหักง่าย จึงต้องใช้ความระมัดระวังในการติดตั้งงาน

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวนำชนิดต่าง ๆ

Name	Composition	Gate factor	Temp coef. of resistance	Resis-ohms per ft. in 1-mil diam.	Stress equivalent to 10°C on steel psi.
Nichrome.....	Ni-0.8,Cr-0.20	+2.0	+300	638	+2,000
Manganin.....	Ni-0.04,Mn-0.12, Cu-0.84	+0.47	Kil	260	-400
Advance		+2.1	-66
Copel	Ni-0.45,Cu-0.55	+2.4	2	290	-200
Constantan		+2.1	-66
Chromel-C.....	Ni-0.64,Fe-0.25, Cr-0.11	+2.5	640	+980
Iso-elastic...	Ni-0.36,Cr-0.08, Fe-0.52,Mo-0.005	+3.5	+175	680	+5,000
Nickel.....		-12.1	+6,000	70	-13,500
Platinum.....		+4.8	+3,000	80	
Soft iron.....		+4.2	+5,000	68	
Carbon.....		+20.0	-500	+5,000	

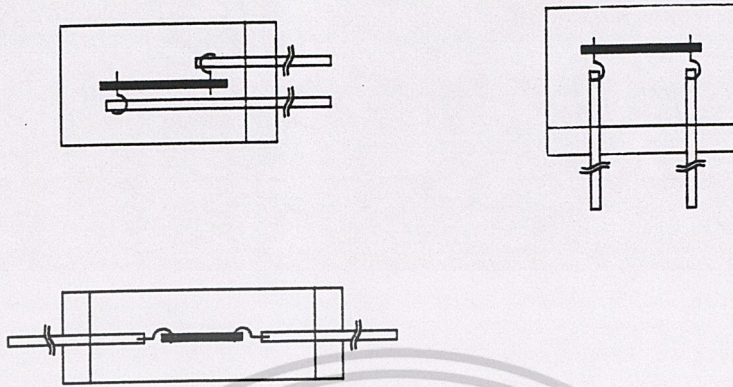
- These data are not to be taken too literally, since most of the characteristics vary with small change in composition, with degree of cold-working, etc.
- Ohms per degree centigrade $\times 10^6$
- Constantan is the name also applied to a 60-40 alloy with somewhat different properties.
- Unstable.

ข .. สเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำ

หลักการทางานจะเหมือนกับสเตรนเกจแบบเส้นลวดและแผ่นโลหะบางที่กล่าวมาแล้ว แต่สเตรนเกจแบบกึ่งตัวนำจะประกอบด้วยผลึกเดี่ยวของซิลิกอน ซึ่งทำเป็นชั้นสี่เหลี่ยมผืนผ้าบางมาก ติดอยู่บนแผ่นรองชนิดเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว และแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปแล้ว ค่าเกจแฟคเตอร์ของสเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำจะสูงประมาณ 100 เท่าของค่าเกจแฟคเตอร์ของสเตรนเกจแบบเส้นลวดและแผ่นโลหะบาง และค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานก็สูงเป็น 100 เท่าเช่นกัน สเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำแบ่งเป็นแบบ P-type ซึ่งมีค่าเกจแฟคเตอร์เป็นบวก และแบบ N-type ซึ่งมีค่าเกจแฟคเตอร์เป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
12
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ P-type ซึ่งมีค่าเกจแพคเตอร์เป็นบวก และแบบ N-type ซึ่งมีค่าเกจแพคเตอร์เป็นลบ



รูปที่ 2.6 แสดงสเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำแบบต่าง ๆ

สเตรนเกจที่กล่าวมาแล้วทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปเปรียบเทียบได้ ดังตารางที่ 2 ในการทำบริษณานิพนธ์ได้เลือกใช้สเตรนเกจแบบแผ่นโลหะบาง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทานต่ำ ช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง ชีตจำกัดความเครียดค่อนข้างสูง มีความต้านทานสูงให้เลือกเพื่อทำให้เกิดความร้อน (Heat dissipation) น้อยขณะใช้งาน และมีราคาถูกกว่า

ตารางที่ 2 แสดงข้อเปรียบเทียบของสเตรนเกจแบบต่าง ๆ

	แบบเส้นลวด	แบบแผ่นโลหะบาง	แบบสารกึ่งตัวนำ
1. ค่าเกจแพคเตอร์	ต่ำ (± 2)	ต่ำ (± 2)	สูง (± 100)
2. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน	ต่ำ (± 2)	ต่ำ (± 2)	สูง (± 100)
3. ช่วงอุณหภูมิใช้งาน	+100 +80 ^o ซ	-200 +550 ^o ซ	-50 +170 ^o ซ
4. ชีตจำกัดความเครียด	1.5% 18%	1.8% 10%	0.5%
5. ค่าความต้านทาน	25-120 Ω	120-1000 Ω	120-2000 Ω
6. ราคา	ถูก	ถูก	แพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรของสเตรนเกจ

การวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป (ΔR) ของสเตรนเกจก็เป็นสิ่งสำคัญมากอย่างหนึ่ง เนื่องจากมีค่าค่อนข้างน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปกติของสเตรนเกจ (R) การใช้โอห์มมิเตอร์วัดค่าโดยตรง จึงไม่นิยมกัน มีวงจรทางไฟฟ้าอยู่ 2 วงจรที่นิยมนำมาใช้แปลงค่าของความต้านทานที่เปลี่ยนไปให้เป็นสัญญาณหรือแรงดันทางไฟฟ้า คือ วงจรโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer circuit) และวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge circuit) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก. วงจรโพเทนชิโอมิเตอร์

วงจรโพเทนชิโอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เหมาะที่จะใช้กับการวัดแบบไดนามิค ให้ V เป็นแรงดันที่จ่ายให้วงจร ซึ่งมีความต้านทาน R_1 และ R_2 อยู่ในวงจร แรงดันคร่อม R_1 จะเท่ากับ V_0 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้

$$V_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V = \frac{1}{1 + r} V \dots \dots \dots (2.5)$$

โดยให้ $r = R_2/R_1$ ในการใช้งานโดยทั่วไป จะให้ R_1 เป็นสเตรนเกจแบบความต้านทาน และมีค่าเพิ่มขึ้น R_1 ส่วน R_2 จะเป็นความต้านทานที่มีค่าคงที่ ดังนั้น $\Delta R_2 = 0$ จะทำให้ได้แรงดันออกเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_0 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta V_0 = \frac{r}{(1 + r)^2} \frac{R_1}{R_1} (1 - \eta) V \dots \dots \dots (2.6)$$

ค่า η เป็นความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear term) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + [1/(1+r)](R_1/R_1)} \dots \dots \dots (2.7)$$

จากสมการ (2.6) ค่า ΔV_0 จะเป็นเส้นตรงที่สุดเมื่อค่า η มีค่าน้อยมาก ซึ่ง η ในสมการ (2.7) จะมีค่าน้อยเมื่อ r มีค่ามาก แต่ก็ไม่ควรมากเกินไป เพราะจะทำให้ ΔV_0 จดลงด้วย ค่า $r = 9$ เป็นค่าที่ใช้กันมาก เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_4}{R_1 R_4} + r \frac{\Delta R_2 + \Delta R_3}{R_2 R_3}} \dots \dots \dots (2.10)$$

โดย $r = R_2 / R_1$ และ เป็นค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีของสเตรนเกจแบบ
 สาราทั้งตัวนำ ซึ่งมีค่าแกจแพคเตอร์สูง ค่า $\Delta R/R$ จะมีค่ามาก ทำให้ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น
 (η) มีค่ามากด้วย แต่ในกรณีของสเตรนเกจแบบเส้นลาดและแบบแผ่นโลหะบางที่มีค่าแกจ
 แพคเตอร์ต่ำ จะได้ $\Delta R/R$ มีค่าน้อย จึงทำให้ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (η) มีค่าน้อย ซึ่งพิ
 จารณาตัดทิ้งไปได้ ทำให้เขียนสมการ 2.9 ใหม่ได้ดังนี้

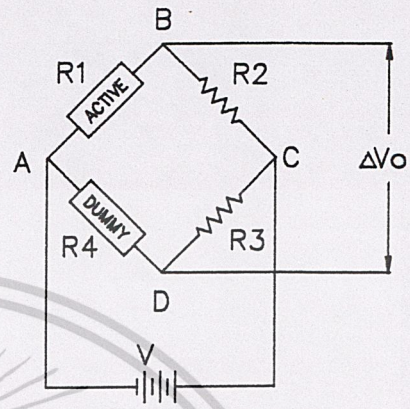
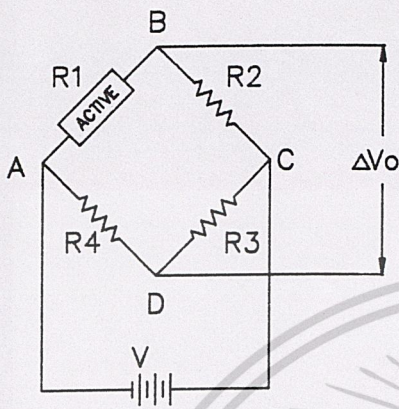
$$V_0 = V \frac{r}{(1+r)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}$$

ในการชั่งน้ำหนักทั่วไปจะเป็นโพลดแบบสแตตติค วางจรรยาที่จะนำมาใช้จึงเป็นวงจร
 แบบวีลสโตนบริดจ์ นอกจากนี้ยังสามารถจะชดเชยอุณหภูมิภายในวงจรบริดจ์ และสามารถ
 เพิ่มค่าแรงดันออกให้สูงขึ้นได้ถึง 4 เท่า โดยที่วงจรโพเทนซีโอมิเตอร์ทำไม่ได้ ซึ่งจะ
 กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

สี่ขยาออกและความไวของวงจรวีลสโตนบริดจ์

ในการใช้งานสเตรนเกจโดยติดกับชิ้นส่วนรับน้ำหนัก หรือกับวัสดุทดสอบทั่วไปสา
 มารถจะแบ่งออกได้หลายแบบ ตามลักษณะการวางและจำนวนของสเตรนเกจดังนี้

แบบที่ 1 ใช้แอคตีฟเกจ (active gage) 1 ชิ้น ส่วนที่เหลือจะใช้ความต้าน
 ทานค่าคงที่แบบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานค่า ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อมีน้ำหนัก
 กระทำบนชิ้นส่วนรับน้ำหนัก จะเกิดความเครียดขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจ
 เปลี่ยนไป ΔR_1 ส่วน $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$



รูปที่ 2.9 การจัดวงจรแบบที่ 1 รูปที่ 2.10 การจัดวงจรแบบที่ 2
 ในการพิจารณาให้ค่าแรงดัน V ที่จ่ายให้วงจรมีค่าคงที่ จากสมการ (2.1), (2.4) และ (2.7) จะหาค่าของ ΔV_o และ n ได้เท่ากับ

$$V_o = \frac{r}{(1+r)^2} (\Delta R_1) \cdot V = \frac{r}{(1+r)^2} \frac{VGF}{AE} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$n = \frac{1}{1 + \frac{r}{\Delta R_1 / R_1}} \dots \dots \dots (2.13)$$

ให้ s เป็นความไวของวงจรเท่ากับแรงดันออกต่อความเครียดจะได้

$$S = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot GV \dots \dots \dots (2.14)$$

จากสมการ (2.13) ถ้า r มีค่ามากจะทำให้ความไม่เป็นเชิงเส้นลดลง แต่ค่าแรงดันออกและความไวจะลดลงด้วย ในทางปฏิบัติจะให้ $r = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

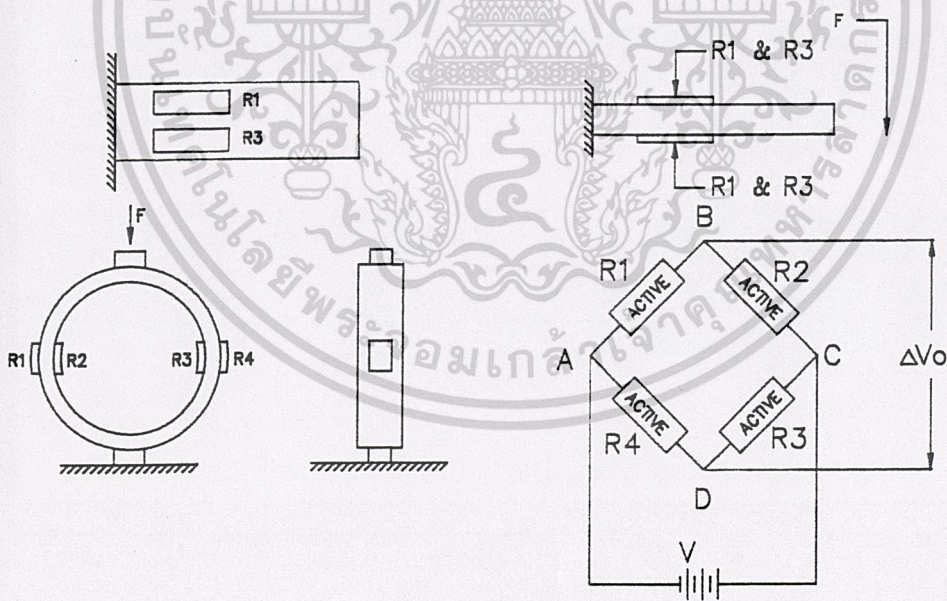
แบบที่ 2 จะใช้แอดดีฟเกจ 1 อัน และดัมมี่เกจ (Dummy gage) 1 อัน ตามรูปที่ 2.10 เป็นการชดเชยผลของอุณหภูมิ โดยสเตรนเกจที่ใช้จะเป็นชนิดเดียวกัน สำหรับค่าแรงดันออก ความไว และค่าความไม่เป็นเชิงเส้น จะเหมือนกับแบบที่ 1

แบบที่ 3 ใช้แอดดีฟเกจ 4 อัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สเตรนเกจ 2 อันแรกจะรับแรงดึง (Tension) ส่วนอีก 2 อันที่เหลือจะรับแรงอัด (compression) ค่า $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ เมื่อชิ้นส่วนรับน้ำหนัก ถูกแรงกระทำ จะส่งผลให้สเตรนเกจมีค่าเปลี่ยนไปเป็น $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$ และ $\Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$ ซึ่งจะได้แรงดันออก ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นและความไวดังนี้

$$\Delta V_o = \frac{\Delta R}{R} \cdot V = \frac{GFV}{AE} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\eta = 0 \dots \dots \dots (2.16)$$

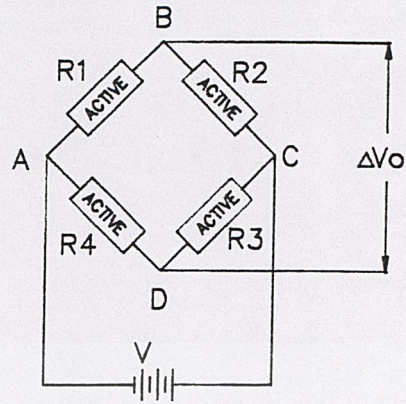
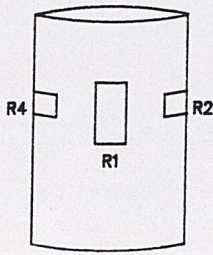
$$S = \frac{GV}{AE} \dots \dots \dots (2.17)$$



รูปที่ 2.11 การจัดวางจรแบบที่ 3

แบบที่ 4 ใช้แอดดีฟเกจ 4 อัน โดยจัดวางตั้งฉากกันดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การจัดวงจรแบบที่ 4

สเตรนเกจ R_1 และ R_3 รับแรงกด ส่วน R_2 และ R_4 จะรับแรงดึงที่เกิดจากการขยายตัวของพื้นที่หน้าตัดเนื่องจาก Poisson's ratio (ν) และทำหน้าที่ชดเชยผลของอุณหภูมิด้วย เมื่อชิ้นส่วนรับน้ำหนักเกิดความเครียดขึ้น $\Delta R_1 = \Delta R_3 = -\Delta R$
 $R_2 = R_4 = \dots R$ จะทำให้ได้แรงดันออก ความไม่เป็นเชิงเส้นและความไว ดังนี้

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta R V}{2R} (1 + \nu) = \frac{VGF}{2AE} (1 + \nu) \dots \dots \dots (2.18)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta R (1 - \nu)}{R}} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$S = \frac{VG}{2} (1 + \nu) \dots \dots \dots (2.20)$$

2

การจัดวงจรสเตรนเกจทั้ง 4 แบบ ที่กล่าวมาแล้ว สามารถสรุปเป็นข้อเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 3 โดยกำหนดให้ค่า $r = 1$ ในแบบที่ 1 และ 2 ส่วนค่าของโลหะโดยทั่วไปจะประมาณ 0.3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการจัดวางจรรยาบรรณบัณฑิตรูปแบบต่าง ๆ

	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4
1. แรงดันออก	1	1	4	2.6
2. ความไม่เป็นเชิงเส้น	1	1	0	1.4
3. ความไว	1	1	4	2.6
4. การชดเชยผลของอุณหภูมิ	ไม่มี	มี	มี	มี
5. จำนวนสเตจ	1	2	4	4

เนื่องจากชิ้นส่วนรับแรงที่เลือกใช้ในปฏิยานุพันธ์ เป็นแบบคาน ดังนั้นวงจรรีทล โดนบริดจ์ที่เลือกใช้ได้ จึงมีแบบที่ 1, แบบที่ 2 และแบบที่ 3 แต่จากการพิจารณาถึงข้อดี ข้อเสียแล้วได้เลือกวงจรแบบที่ 3 ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นเท่ากับศูนย์ ถึงจะใช้จำนวนสเตจมากกว่า แต่ราคาก็ไม่ต่างกันไม่มาก ข้อได้เปรียบของวงจรแบบที่ 3 คือ จะได้แรงดันออกและความไวสูงกว่าถึง 4 เท่า ทำให้การขยายแรงดันในอินดีเคเตอร์ ไม่ต้องใช้อัตราขยายสูงเกินไปเป็นการลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน

2.2 อินดีเคเตอร์

ส่วนของอินดีเคเตอร์คือส่วนที่ต่อจากตัวทรานสดิวเซอร์ ส่วนนี้เป็นวงจร ไฟฟ้าล้วน ๆ ซึ่งประกอบด้วยวงจรภาคจ่ายไฟบ่อนโพลดเซลล์ วงจรขยายสัญญาณแบบ อินสทรูเมนเตชัน วงจรเอชดี วงจรดีโค๊ดเดอร์ และวงจรภาคแสดงผล

2.2.1 ภาคจ่ายไฟบ่อนโพลดเซลล์ (Excite Supply)

ภาคจ่ายไฟบ่อนโพลดเซลล์ที่เสถียรภาพดี และมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature Coefficient) ต่ำย่อมทำให้ได้สัญญาณออกจากโพลดเซลล์ มีค่าถูกต้อง และแม่นยำด้วย

ในยุคแรก ๆ ของเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้ไฟสลับบ้อนให้กับ โพลดเซลล์ แต่ปัจจุบันได้หันมาใช้ไฟกระแสตรงแทน เพราะสามารถจะสร้างให้มีเสถียร ภาพดีได้ง่าย และราคาถูกลง ซึ่งเป็นผลมาจากความก้าวหน้าทางอิเล็กทรอนิกส์ ภาคจ่าย ไฟกระแสตรงยังสามารถจะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ก. แบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage)

ข. แบบกระแสคงที่ (Constant Current)

สำหรับภาคจ่ายแบบแรงดันคงที่ สามารถที่จะใช้ได้ทั้งกรณีของสเตรนเกจแบบเส้นลาดและแบบแผ่นโลหะบาง เพราะค่า R/R มีค่าน้อย ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรบริดจ์ที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยมาก แต่ถ้าใช้สเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำ ค่า R/R จะมีค่ามาก จึงจำเป็นต้องใช้ภาคจ่ายไฟแบบกระแสคงที่ เพื่อจะได้ลดค่าความไม่เป็นเชิงเส้นลง

2.2.2 อินสตรูเมนต์แอมพลิฟายเออร์ (Instrumentation Amplifiers)

วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ในการเพิ่มสัญญาณอ่อน ๆ จากตัวทรานสดิวเซอร์ เรียกว่า "อินสตรูเมนต์แอมพลิฟายเออร์" ทรานสดิวเซอร์คือเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่าง ๆ (แสง, ความร้อน, ทางกล) ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องมือเหล่านี้จะผลิตเอาต์พุตโวลต์ที่เฉจหรือเปลี่ยนความต้านทานตามขนาดของอินพุต

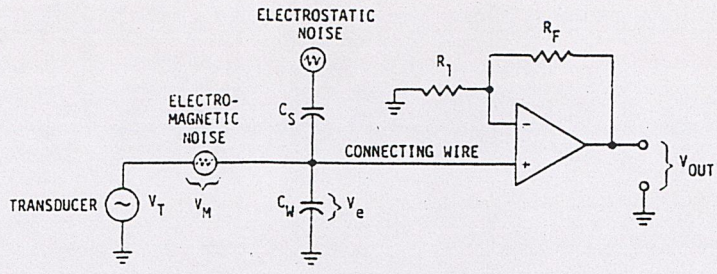
อินสตรูเมนต์แอมพลิฟายเออร์ที่ดีต้องมีสัญญาณรบกวนภายในต่ำ ซึ่งสัญญาณอินพุตจะไม่สูญหายไป การไม่ยอมรับ (rejection) ของสัญญาณรบกวนแบบคอมมอนที่อินพุตทั้งสองสูง (common mode rejection) และการเปลี่ยนแปลงของเพาเวอร์ซีพฟลายน้อยมาก

เนื่องจากการเชื่อมต่อของสายสัญญาณจากตัวทรานสดิวเซอร์ไปยังแอมพลิฟายเออร์ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้น ซึ่งได้แก่ อิเล็กโทรสแตติก (คาปาซิทีฟ) หรืออิเล็กโทรแมกเนติก (อินดัก) รูปที่ 2.13 แสดงทรานสดิวเซอร์ต่อกับวงจรขยายแบบธรรมดา (ไม่ใช่อินแอม) โดยผ่านทางสายและชี้ให้เห็นถึงสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนแบบอิเล็กโทรสแตติกเกิดขึ้นโดยคาปาซิทีฟจากแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวน (Noise source) กับสายส่งสัญญาณ (CS) และคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายส่งกับพื้นดิน (CW) ส่วนสัญญาณรบกวนแบบแมกเนติก (VM) เกิดจากแมกเนติกฟลักซ์ตัดผ่านสายส่งทำให้เกิดโวลต์เฉจในสายส่ง จากวงจรจะเกิดเอาต์พุตโวลต์เฉจเท่ากับ

$$V_{out} = (R_f + 1)(V_T + V_M + V_e) \dots \dots \dots (2.21)$$

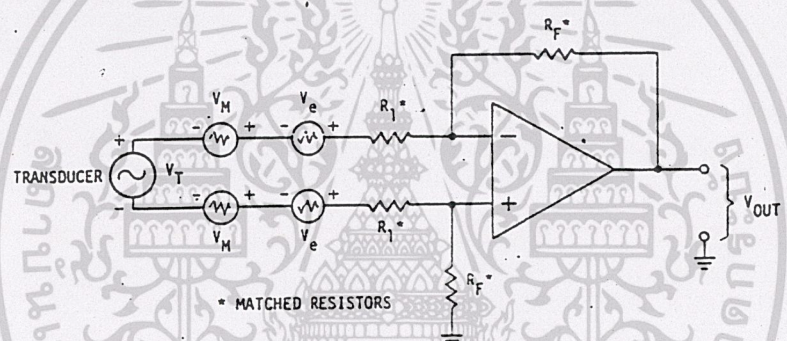
R1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงสัญญาณรบกวนในวงจรแบบธรรมดา

ดังนั้นถ้าสัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ จะเป็นการยากที่จะได้สัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ที่เอาต์พุตของแอมพลิไฟเออร์ แต่ถ้าเป็นวงจรเป็นอินแอมป์ในรูปที่ 2.14 เราสามารถหาอัตราส่วนสัญญาณเข้าต่อสัญญาณรบกวนได้



รูปที่ 2.14 Instrument Amplifier (Balanced Input)

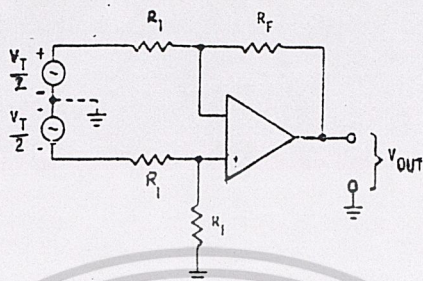
วงจรในรูปที่ 2.14 ต่างจากวงจรรูปที่ 2.13 คือส่วนที่เรียกว่า บาลานซ์อินพุท ทรานสดิวเซอร์ถูกแยกออกจากราวด์และสายสัญญาณ 2 สายถูกต่อไปยังตัวแอมพลิไฟเออร์ แต่ละสายถูกทำให้บาลานซ์เมื่อเทียบกับกราวด์ ดังนั้นแต่ละสายจะมีความต้านทานเหมือนกัน (R+R) เทียบกับกราวด์ ทำให้สัญญาณรบกวนในแต่ละสายเท่ากัน เหมือนกับวงจรในรูปที่ 2.13 จะได้

$$V_{no} = \frac{R_f}{R_1} (V_e - V_e + V_M - V_M)$$

$$= 0$$

แสดงว่าวงจรแบบนี้สามารถกำจัดนอยซ์ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติในการลดนอยซ์ก็คือจะทำอย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
22
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลจแมทซ์ (Match) รวมทั้งการแมทซ์ของ เกนภายในออฟแอมระหว่างเข้าบวกและเข้าลบของออฟแอมเพื่อที่จะหาเกน (gain) ของสัญญาณ เราจะแบ่งตัวทรานส์คิเซอร์เป็น 2 ตัว ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Equivalent Signal Circuit

สังเกตว่า เนื่องจากวงจรบาลานซ์เทียบกับกราวด์ จุดระหว่างตัวกำเนิดสัญญาณทั้งสองคือ จุดกราวด์พิจารณาตัวบน จะได้อินเวอร์สเอาต์พุท (V_{oi}) เท่ากับ

$$V_{oi} = -\frac{V_T}{2} \left(\frac{R_f}{R_1} \right)$$

ตัวกำเนิดสัญญาณ ทางฝั่ง นอน-อินเวอร์สตั้งเอาต์พุทเข้ากับเข้าอินเวอร์สตั้ง 180 องศา (สังเกตเครื่องหมายบวกและลบ) ตัวกำเนิดสัญญาณทางฝั่งนอน-อินเวอร์สตั้ง ผ่านความต้านทานและ เกิดโวลเตจดิไวดเซอร์ ซึ่งทำให้เกิด Voltage ที่เข้าอินเวอร์สตั้งเท่ากับ

$$V_{ini} = -\frac{V_T}{2} \left(\frac{R_f}{R_f + R_1} \right)$$

สัญญาณนี้ เมื่อผ่านออฟแอมจะ เกิดเอาต์พุท

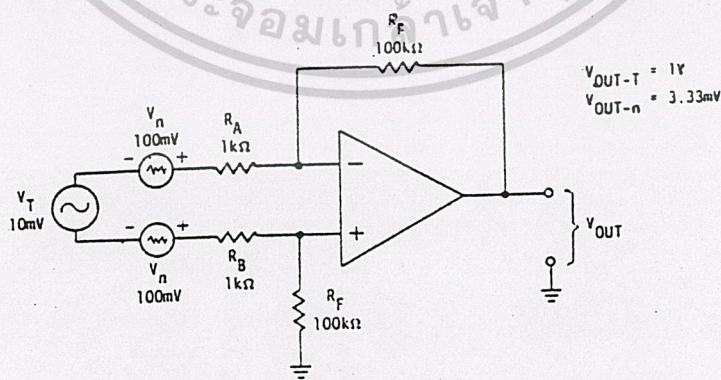
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 23 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 V_{oni} &= \frac{-V_T (R_f)}{2 R_f + R_1} (R_f + R_1) \\
 &= \frac{-V_T (R_f)}{2 R_f + R_1} (R_f + R_1) \\
 &= \frac{-V_T (R_f)}{2 R_1}
 \end{aligned}$$

รวมสัญญาณทั้งสอง $V_o = V_{oi} - V_{oni}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{-V_T (R_f)}{2 R_1} - \frac{V_T (R_f)}{2 R_1} \\
 &= \frac{-V_T (R_f)}{R_1} \dots \dots \dots (2.22)
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าสมการ (2.22) ก็คือ สมการของวงจรขยายแบบอินเวอร์สตั้งนั่นเอง แต่ให้
 นอยซ์ต่ำมากและเนื่องจาก Internal component matching ทำให้เกิดความต่างกัน
 เล็กน้อยระหว่างสัญญาณที่เข้าบวกและลบของออปแอมป์ ซึ่งความแตกต่างนี้หากได้โดยการใช้
 อัตราส่วนการบั่นทอนเมื่อโหมดร่วม CMRR (Common mode rejection ratio) สำหรับ
 ออปแอมป์เบอร์ 741 เท่ากับ 70 dB หรือ 3000 ซึ่งหมายความว่าถ้าสัญญาณที่เหมือน
 กัน (คอมมอนโหมด) ที่อินพุตทั้งสองของออปแอมป์ เอาท์พุทจะถูกบั่นทอนด้วยเฟคเตอร์
 3,000 (ถ้าเป็น ideal op-amp เฟคเตอร์ = เอาท์พุท = 0) ตัวอย่างดังวงจรรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Practical Instrumentation Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าอินพุต = 10 mV เอาท์พุทจะเป็น

$$V_{out} = \frac{10 \text{ mV}(-100K)}{1K}$$

$$= -1V$$

สำหรับสัญญาณออกนอยซ์

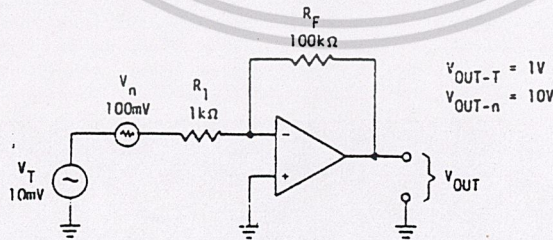
$$V_{No} = \frac{100\text{mV}(100K)}{1K}$$

$$= 3.33 \text{ mV}$$

จะเห็นว่าสำหรับ Non-ideal op-amp เราสามารถลดสัญญาณนอยซ์ที่ไม่ต้องการได้ แม้ว่าระดับของนอยซ์จะสูงกว่าสัญญาณอินพุตก็ตาม แต่ถ้านำสัญญาณเข้าอย่างเดียวกันนี้ไปต่อกับ Unbalance Amp ดังรูปที่ 2.17 จะ ได้สัญญาณเอาท์พุท

$$V_{out} = \frac{10 \text{ mV}(-100k)}{1k}$$

$$= 1V$$



รูปที่ 2.17 Single Ended Amplifier

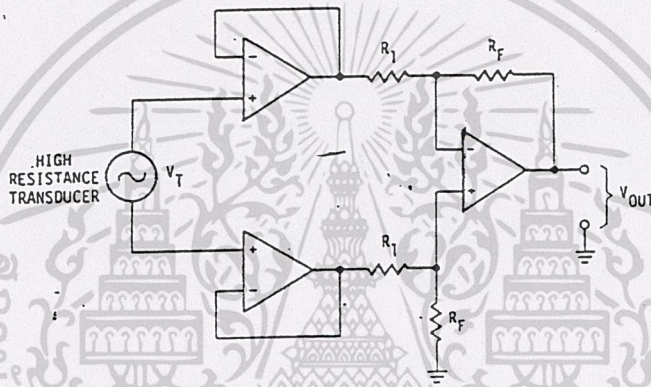
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 25 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสัญญาณออกน้อยซี

$$V_{no} = \frac{100\text{mV}(-100\text{k})}{1\text{K}} = 10\text{V}$$

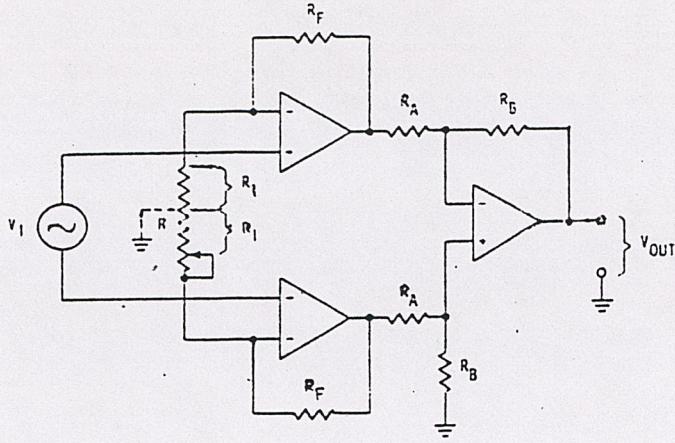
จะเห็นว่าเอาต์พุตของน้อยซีมากกว่าสัญญาณออก 10 เท่า

ถ้าตัวทรานสดิวเซอร์มีความต้านทานภายในสูงจะทำให้เกิดการ drop ที่เอาต์พุตของตัวทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากความต้าน R_1 และ R_f เป็นโวลต์อยู่ เพื่อขจัดปัญหานี้จึงวางจรดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 High Input Resistance Balanced Circuit

วงจรรูปที่ 2.18 มีความต้านทานสูงมาก ดังนั้นจะสามารถใช้โวลต์เตจจากตัวทรานสดิวเซอร์ได้อย่างเต็มที่ อัตราขยายโวลต์เตจเท่ากับ $-R_f/R_1$ ถ้าต้องการเปลี่ยนเกนขยายก็ต้องเปลี่ยน R_1 ทั้งสองตัวหรือ R_f ทั้งสองตัวดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 Variable Gain Balanced Input

จากวงจรรูปที่ 2.19 จะเกิด virtual ground ที่จุดกึ่งกลางของ R ซึ่งจะแบ่งความต้านทานออกเป็น 2 ส่วน เท่ากัน R1 ถ้าแตก VT ออกเป็น 2 ส่วน เหมือนตอนแรกเราสามารถหาเกนขยายรวมได้เป็น

$$A_v = \frac{(R_F + 1)(-R_B)}{R_1 R_A} \dots \dots \dots (2.23)$$

ตัวอย่างการคำนวณเป็นดังนี้ ให้ $R_A = 1K$
 $R_B = 50K$
 $R_F = 100K$
 $R = 5K$ potentiometer

แทนค่าใน (2.23) ได้ $A_v = \frac{(100K+1)(-50K)}{5K \cdot 1K}$
 $= \frac{(201)(-50)}{5}$
 $= -10,050$

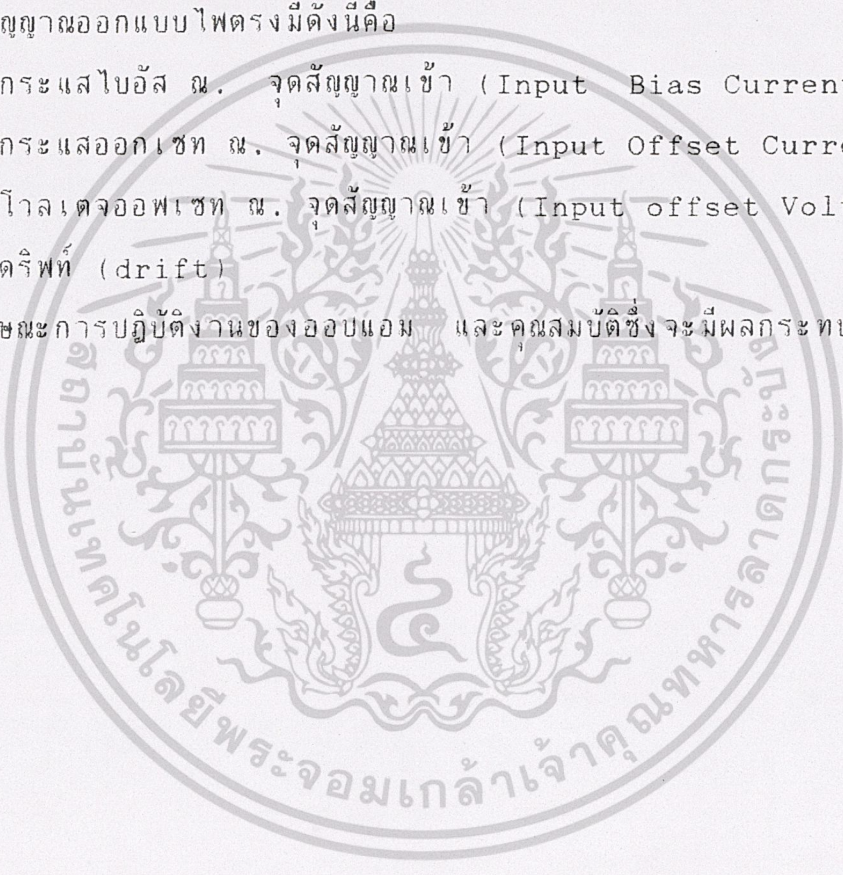
ไบอัส, ออฟเซต และดริฟท์ (drift)

ออปแอมเป็นที่นิยมใช้กันมากในการขยายสัญญาณ ทั้งไฟสลับและไฟตรง หรือแม้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 27
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่มีสัญญาณทั้งสองประเภทผสมกัน ในการปฏิบัติงานเป็นวงจรขยายสัญญาณไฟตรง จะปรากฏว่าคุณสมบัติบางอย่างของออปแอมป์จะทำให้สัญญาณออกมีความคลาดเคลื่อนไปมาก สัญญาณโวลเตจเอาต์พุตในอุดมคติควรจะเท่ากับสัญญาณโวลเตจอินพุตคูณด้วยค่าขยายสัญญาณแบบลูปปิดของวงจร แต่ออปแอมป์ในทางปฏิบัติจะมีความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณออกจริงและสัญญาณออกในอุดมคติ ถ้าระดับสัญญาณออกมีค่าสูง เมื่อเทียบกับระดับสัญญาณคลาดเคลื่อน เราก็อาจจะไม่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ได้ แต่ถ้าสัญญาณคลาดเคลื่อนและสัญญาณออกที่แท้จริงมีระดับใกล้เคียงกัน เราก็ต้องพยายามลดระดับสัญญาณคลาดเคลื่อนให้มีค่าต่ำที่สุด คุณสมบัติของออปแอมป์ซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสำหรับสัญญาณออกแบบไฟตรงมีดังนี้คือ

- ก. กระแสไบอัส ณ. จุดสัญญาณเข้า (Input Bias Current)
- ข. กระแสออฟเซต ณ. จุดสัญญาณเข้า (Input Offset Current)
- ค. โวลเตจออฟเซต ณ. จุดสัญญาณเข้า (Input offset Voltage)
- ง. ดริฟท์ (drift)

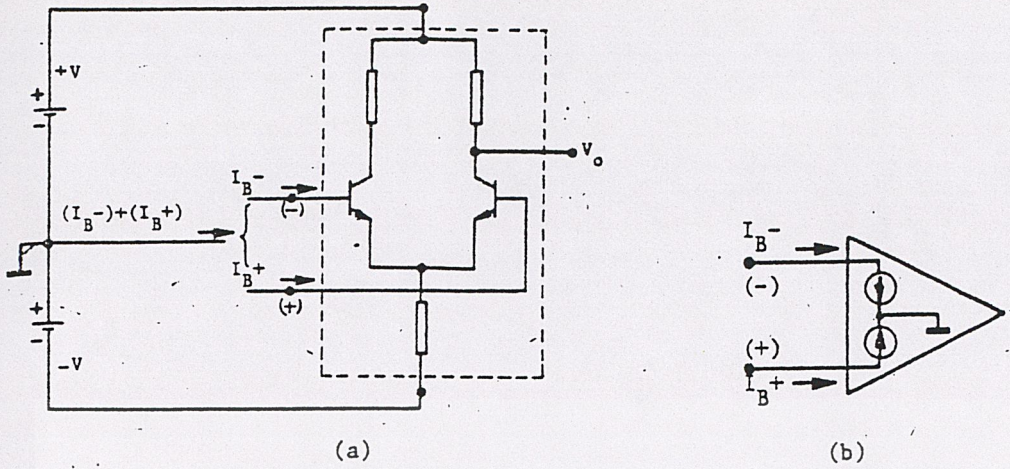
ตารางแสดงลักษณะการปฏิบัติงานของออปแอมป์ และคุณสมบัติซึ่งจะมีผลกระทบต่อ
การปฏิบัติงาน



คุณสมบัติของออบแอมซึ่ง อาจจะมีผลต่อการปฏิบัติงาน	ลักษณะปฏิบัติงานของออบแอม			
	ขยายโวลเตจไฟตรง		ขยายโวลเตจไฟสลับ	
	สัญญาณ ระดับต่ำ	สัญญาณ ระดับสูง	สัญญาณ ระดับต่ำ	สัญญาณ ระดับสูง
1. กระแสไบอัสจุดสัญญาณเข้า	ได้	ได้	ไม่	ไม่
2. กระแสออฟเซต	ได้	ได้	ไม่	ไม่
3. โวลเตจออฟเซตจุดสัญญาณเข้า	ได้	ได้	ไม่	ไม่
4. ดริฟท์	ได้	ไม่	ไม่	ไม่
5. การตอบสนองต่อความถี่	ไม่	ไม่	ได้	ได้
6. อัตราสลับ	ไม่	ได้	ไม่	ได้

ก. กระแสไบอัส ณ จุดสัญญาณเข้า

ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวในออบแอม จะต้องได้รับการไบอัสอย่างถูกต้องก่อนที่จะปฏิบัติงานได้ นั่นคือทรานซิสเตอร์จะต้องมีค่ากระแสเบส และกระแสคอลเลคเตอร์ที่ถูกต้อง และโวลเตจระหว่างจุดเบส และอิมิตเตอร์จะต้องมีระดับที่ถูกต้องเช่นกัน ในทางอุดมคติ เราได้ถือว่าจุดสัญญาณเข้าของออบแอมไม่ได้ดึงกระแสเลย ในทางปฏิบัติจุดสัญญาณเข้าของออบแอมจะถึงกระแสไบอัส เพื่อไบอัสเบสเล็กน้อย รูปที่ 2.20 (a) แสดงลักษณะของจุดสัญญาณเข้าของออบแอมอย่างง่าย ๆ ในการพิจารณาถึงผลของกระแสไบอัสจุดสัญญาณเข้า เราอาจจะถือได้ว่ากระแสไบอัสทั้งสองเกิดจากวงจรถึงกระแสคงตัว ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับขาสัญญาณเข้าทั้งสอง ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.20 (b)



รูปที่ 2.20 ลักษณะกำเนิดและ โมเดลของกระแสไบอัสจุดสัญญาณเข้า

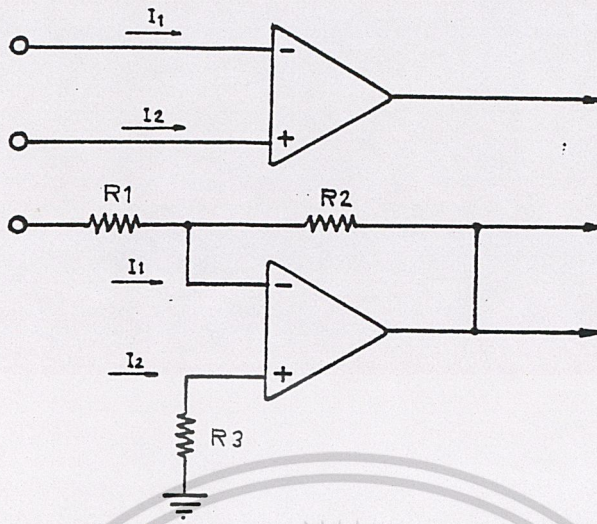
กระแสไบอัสที่เข้าสัญญาณเข้าทั้งสองของออปแอมป์ จะไม่เท่ากันเลยทีเดียว ผู้ผลิตมักจะแจ้งค่าเฉลี่ยของกระแสไบอัสจุดสัญญาณเข้า โดยการบวกค่าสัมบูรณ์ของกระแสทั้งสอง แล้วหารด้วยสอง

กระแสไบอัสมักจะมีค่าประมาณ 1 ไมโครแอมป์ หรือมากกว่าเล็กน้อย สำหรับออปแอมป์คุณภาพต่ำ จนกระทั่งน้อยกว่า 1 พิโคแอมป์ สำหรับออปแอมป์ที่มีเพท อยู่ที่จุดสัญญาณเข้า

ข. กระแสออฟเซตจุดสัญญาณเข้า

กระแสอินพุทออฟเซต คือผลต่างของกระแสอินพุทไบอัสที่ไหลในขั้วอินพุททั้งสองของออปแอมป์ กระแสอินพุทออฟเซตจะเป็นตัวบอกความแม่นยำกันของทรานซิสเตอร์ในภาคขยายสัญญาณความแตกต่าง เมื่อการออกแบบต้องการค่าอิมพีแดนซ์สูง กระแสอินพุทออฟเซตจะมีผลมากกว่าแรงดันอินพุทออฟเซต ถ้าหากกระแสอินพุทไบอัสไม่เท่ากันในอินพุทแต่ละขั้ว แรงดันตกคร่อมความต้านทานอินพุทของแต่ละขั้วย่อมไม่เท่ากันด้วย และถ้าหากค่าความต้านทานอินพุทตั้งกล่าวนั้นมีค่าจะทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ ในสภาวะเช่นนี้เราอาจจะลดผลดังกล่าวได้โดยการต่อความต้านทานเข้าที่ขั้วอินพุท ดังรูปที่ 2.21 แล้วเลือกขนาดที่พอเหมาะค่าที่เลือกได้นั้นจะอยู่ประมาณ $R_3 = R_1 // R_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
30
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 การลดค่ากระแสออฟเซต

ในการออกแบบจริง ๆ ความต้านทานที่มาต่อจะไม่ตรงกับ R_3 นี้ ดังนั้นเราจะต้องปรับ R_3 จนได้ความแตกต่างของแรงดันที่ขาอินพุต นั่นคือแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์

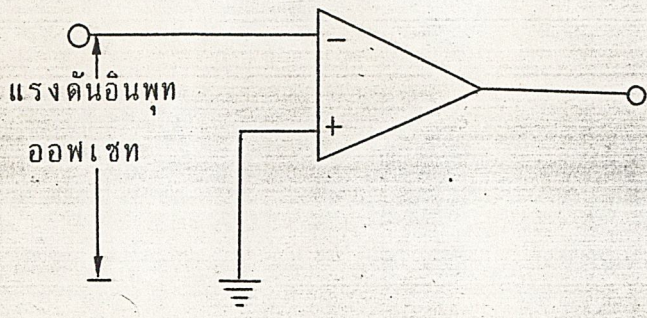
ค. แรงดันอินพุตออฟเซต

แรงดันอินพุตออฟเซต คือแรงดันที่ต้องใส่เข้าไประหว่างขาอินพุตทั้งสอง เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ ดูรูปที่ แรงดันอินพุตออฟเซตจะเป็นตัวกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันทางอินพุตในการแมตซ์ซึ่ง ในภาคขยายสัญญาณความแตกต่าง ถ้าหากแมตซ์จริง ๆ แล้วค่าแรงดันอินพุตออฟเซตจะเป็นศูนย์ โดยปกติขนาดของแรงดันอินพุตออฟเซตอยู่ในย่านไม่เกิน 1 มิลลิโวลต์

ผลของแรงดันอินพุตออฟเซตในการออกแบบคือ สัญญาณอินพุตส่วนหนึ่ง จะต้องไปชนะแรงดันอินพุตออฟเซตก่อนที่จะสร้างสัญญาณเอาต์พุตขึ้น เช่น ถ้าไอซีมีแรงดันอินพุตออฟเซตเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ แล้วใส่สัญญาณค่า 1 มิลลิโวลต์ แน่แน่นอนจะไม่มีสัญญาณเอาต์พุตเกิดขึ้นเลย แต่ถ้าสัญญาณเข้าไป 2 มิลลิโวลต์ เอาต์พุตจะออกแต่เฉพาะแฉะแฉะของสัญญาณเท่านั้น แรงดันอินพุตออฟเซตจะถูกเพิ่มด้วยอัตราขยาย ในสภาวะลูปปิด, ผลของแรงดันอินพุตออฟเซตจะถูกเพิ่มขึ้นด้วยอัตราส่วนของความต้านทานบ่อนกลับต่อความต้านทานอินพุตบวกกับหนึ่ง เช่น อัตราส่วน 100 ต่อ 1 ผลของแรงดันอินพุตออฟเซตจะเป็น 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แรงดันอินพุทออฟเซต

ผลของแรงดันอินพุทออฟเซตจะถูกลดลง โดยการลดกระแสอินพุทออฟเซต ดังรูปที่ 2.22 นอกจากนี้การลดผลของแรงดันอินพุทออฟเซต นิยมทำกันคือใช้วงจรสำหรับนัลล์ (Null) ผลของแรงดันอินพุทออฟเซต ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต

ง. คริปท์

การนัลล์เพื่อลดผลของแรงดันอินพุทออฟเซตจะได้ผลดีที่สุดเฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนค่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปผลของแรงดันออฟเซตอาจจะไม่เท่ากับศูนย์ก็ได้ นอกจากนี้ทั้งกระแสอินพุทออฟเซต และแรงดันออฟเซตจะเปลี่ยนไปตามเวลาใช้งานของวงจร ทั้งนี้เพราะว่าค่าส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจร รวมทั้งส่วนประกอบภายในวงจรออปแอมจะเปลี่ยนค่าไป เมื่อแรงดันไฟจ่ายเปลี่ยนไป กระแสไบอัสและกระแสออฟเซตก็จะเปลี่ยนไปด้วย ถ้าใช้แหล่งจ่ายไฟซึ่งมีการควบคุมระดับแรงดันไฟจ่ายที่ดี ปัญหาประการหลังอาจไม่เกิดขึ้น แต่การลดปัญหาอันเนื่องมาจากอุณหภูมิจะทำได้เพียง 2 วิธีเท่านั้นคือ วิธีแรกรักษาอุณหภูมิของกัมมิแวลลุ่มให้คงที่และวิธีที่สองเลือกออปแอมซึ่งได้รับการออกแบบเพื่อว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันออฟเซตเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิน้อยมาก

การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันออฟเซต อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเรียกว่าเป็น ปรากฏการณ์คริปท์ สำหรับกระแสออฟเซต คริปท์มีหน่วย

เป็นนาโนแอมป์ / $^{\circ}\text{C}$ ส่วนดริฟต์ของแรงดันออฟเซตจะมีหน่วยเป็นไมโครโวลต์/ $^{\circ}\text{C}$ อัตราดริฟต์อาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและยังอาจจะกลับทิศทางได้ด้วย เช่น ที่จุดอุณหภูมิค่าแรงดันออฟเซตอาจจะดริฟต์ในอัตรา $+20$ ไมโครโวลต์/ $^{\circ}\text{C}$ แต่ที่อุณหภูมิสูงอัตราดริฟต์อาจจะเปลี่ยนเป็น -10 ไมโครโวลต์/ $^{\circ}\text{C}$ โดยทั่วไปผู้ผลิตจะแจ้งค่าดริฟต์เฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิตั้งสอง

2.2.3 ภาคแสดงผลเชิงเลข (Digital display)

ภาคแสดงผลเชิงเลขจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอก ที่ได้ออกมาจากภาคปรับสัญญาณให้เป็นสัญญาณเชิงเลข เพื่อแสดงค่าหน้าหนึ่งของวัตถุที่นำมาซึ่งออกมาเป็นตัวเลขโดยตรง ภาคแสดงผลเชิงเลขแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงเลข (Analog to Digital Converter) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า วงจรแปลงเอชดี และวงจรแสดงผล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

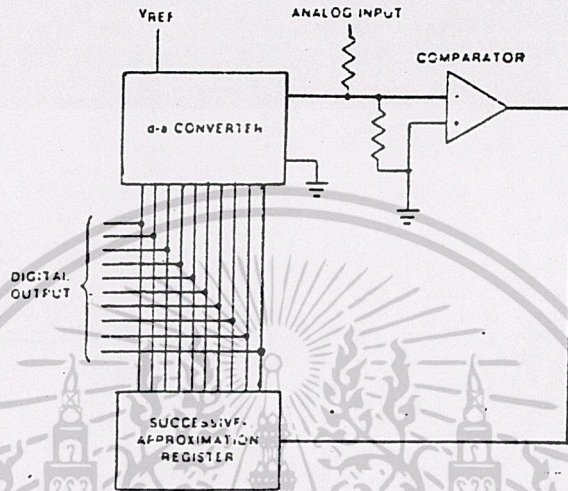
ก. วงจรแปลงเอชดี เป็นส่วนที่จะแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณเชิงเลขที่บ่งขนาดของแรงดันไฟนั้น วงจรแปลงเอชดีมีหลายชนิด ตั้งแต่แบบใช้กลไก จนกระทั่งถึงแบบวงจรรีเลคทรอนิกส์ต่าง ๆ สามารถแบ่งออกง่าย ๆ ได้สองประเภทคือ ประเภทที่ไม่มีการอินทิเกรต (Non-integrating type) กับประเภทที่มีการอินทิเกรต (Integrating type)

1. ประเภทไม่มีการอินทิเกรต จะใช้การเปรียบเทียบแรงดันไฟกับแรงดันไฟมาตรฐานชนิดต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น โดยแรงดันไฟมาตรฐานเหล่านี้ได้มาจากสัญญาณเชิงเลข หรือสามารถแปลงเป็นสัญญาณเชิงเลขได้ง่าย ตัวอย่างของวงจรประเภทนี้ได้แก่ Parallel comparator type, Counter-type และ Successive approximation type เป็นต้น วงจรประเภทนี้สามารถแปลงแรงดันไฟเป็นสัญญาณเชิงเลขได้รวดเร็ว

แต่มีจุดอ่อนตรงค่าที่วัดได้เป็นค่าแรงดันไฟจุดใดจุดหนึ่ง (Instantaneous value) ไม่ได้วัดค่าเฉลี่ยในรอบ 1 คาบเวลาของสัญญาณนั้น ดังนั้นค่าที่วัดได้จึงมักจะแปรเปลี่ยนไปตามเวลาเสมอ รูปที่ 2.23 จะแสดงในโครงสร้างของวงจรแปลงเอชดีแบบ Successive approximation type ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญคือ วงจรแปลงสัญญาณเชิงเลขเป็นสัญญาณอนาลอก (Digital to analog converter) หรือวงจรแปลงดีทูเอ (D/A Converter) และ Successive approximation register (SAR) แรงดันไฟที่ออกจากวงจรแปลงดีทูเอจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอนาลอกหรือแรงดันไฟ โดยการเปรียบเทียบทีละบิต (Bit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

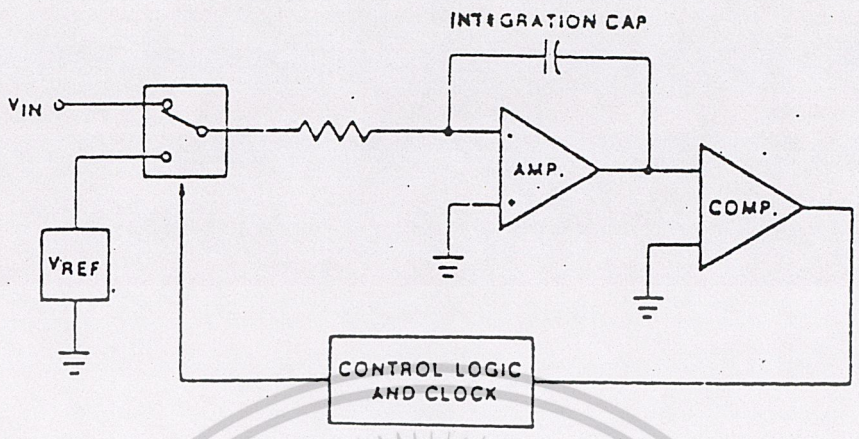
เริ่มจากบิตที่มีค่านัยสำคัญมากที่สุด (MSB) ไปสู่บิต ที่มีค่านัยสำคัญน้อยที่สุด (LSB) บิตที่จะเปรียบเทียบจะถูกเซตค่าเป็น "1" ถ้าแรงดันไฟจากวงจรแปลงดีทูเอมีค่ามากกว่าแรงดันไฟเข้า บิตนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็น "0" แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าจะคงค่าบิตนั้นเป็น "1" จากนั้น SAR จะเลื่อนไปเปรียบเทียบบิตต่อไป เมื่อเสร็จการแปลงในแต่ละรอบ สัญญาณเชิง เลขจะถูกส่ง ไปยังวงจรแสดงผล



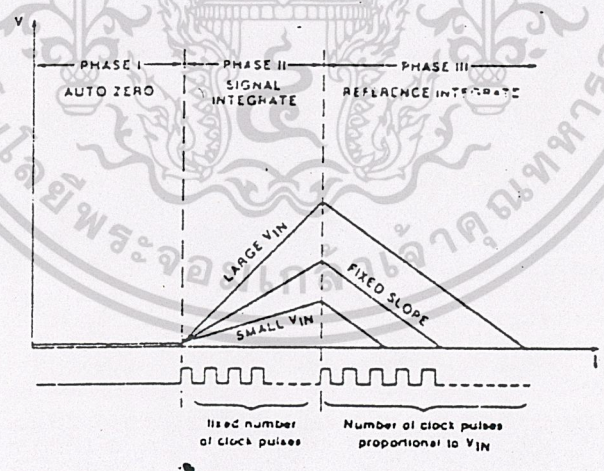
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของวงจรแปลงเอทิตแบบ Successive approximation type

2. ประเภทที่มีการอินทิเกรต จะทำการอินทิเกรต หรือ

เฉลี่ยขนาดของแรงดันไฟ จึงทำให้ค่าที่วัดได้แม่นยำ และมีเสถียรภาพดี ไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนอื่น ๆ วงจรประเภทนี้ได้แก่ V to F Converter, Pulse width modulation type และ Dual slope type เป็นต้น ดังในรูปที่ 2.24 จะแสดงโครงสร้างของวงจรแปลงแบบ Dual slope type วงจรชนิดนี้นิยมใช้กันมากเพราะราคาถูกและให้ความแม่นยำสูง การทำงานของวงจรแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง



รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงแบบ Dual slope type



รูปที่ 2.25 แสดงช่วงเวลาการทำงานของวงจรแปลงแบบ Dual slope type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 35
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงที่ 1 การปรับศูนย์ (Auto Zero) ขั้วสัญญาณขาเข้าของวงจรมินิอินทิเกรตจะถูกต่อลงกราวด์ ค่าแรงดันออฟเซตของอุปกรณ์ต่าง ๆ จะถูกเก็บไว้ในตัวเก็บประจุ

ช่วงที่ 2 อินทิเกรตสัญญาณ (Signal Integrate) ขั้วสัญญาณขาเข้าของวงจรมินิอินทิเกรตจะต่อกับแรงดันไฟเข้า และอินทิเกรตด้วยเวลาคงที่ ซึ่งจะกำหนดด้วยจำนวนพัลส์นาฬิกา ความชันของการอินทิเกรตจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟเข้า ดังรูปที่ 2.25

ช่วงที่ 3 อินทิเกรตแรงดันอ้างอิง (Reference Integrate) ขั้วสัญญาณขาเข้าของวงจรมินิอินทิเกรตจะต่อเข้ากับแรงดันอ้างอิง และอินทิเกรตด้วยความชันคงที่จนกระทั่งแรงดันออกของวงจรมินิอินทิเกรตเป็นศูนย์ จำนวนพัลส์นาฬิกาที่นับได้ ในช่วงนี้จะเป็นค่าเชิงเลขของแรงดันเข้า

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีการอินทิเกรต จะมีความเหมาะสมในการทำเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า เพราะเป็นการเฉลี่ยขนาดของสัญญาณที่จะวัด ค่าที่ได้จึงแม่นยำ และในการชั่งน้ำหนักก็ไม่ต้องการเวลาในการแปลงเร็วนัก

ข. วงจรแสดงผล

สัญญาณเชิงเลขที่ได้จากวงจรแปลงแอนะล็อกจะอยู่ในรูปของรหัส เช่น รหัสเลขไบนารี (Binary code) รหัสบีซีดี (BCD-Binary code decimal) ซึ่งรหัสนี้ยากต่อการอ่านค่าออกมาโดยตรง จำเป็นจะต้องแปลงเป็นรหัสเจ็ดเซกต์ (7-Segment code) เพื่อขับแผงแสดงผลเป็นตัวเลขให้สามารถอ่านได้โดยง่าย แผงแสดงผลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายแบบ เช่น แผงแสดงผลแบบฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent display) แผงแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD) และแผงแสดงผลแบบแอลอีดี (LED) เป็นต้น

บทที่ 3

การออกแบบสร้างและทดสอบอินดิเคเตอร์

3.1 ข้อกำหนดในการออกแบบอินดิเคเตอร์

ในการออกแบบเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ ได้พยายามจะให้เป็นไปตามพระราชบัญญัติมาตราซึ่งต่างวัด กรมทะเบียนการค้า กระทรวงพาณิชย์ ซึ่งรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก. สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ จัดอยู่ในเครื่องชั่งชนิดที่ 5 คือ เครื่องชั่งอัตโนมัติ (automatic) และจากข้อบังคับสำหรับเครื่องชั่ง ข้อ 88 จะต้องทดสอบตามข้อบังคับของเครื่องชั่งชนิดที่ 6 ซึ่งกำหนดอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อยและอัตราความรู้สึกไว้ดังนี้

"ที่น้ำหนักเต็มพิกัดกำลังเครื่อง อนุญาต 1/500 ของน้ำหนักนั้น"

ซึ่งแปลเป็นความหมายง่าย ๆ ว่า ความแม่นยำในการวัดของเครื่องชั่งชนิดนี้เท่ากับ $\pm 20\%$ ของค่าน้ำหนักเต็มพิกัด ซึ่งในที่นี้ออกแบบชั่งได้สูงสุด 10 กิโลกรัม จะผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 20 กรัม

เพื่อให้จะได้เครื่องชั่งที่ชั่งแล้วมี ความผิดพลาดไม่เกิน ± 20 กรัม ดังนั้นการออกแบบอินดิเคเตอร์ จะต้องมียุทธศาสตร์ดังนี้

1. ความไม่เป็นเชิงเส้น ต่ำกว่า $\pm 0.20\%$ ของค่าน้ำหนักเต็มพิกัด
2. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ต่ำกว่า $+ 200$ ppm/ $^{\circ}$ C
3. แสดงผลค่าน้ำหนัก เต็มพิกัด 10 กิโลกรัม ด้วยตัวเลขแบบ 7 Segment จำนวน 3 1/2 หลัก หน่วยเป็นกิโลกรัม
4. สามารถชั่งน้ำหนักได้ 5 กก. (ที่สเกลx1) และ 10 กก. (ที่สเกลx2) โดยมีค่าละเอียดที่สุดอ่านได้ 10 กรัม และ 20 กรัม ตามลำดับ

เพราะฉะนั้นการออกแบบสร้างอินดิเคเตอร์ซึ่งประกอบด้วย ภาคจ่ายไฟบ้อน โหลดเซลล์, วงจรขยายสัญญาณแบบอินสทรูเมนต์ และวงจรแสดงผล จะต้องควบคุมค่าต่าง ๆ ข้างต้นให้อยู่ในพิกัด จึงจะทำให้การชั่งผิดพลาดไม่เกิน ± 20 กรัมได้

3.2 ภาคจ่ายไฟบ้อนโหลดเซลล์

เพื่อให้การชั่งน้ำหนักถูกต้อง แม่นยำ จึงได้กำหนดคุณสมบัติบางประการดังนี้

ก. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำกว่า 200 ppm/ $^{\circ}$ C เพราะถ้าอุณหภูมิ 10° C. จะทำให้ค่าน้ำหนักเปลี่ยน ± 2000 ppm หรือ 0.2 %

ข. ค่าแรงดันริบเบิล (ripple voltage) น้อยกว่า 16.4 มิลลิโวลต์มาก ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะถ้าใช้แรงดัน 8.2 โวลต์ จะทำให้น้ำหนักเปลี่ยนไปมากกว่า 20 กรัม ที่น้ำหนักเต็ม พิกัด 10 กิโลกรัม

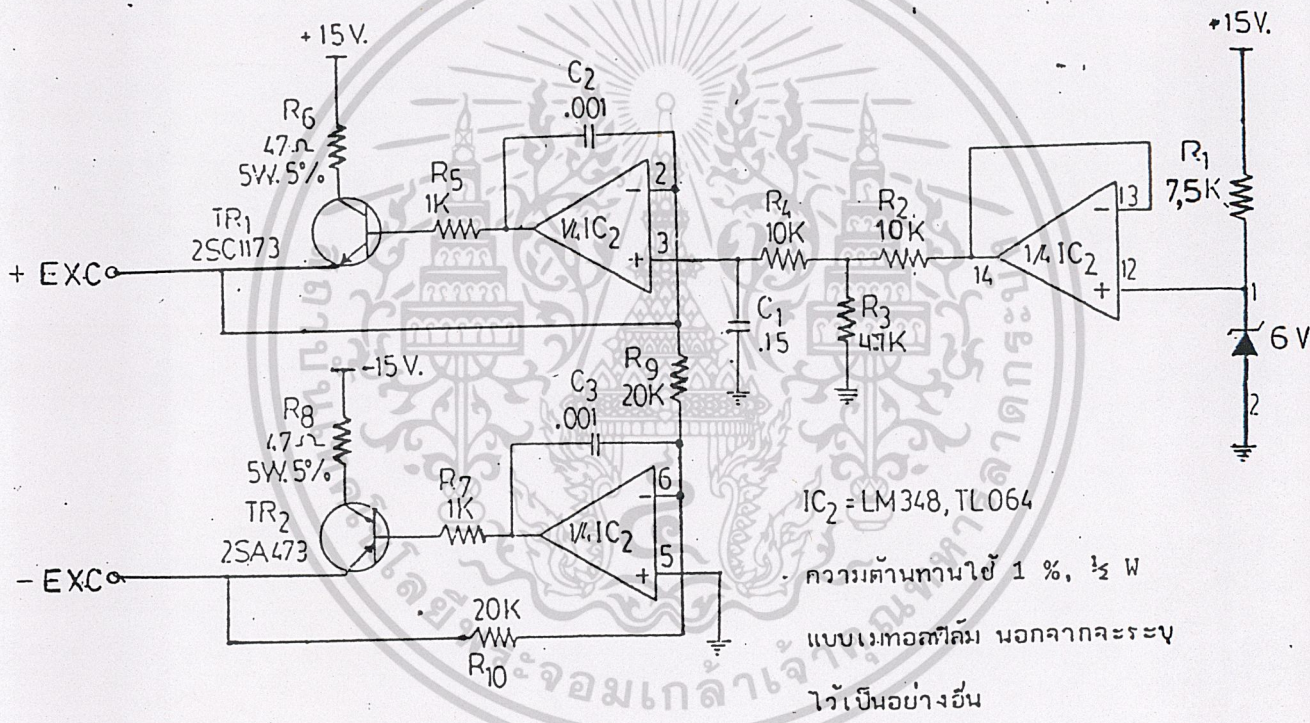
ค. สามารถจ่ายกระแสให้สเตนเกจทั้ง 4 ตัว หรือ 68 มิลลิแอมป์ สำหรับ โหลดเซลล์ชนิด 120 โอห์ม และแรงดัน 8.2 โวลต์

ง. ค่าโหลดเรกกูเลชัน (Load regulation) เมื่อจ่ายกระแสตามข้อ ค. จะ ต้องดีกว่า 0.2 % จึงจะทำให้ค่าน้ำหนักเปลี่ยนไปน้อยกว่า 0.2 %

การออกแบบวงจร

ในการออกแบบวงจรภาคจ่ายไฟ จะต้องพิจารณาถึงค่าแรงดันที่จะจ่ายให้กับ โหลด เซลล์ด้วย เพราะในการใช้งานจะเกิดความร้อนขึ้นในสเตนเกจแบบความต้านทาน ความ ร้อนนี้จะส่งผ่านต่อไปยังชิ้นส่วนรับน้ำหนัก แล้วระบายออกสู่อากาศ ถ้าแรงดันที่ป้อนให้กับ โหลดเซลล์สูงเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนที่สเตนเกจมากจนระบายออกไม่ทัน จะทำให้ สเตนเกจเสียหายได้ แต่ถ้าป้อนแรงดันต่ำเกินไป สัญญาณออกจากโหลดเซลล์จะมีค่าน้อย ทำให้ต้องขยายสัญญาณมากเกินไป จะมีปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายขึ้นมาด้วย ความร้อนที่เกิดขึ้นที่สเตนเกจแต่ละตัวจะคำนวณได้จาก

เมื่อ	P_g	= ความร้อนที่เกิดขึ้นในสเตนเกจ (มิลลิวัตต์/ตร.มม.)
	V	= แรงดันป้อน โหลดเซลล์
	R	= ความต้านทานของสเตนเกจ
	A_g	= พื้นที่กริด (Grid Area) ของสเตนเกจ



รูปที่ 3.1 วงจรของภาคจ่ายไฟบัสโวลต์เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางของสเตรนเกจในบทที่ 4 ใช้แรงดัน 8.2 โวลต์ วงจรภาคจ่ายไฟจะเป็นดังรูปที่ 3.1 รายละเอียดในการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

ความต้านทาน R_1 จะกำหนดกระแสทำงานประมาณ 1 มิลลิแอมป์ แรงดันอ้างอิงประมาณ 6 โวลต์ จะผ่านออปแอมป์บัฟเฟอร์ไปยังวงจรแบ่งแรงดัน R_2 และ R_3 ลดลงเหลือ 4.2 โวลต์ สัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงกว่า 110 เฮิรท์ จะถูกกรองโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านซึ่งประกอบด้วย R_4 และ C_1 เนื่องจากจะต้องจ่ายกระแสให้แก่สเตรนเกจได้ถึง 4 ตัว จึงให้ออปแอมป์ไปขับทรานซิสเตอร์ TR_1 เพื่อให้จ่ายกระแสได้มากและป้องกันกลับจากขา E มายังขาอินพุทของออปแอมป์ อัตราขยาย +1 ทำให้ได้แรงดัน +4.2 โวลต์ แรงดัน +15 โวลต์ จะป้อนให้ขา C ของ TR_1 ผ่าน R_6 ซึ่งจะจำกัดกระแสในกรณีที่เกิดลัดวงจรที่ +EXT ไม่ให้เกิน 300 mA แรงดัน +4.2 โวลต์จะผ่าน R_9 ไปเข้าขาอินพุทของออปแอมป์ที่จัดวงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณ ทำให้ได้แรงดันออก = -EXT = -4.2 เทียบกับกราวด์ ซึ่งการจ่ายเป็นแรงดันคู่อย่างนี้มีข้อดีคือ สัญญาณออกของโพลเซลล์จะมีระดับใกล้เคียงกับกราวด์ เมื่อนำไปขยายโดยวงจรที่มีขั้วสัญญาณเข้าแบบขยายผลต่าง จะทำให้ลดปัญหาของการขยายแบบคอมมอนโพลด์ไปได้มาก

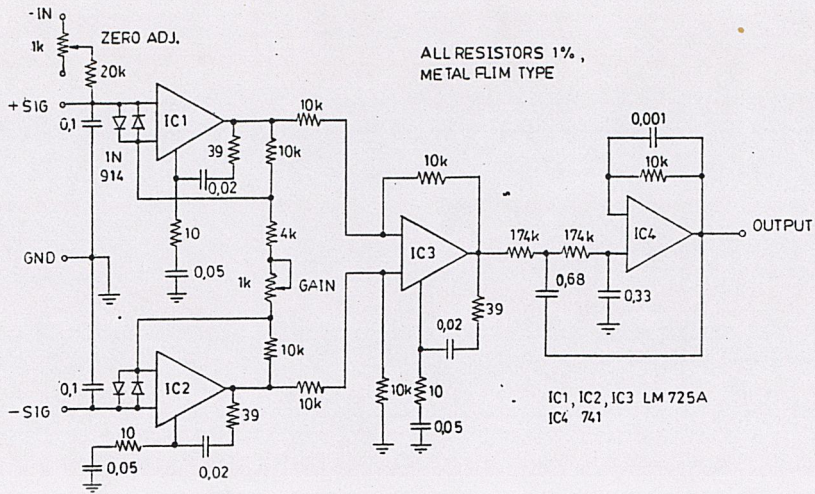
ผลการทดสอบหาค่าจ่ายไฟป้อนโพลเซลล์

ก. หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

ในการทดสอบจะนำเอาวงจรภาคจ่ายไฟป้อนโพลเซลล์ไปแช่ไว้ในตู้เย็นปรับให้ได้อุณหภูมิ 10°C . และเริ่มวัดค่าแรงดัน บ่อยๆ ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเป่าด้วยลมร้อนจนมีอุณหภูมิถึง 60°C แล้ววัดแรงดัน และนำมาคำนวณดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

ข. วัดค่าแรงดันริบเบิล โดยใช้ฮอสซิสโลสโคป สามารถวัดค่าแรงดันริบเบิลได้ประมาณ 8 mV p-p ขณะจ่ายกระแส มิลลิแอมป์ค่าแรงดันริบเบิลที่วัดได้ต่ำกว่า 1 mV p-p ตามที่กำหนด



รูปที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์เซ็น พร้อมวงจรถองความถี่

- ค. ทดสอบความเสถียรในการจ่ายกระแส ให้ความต้านทาน 120 โอห์ม 1 วัตต์ ต่อเป็นโหลด วัดกระแสได้ 68 มิลลิแอมป์ ตามที่กำหนด
- ง. หาค่าโหลดเกกูเรชั่น ขณะยังไม่จ่ายกระแสวัดได้ 8.40 โวลต์ เมื่อจ่ายกระแสแล้ววัดได้ 8.39 โวลต์ ดังนั้น โหลดเรกูเรชั่น ค่าโหลดเรกูเรชั่นต่ำกว่า 0.2 %

3.3 วงจรขยายสัญญาณ

คุณสมบัติที่ต้องการ

- ก. ความต้านทานของขาสัญญาณเข้าสูง (High Input Impedance) เพื่อสามารถวัดแรงดันที่แท้จริงของ load cell ได้ สามารถปรับเกด (gain) การขยายได้ เพื่อสะดวกในการเปลี่ยนหน่วยวัด
- ข. มีค่าความไม่เป็นเชิงเส้นต่ำกว่า 0.2 %
- ค. มีฟังก์ชันปรับศูนย์ สำหรับปรับค่าน้ำหนักบนหน้าบดก่อนซึ่งเป็นศูนย์
- ง. ส.บ.ส. อุณหภูมิของแรงดันอินพุตออฟเซต (Input Voltage drift) ต่ำเพื่อว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตเนื่องจากออฟเซตน้อยหรือ 16 ppm/°c
- จ. จะมีค่า Common mode rejection ratio สูง เพื่อการกำจัดสัญญาณรบกวนที่คอมมอนโหมด (จากหัวข้อ 2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น. มิวจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

จากข้อกำหนดดังกล่าวและคุณสมบัติของ IC LM725 ดังแสดงในภาคผนวก ข. จึงได้ถูกเลือกเพราะ เป็นไอซีที่มีคุณสมบัติตามความต้องการและหาง่ายในประเทศ ดังนั้นวงจรที่ได้รับการออกแบบจะเป็นดังรูปที่ 3.2

3.4 วงจrabแปลงเอทดีและแสดงผล

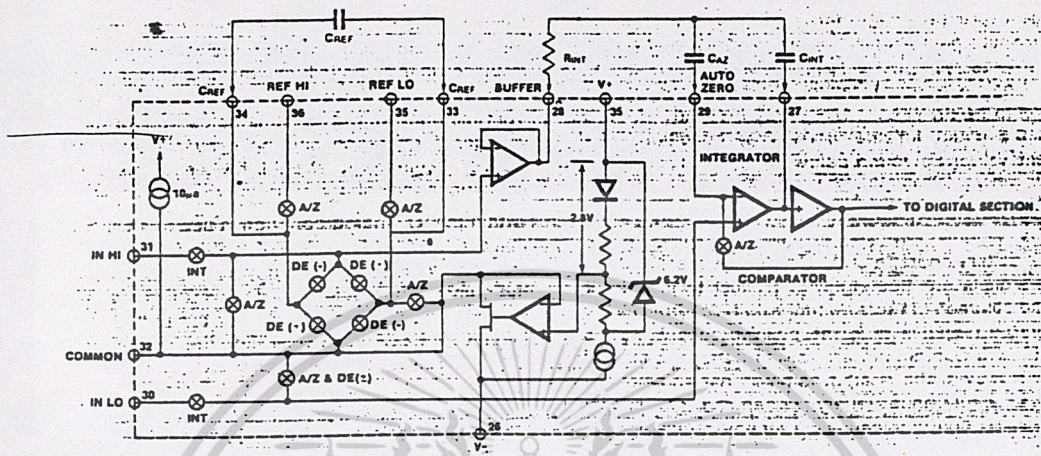
ได้ออกแบบใช้ไอซีเบอร์ ICL7107 เป็นไอซีดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ที่ได้เปรียบเบอร์อื่น ๆ อยู่มาก ซึ่งข้อดีเด่นพอจะสรุปได้ดังนี้

1. อุปกรณ์แอคทีฟที่จำเป็นทั้งหมดในการทำดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ถูกบรรจุไปในไอซีเบอร์นี้เพียงตัวเดียว
2. เป็นไอซีชนิด CMOS จึงดึงกระแสต่ำมาก คือน้อยกว่า 1.8 mA (ไม่นับกระแสที่ LED ดึง)
3. แสดงค่าแรงดันออกมาได้ 3 1/2 หลัก (เลข 1/2 หมายความว่าหลักทางซ้ายมือสุดเป็นได้แค่เลข 1)
4. เอาท์พุทจาก 7107 สามารถป้อนเข้าแผงแสดงตัวเลขแบบ LED ได้โดยตรง
5. มีความแม่นยำสูง คือผิดพลาดไม่เกิน 1% ของตัวเลขหลักสุดท้าย และมีเสถียรภาพในการทำงานดีเยี่ยม
6. ปรับศูนย์เองโดยอัตโนมัติ เช่น ถ้าแรงดันอินพุทเป็น เอาท์พุทก็จะอ่านค่าได้ 000.0 โวลท์จริง
7. ดึงกระแสจากอินพุทน้อยกว่า 10 pA
8. มีเครื่องหมายบอกขั้วเลขลบของแรงดันที่วัดได้บนแผงแสดง ได้อัตโนมัติ การวัดจึงไม่ต้องพะวงเรื่องขั้วของสายวัด
9. แรงดันอินพุท และแรงดันมาตรฐานสำหรับบางจรเป็นแบบลอยได้ ไม่จำเป็นต้องมีขั้วหนึ่งลงกราวด์ จึงทำให้ใช้งานได้กว้างขวางมาก เช่น วัดแรงดัน แบบดิฟเฟอเรนเชียลได้
10. วัดแรงดันอินพุทได้เต็มสเกล 199.9 mV หรือ 1.999 V ได้แล้วแต่การปรับ

หลักการทํางานของ 7107

ICL7107 ใช้หลักการที่เรียกว่า "ดูอัลสโลปอินทิเกรชัน" (dual slope integration) ซึ่งเป็นเทคนิคในการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลที่นิยมที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ⁴²ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะนี้ ภายใน ICL7107 แบ่งออกได้เป็น 3 ภาคใหญ่ ๆ คือ ภาคอนาล็อก ภาคสัญญาณนาฬิกา และภาคดิจิทัล
ภาคอนาล็อก



รูปที่ 3.3 พังชั้นการทำงานภายในเฉพาะส่วนอนาล็อกของไอซีเบอร์ ICL7107 และอุปกรณ์ภายนอกที่ต่อเข้ากับส่วนนี้

รูปที่ 3.3 แสดงผังการทำงานในส่วนอนาล็อกภายในไอซีเบอร์ ICL7107 สัญญาณลักษณะวงกลมนี้แล้วมีภาวะขาดภายในนั้นหมายถึง สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะครบวงจรยอมให้กระแสไหลผ่านได้เฉพาะ เมื่ออยู่ในช่วงทำงานตามที่มีตัวอักษรย่อกำกับอยู่ข้าง ๆ วงกลมนั้น ๆ

ในการวัดค่าแรงดันภายนอกแต่ละครั้งวงจรภายในจะทำงาน 3 ช่วง คือ 1. ปรับศูนย์อัตโนมัติ (A/Z) 2. อินทิเกรตสัญญาณ (INT) และ 3. ดีอินทิเกรต (DE) ซึ่งจะอธิบายเรียงตามลำดับ

ช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติ (A/Z) ช่วงนี้จะมีเหตุการณ์เกิดขึ้น 3 อย่าง

1. ขั้วอินพุตทั้งสอง (IN HI และ IN LO) จะถูกตัดออกจากแรงดันที่จะวัด และขั้วอินพุตทั้งสอง ภายในจะถูกลัดวงจรเข้ากับขา COMMON
2. ตัวเก็บประจุ C_{REF} จะถูกประจุให้มีแรงดันเป็น V_{REF} (แรงดัน V_{REF} คือแรงดันที่บ่อนเข้า $+REF$ และ $-REF$)
3. สวิตซ์จะต่อให้มีการบ่อนกลับครบรอบเพื่อประจุ ให้มีแรงดันชดเชยกับผลของ

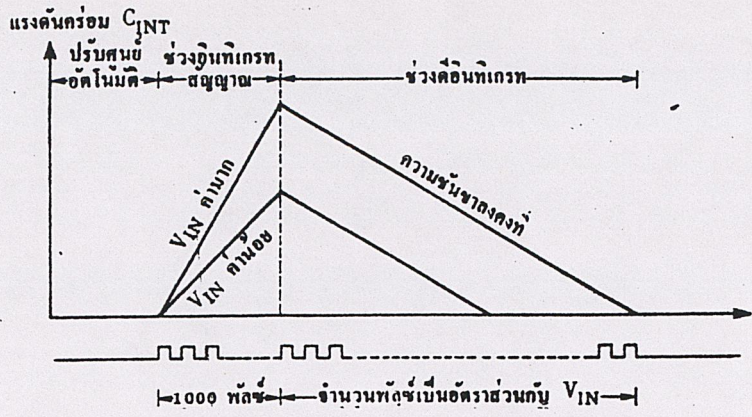
ออฟเซตต่าง ๆ ในภาคบัฟเฟอร์ภาคอินทิเกรตเตอร์ และภาคเปรียบเทียบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พูดง่าย ๆ ว่าก่อนทำการวัดจะลัดวงจรอินพุทภายในลงกราวด์ให้แรงดันอินพุท เป็นศูนย์จริง ๆ แล้วดูผลของแรงดันออฟเซ็ทต่าง ๆ ที่จะทำให้เอาต์พุทคลาดเคลื่อนไป แล้วป้อนกลับเอาคลาดเคลื่อนนี้มาเก็บไว้ในตัวเก็บประจุ C_{AZ} เพื่อสร้างผลหักล้างกับออฟเซ็ทนั้นขณะทำการวัดจริง ๆ

ช่วงอินทิเกรตสัญญาณ (INT) ในช่วงนี้การป้อนกลับจะยุติไปและขั้วอินพุททั้งสอง ถูกต่อเข้ากับขาไอซีเพื่อรับรู้แรงดันอินพุทนอกที่จะทำการวัดขณะนี้วงจรอินทิเกรตเตอร์จะทำงานโดย C_{INT} จะถูกประจุให้มีแรงดันสูงขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับค่า V_{IN} (ซึ่งป้อนเข้าระหว่างขา IN LO และ IN HI) เมื่อถึงระยะเวลาคงที่ค่าหนึ่งซึ่งกำหนดมาจากจำนวนพัลส์ของสัญญาณนาฬิกา (สำหรับดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ขนาด $3\ 1/2$ หลักทั่ว ๆ ไป จะใช้จำนวนพัลส์ 1,000 ลูก) วงจรอินทิเกรตเตอร์ก็จะหยุดทำงาน ดังนั้นขณะนี้วงจรคร่อม C_{INT} จะขึ้นอยู่กับค่า V_{IN} โดยตรง พร้อมกันนั้นก็จะมีรูปร่างของสัญญาณคร่อม C_{INT} ด้ยว่าเป็นบวกหรือลบ

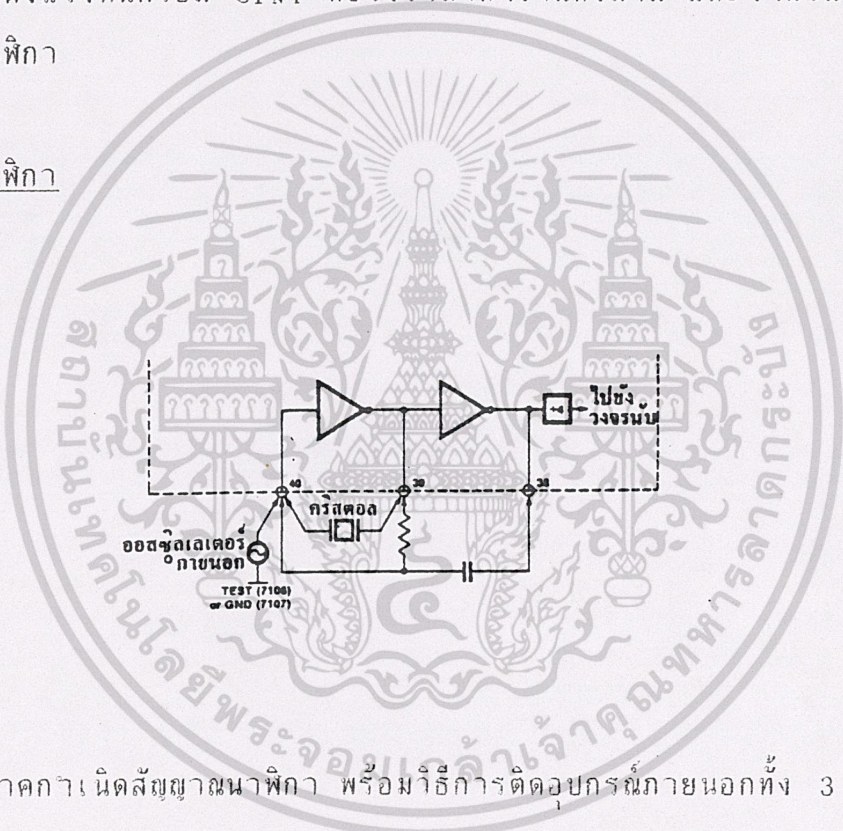
ช่วงดีอินทิเกรต (DE) ช่วงนี้เป็นช่วงสุดท้าย เมื่อเริ่มทำการทำงานขึ้น IN LO จะถูกต่อเข้ากับขั้ว COMMON อย่างภายใน และขา IN HI ก็ถูกนำไปโยงเข้ากับ C_{REF} ภายในตัว วงจรภายในจะจัดทิศทางให้การต่อขั้วให้ถูกต้อง เพื่อให้วงจรรอินทิเกรตเตอร์ทำงานในทิศทางที่จะให้เอาต์พุท (แรงดันคร่อม C_{INT}) ค่อย ๆ ลดลงเป็นศูนย์ เวลาที่ให้เอาต์พุทเป็นศูนย์พอดี (ซึ่งนับจากจำนวนพัลส์ของสัญญาณนาฬิกา) นี้จะเป็นอัตราส่วนกับแรงดันอินพุทสำหรับเบอร์ ICL7107 จำนวนพัลส์ของสัญญาณนาฬิกาที่ได้นี้จะถูกแปลง ไปปรากฏเป็นตัว เลขบนแผงแสดงซึ่งจะอ่านค่าได้เป็น $1,000 V_{IN}/V_{REF}$

ข้อดีของหลักการแบบดวลสโปลอินทิเกรชัน คือไม่ต้องใช้อุปกรณ์ภายนอกที่ตีมากนัก เช่น การเปลี่ยนแปลงค่า C_{REF} C_{INT} และ C_{AZ} ไม่มีผลกับความแม่นยำของวงจร เพราะมันจะปรับศูนย์ตัวเองก่อนทำงานทุกครั้ง และผลที่ได้เป็นอัตราส่วนซึ่งจะหักล้างกันไป ความแม่นยำจริง ๆ ขึ้นกับค่า V_{REF} และ เสถียรภาพของแปลงกำเนิดสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 3.4 แสดงแรงดันคร่อม C_{INT} ที่ช่วงเวลาทำงานทั้งสาม และจำนวนพัลส์ของสัญญาณนาฬิกา

ภาคสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 3.5 ภาคกำเนิดสัญญาณนาฬิกา พร้อมวิธีการต่ออุปกรณ์ภายนอกทั้ง 3 วิธี

รูปที่ 3.5 แสดงการจัดวงจรในภาคสร้างสัญญาณนาฬิกา ICL7107 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเพื่อให้วงจรในภาคนี้มีอยู่ 3 วิธีด้วยกันคือ

1. ต่อตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเข้าที่ขา 38, 39 และ 40 ของไอซีเพื่อให้วงจรออสซิลเลทที่มีความถี่ที่ต้องการ
2. ต่อคริสตอล เข้าระหว่าง 39 และ 40 เพื่อให้ออสซิลเลทที่มีความถี่ที่ต้องการอย่างแม่นยำ หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บ่อนความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์ภายนอกมาเข้าที่ขา 40 และกราวด์ โดยสัญญาณความถี่นี้จะต้องมีขนาดกว้างจาก 5 V และกราวด์

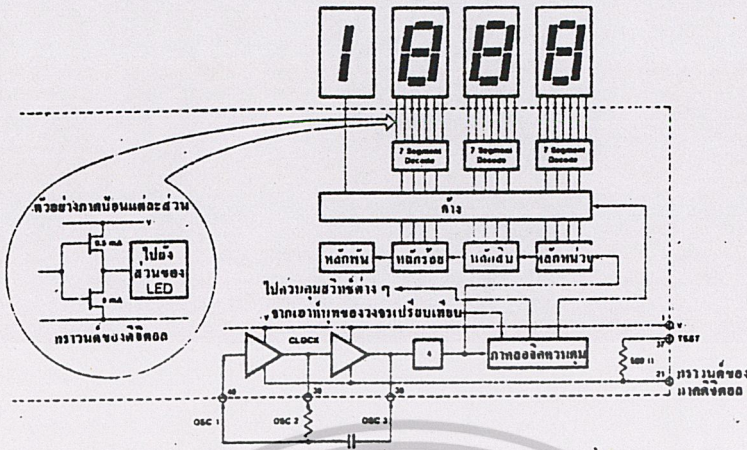
ความถี่ที่ได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งนี้จะถูกหาร 4 แล้วจึงจะไปบ่อนเป็นสัญญาณนาฬิกาให้กับภาคดิจิทัล

วิธีที่ประหยัดที่สุดก็คือวิธีแรก ซึ่งจะสามารถคำนวณหาความถี่ได้ดังนี้ $f = 0.45/RC$ โดยทั่วไปจะใช้ R มีค่าประมาณ 100K

ถ้าต้องการให้วงจรทั้งหมดได้รับการรบกวนจากความถี่ของไฟบ้านน้อยที่สุด ความถี่ของออสซิลเลเตอร์ควรเป็นจำนวนเท่าของ 50 เช่น เป็น 40kHz, 50kHz, 66 2/3 kHz 100kHz และ 200kHz เป็นต้น ถ้าต้องการลดผลจากไฟ 60Hz สำหรับบางประเทศก็ควรใช้ความถี่เป็น 48kHz 60kHz 80kHz 120kHz และ 240kHz เป็นต้น

สัญญาณนาฬิกาที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการสั่งงานให้ภาคอนาล็อก แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง เช่น สมมุติว่าเราให้ภาคกำเนิดสัญญาณนาฬิกาออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่ 48kHz เมื่อผ่านวงจรหาร 4 ก็จะได้เหลือความถี่เป็น 12kHz ซึ่งหมายความว่าใน 1 วินาทีจะมีพัลส์ออกไป 12,000 ลูก จำนวนพัลส์จะกำหนดระยะเวลาการทำงานของแต่ละช่วง ถ้าขนาดสัญญาณอินพุตมีค่าเต็มสเกลที่กำหนดไว้พอดี จำนวนพัลส์ 1,000 ลูก จะกำหนดเวลาช่วงอินทิเกรตอีก 2,000 ลูก จะถูกใช้ให้ตี อินทิเกรตสัญญาณลงเป็นศูนย์โวลต์ และอีก 1,000 ลูก จะใช้ในการปรับค่าศูนย์อัตโนมัติ ถ้าขนาดสัญญาณน้อยกว่าแรงดันเต็มสเกลช่วง เวลาตีอินทิเกรตจะสั้นลง และช่วงเวลาปรับศูนย์อัตโนมัติก็จะนานขึ้น รวมความแล้วในการอ่านค่าแรงดันอินพุตปรากฏบนแผงแสดงตัวเลขครั้งหนึ่ง ๆ ต้องใช้จำนวนพัลส์ทั้งสิ้น 4,000 ลูก 12,000 ลูกต่อวินาที ก็จะอ่านค่าแรงดันได้ 3 ครั้งต่อวินาที ดังนั้นถ้าความถี่เป็น 48kHz ก็จะสุ่มแรงดันของสัญญาณอินพุตมาอ่านค่าได้ 3 ครั้งต่อวินาที

ภาคดิจิทัล



รูปที่ 3.6 ภาคดิจิทัล ICL7107

รูปที่ 3.6 แสดงภาคดิจิทัลของ ไอซีเบอร์รี่ ICL 7107 ภาคนี้จะนับจำนวนพัลส์ในช่วง เวลาตีอินทิเกรตมานับจำนวนแล้วแปลงให้มีสัญญาณถูกต้อง ที่จะทำให้ LED แสดงตัวเลขออกมาอย่างถูกต้องกระแสที่ป้อนให้แก่ LED แต่ละส่วน (Segment) จะถูกจำกัดที่ ปริมาณ 8 mA ซึ่งก็พอเพียงที่จะทำให้ LED แบบแอนโอดร่วม ขนาดตัวเลขสูงประ มาณ 0.3" หรือ 0.43" สว่างพอสำหรับการใช้งานในที่ร่ม แต่เอาท์พุทขา 19 (ซึ่งต่อกับหลัก ซ้ายมือสุดซึ่งแสดงตัวเลข 1) สามารถจะรับกระแสจาก LED ได้ 2 ส่วน คือ ทนกระแส ได้ 16 mA

สำหรับการต่อภาคดิจิทัลเข้ากับตัวแสดงผล LED ให้ดูค่ากำกับขาต่าง ๆ ที่ แสดงในรูปที่แสดงรูปที่ ซึ่งขาไอซีที่จะต้องต่อไปยังภาคแสดงผลที่อยู่ทั้งสอง 17 ขา คือขาที่ 2 ถึงขาที่ 25 สำหรับจุดทศนิยมของตัวเลขแสดงผลต่อต่างหาก โดยการต่อจากตำแหน่งขา จุดทศนิยมของตัวแสดงผลหลักนั้น ๆ ผ่านตัวต้านทาน 150 ลงกราวิน

ถ้าแรงดันอินพุทสูง ค่าเต็มสเกลของวงจร ภาคดิจิทัลแสดงค่าออกมาเป็น 1 หรือ -1 เท่านั้น อีก 3 หลักทางขวามือจะดับมืด ถ้าแรงดันอินพุทเป็นลบก็จะมีเครื่องหมาย เลขลบปรากฏทางซ้ายมือสุด ส่วนแรงดันบวกจะ ไม่มีเครื่องหมายแสดงออกมา

หลักการทำงาน

หลักการทำงานก็เป็นดังที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อก่อน ๆ R3 และ C4 เป็นตัว กำหนดความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ตามค่าที่ให้ไว้จะให้ค่าความถี่ออกมาประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

48kHz และ R_1 จะทำหน้าที่ตัดสัญญาณรบกวนไฟสลับที่อาจจะแทรกปนเข้ามาที่ขั้วอินพุต R_1 และ R_4 จะทำหน้าที่แบ่งแรงดัน 2.8 V จากในตัวไอซีมาเพื่อสร้างแรงดันมาตรฐาน (V_{REF}) ขึ้นมา

ตัวต้านทาน R_6 เพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อป้องกันไฟเลี้ยงให้แก่ทศนิยม LED หลักที่ต้องการ (ในที่นี้จุดทศนิยมที่ต้องการอยู่ที่หลักที่ 2 นับจากขวามือทางด้านซ้ายมือของตัวเลข) อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรนี้จะมากกว่า 10^{12} โอห์ม ถึงกระแสจากอินพุตประมาณ 2 pA และการวัดเป็นแบบดิฟเฟอเรนเชียล (คือไม่ต้องการให้อินพุตสายหนึ่งต่อลงกราวด์) ทำให้สะดวกแก่การวัดมาก

แหล่งจ่ายไฟที่ ICL 7107 ต้องการคือ 5V ซึ่งจ่ายกระแสได้มากกว่า 200mA (จ่ายถึงขนาดนี้ได้เป็นครั้งคราวเท่านั้นปกติจะถึงเพียง 1 mA เท่านั้น)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้าง โหลดเซลล์

4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบโหลดเซลล์

เนื่องจากในปัจจุบัน พระราชบัญญัติมาตราซึ่งดวงวัด ยังมีได้กำหนดคุณสมบัติของ โหลดเซลล์ขึ้นมา ดังนั้นจึงต้องอาศัยการศึกษาจากข้อกำหนดของบริษัทต่างประเทศที่ผลิต โหลดเซลล์

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้อ้างอิงในการออกแบบโหลดเซลล์มีดังนี้

- 1) สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้ 10 kg
- 2) ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity error) น้อยกว่า 1 % เต็มพิสัย
- 3) ค่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) น้อยกว่า 1 % เต็มพิสัย
- 4) ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ กัน (Repeatability) ดีกว่า 1 % เต็มพิสัย
- 5) ใช้แรงดันไฟป้อน 6-10 โวลท์
- 6) แรงดันออกสูงสุดมากกว่า 1 มิลลิโวลท์/โวลท์
- 7) อุณหภูมิใช้งาน อยู่ในช่วง 10° ซ. - 60° ซ.

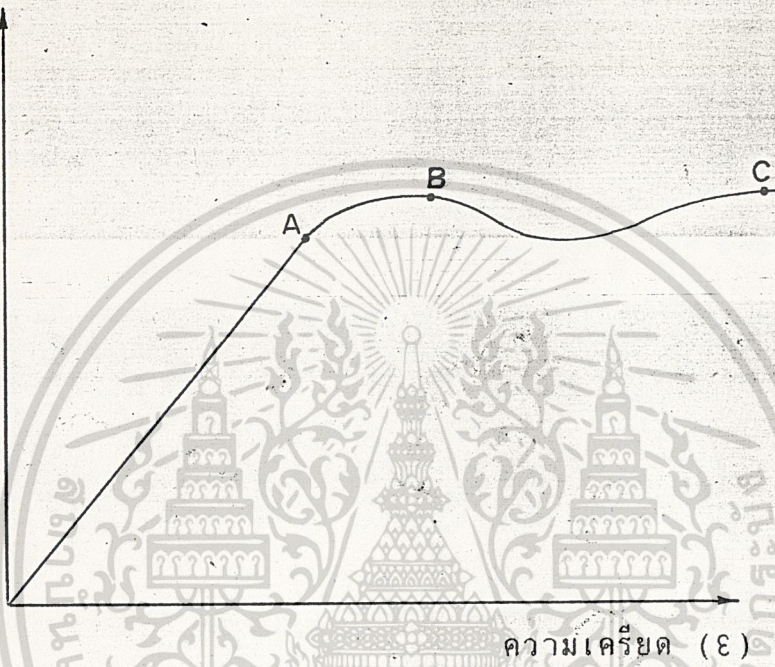
4.2 การออกแบบชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

จากหัวข้อ 2.1.1 ได้กล่าวถึงชิ้นส่วนรับน้ำหนัก แบบต่าง ๆ และได้เลือกใช้แบบคาน เนื่องจากเหมาะสมกับการรับน้ำหนักน้อย ๆ ตามที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์เอาไว้ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเลือกชนิดของ โลหะและคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

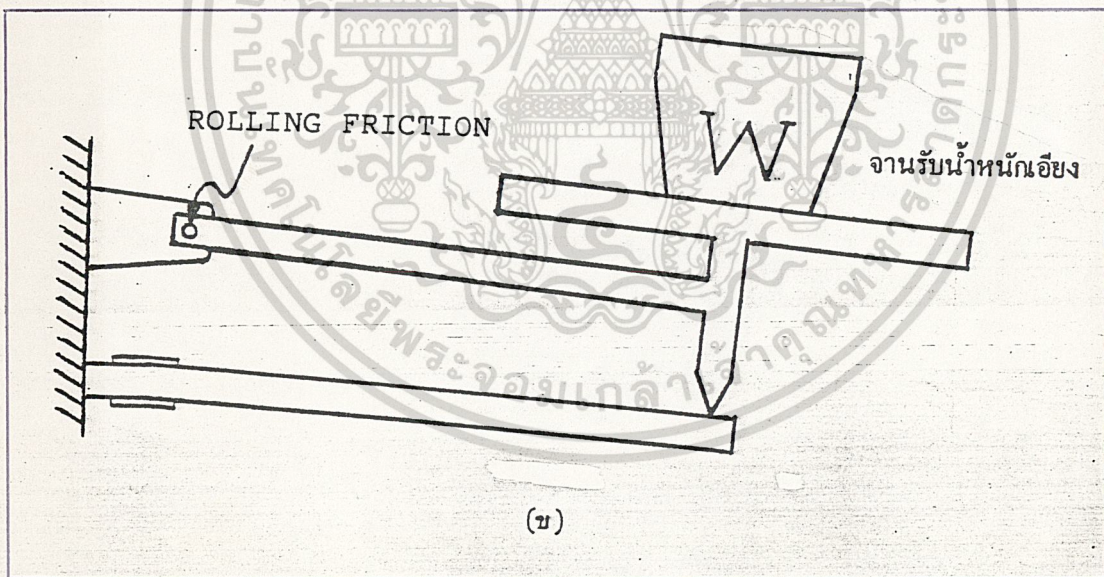
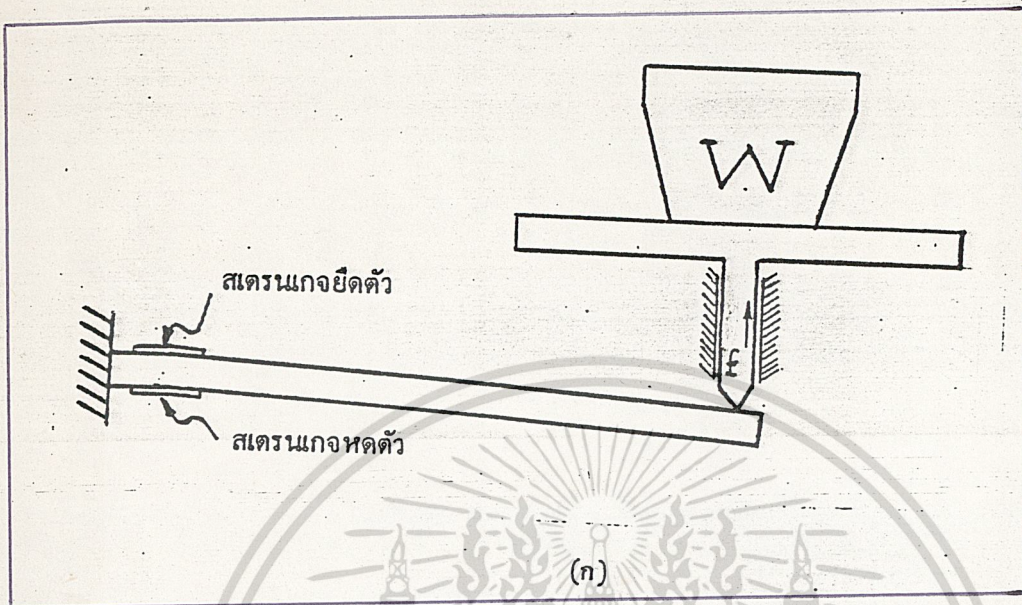
4.2.1 การเลือกชนิดของโลหะ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ สามารถจะเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.1 ช่วง OA เป็นช่วง เส้นตรงที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในการ ท้าโหลดเซลล์ จุด B เรียกว่า จุดคลาก (Yeild-point) เป็นจุดที่ความเครียดของวัสดุเพิ่ม

ความเค้น (σ)



รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 4.2 แสดงการออกแบบทางแมคคานิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

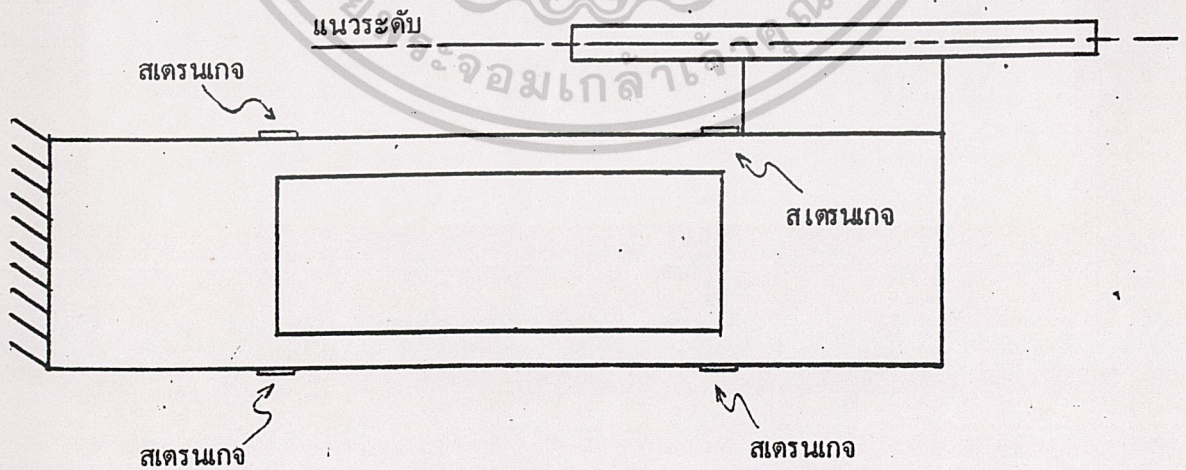
แต่ความเค้นของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นเลย ส่วนจุด C เป็นจุดที่วัสดุจะรับกำลัง ได้สูงสุด (Ultimate strength) เนื่องจากค่าความเค้นของจุด A ไม่บอกมา จึงต้องใช้ค่าความเค้นของจุดกลางในการคำนวณ และเพื่อที่จะให้ค่าฮีสเทอรีซิสมีค่าน้อย ค่าความเค้นในขณะใช้งานที่น้ำหนักเต็มพิคัดของการชั่ง ควรจะมีค่าไม่เกิน 60 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเค้นที่จุดกลางมากนัก แต่ในการออกแบบโหลดเซลล์นั้น ก็ต้องการให้ค่าแรงดันออกของโหลดเซลล์มีค่าสูง ซึ่งก็หมายความว่า จะต้องออกแบบให้เกิดความเครียด และความเค้นในชิ้นส่วนรับน้ำหนักมาก

ดังนั้นจึงต้องเลือกโลหะที่มีกำลังรับน้ำหนักสูง (High strength) ซึ่งจะมีค่าความเค้นที่จุดกลางสูงขึ้น สำหรับโลหะที่มีกำลังรับน้ำหนักสูงที่สามารถหาได้ในประเทศ ได้แก่ เหล็กพวก ASSAB และเหล็กพวก TEW ในที่นี้ได้เลือกใช้เหล็ก TEW 7225 (42 Cr Mo 4) ซึ่งมีจุดกลางประมาณ 8000 กก/ซม²

4.2.2 การคำนวณขนาดของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

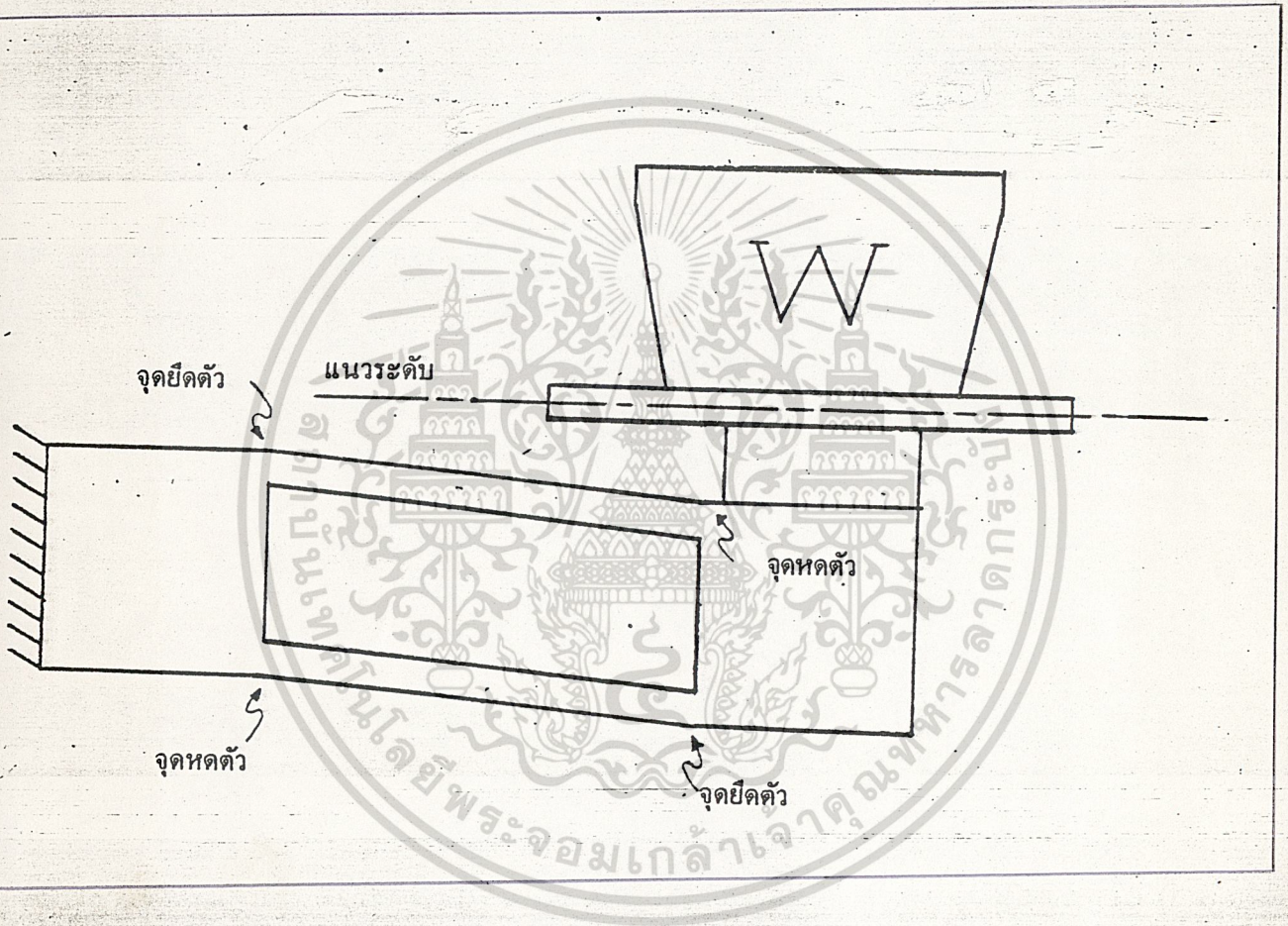
ลักษณะของคานแบบธรรมดาจะเป็นอย่างไรในรูปที่ 2.1 (ก) ข้างต้น ซึ่งคานแบบธรรมดานี้มีข้อเสียตรงเมื่อเวลาเอาโหลดเซลล์นี้มาต่อกับจานรับน้ำหนัก และระบบของมันดังรูปที่ 4.2 (ก) จะมีปัญหาตรงเรื่อง friction มาก ส่วนในรูปที่ 4.2 (ข) สามารถลด friction ได้มากกว่าวิธีแรก แต่ก็ยังมีปัญหาตรงระดับของจานรับน้ำหนักซึ่งจะเอียงได้

วิธีที่จะสามารถแก้ปัญหทั้งสองได้ คือการใช้คานชนิดที่เรียกว่า Slotted Beam ดังแสดงในรูปที่ 4.3 อีกทั้งสามารถนำไปใช้กับการจัดวางจรสเตรนเกจแบบที่ 3 ซึ่งได้กล่าว



รูปที่ 4.2 แสดงการออกแบบทางแมคคานิกส์

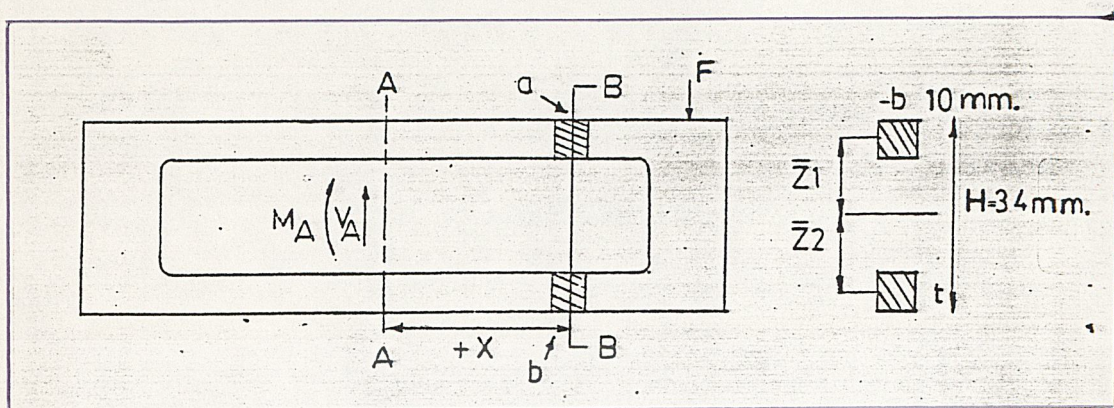
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดง โหลดเซลล์แบบ Sloted Beam ก่อนและหลังการชั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ในบทที่ 2 ส่วนเรื่องการคำนวณหาขนาดของ Slotted Beam ดังนั้น แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 การประกอบกรคำนวณโดยใช้สูตร

สูตรความเค้นที่ Section B-B ดังนี้

$$\sigma_a \text{ B-B} = - \frac{M_A}{Z_{B-B}} - \frac{V_A \times (I_1 + I_2)}{Z_1} \quad \frac{N}{m^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_b \text{ B-B} = + \frac{M_A}{Z_{B-B}} + \frac{V_A \times (I_1 + I_2)}{Z_2} \quad \frac{N}{m^2} \dots \dots \dots (2)$$

- โดยที่
- σ_a, σ_b = bending stresses at top and bottom fibers
 - M_A = bending moment at middle of slot
 - V_A = Vertical shear at middle of slot
 - Z_{B-B} = Section modulus at section B-B = I/C B-B
 - I_1, I_2 = moment of inertia of upper and lower section about their own neutral axes, at section B-B
 - Z_1, Z_2 = section modula of upper and lower sections about their own neutral ares at section B-B

ที่มาของสูตรที่ (1) และ (2) นั้นมาจากสมการที่ 2.3 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = \frac{MY}{I} = \frac{M}{Z}$$

- โดยที่
- σ คือค่าความเค้นที่จุดนั้น
 - M คือค่าโมเมนต์คัตที่กระทำให้เกิดความเค้นที่จุดนั้น
 - Y คือระยะห่างระหว่างจุดที่เกิดความเค้นกับแกน N.A.
 - I คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกน N.A.
 - Z คือเซกชันโมดูลัสเท่ากับ I หารด้วย Z

จะสังเกตเห็นว่าสมการที่ (1) และ (2) มีเทอมที่เพิ่มพิเศษจากสมการที่ (2.3) ซึ่งก็มาจากแรงเฉือนที่จุด a (ซึ่งหามาจากการแบ่งแรงเฉือน V_A ตามสัดส่วนของ I_1 หรือ I_2 ซึ่งแรงเฉือนที่จุด a และ b จะรวมกันเท่ากับ V_A) คูณด้วยระยะที่วัดจากเซกชัน A-A มายังจุด a หรือ b แล้วหารด้วย Z_1 หรือ Z_2 จะได้ความเค้นที่จุด a และ b ตามลำดับ เครื่องหมายบวกแสดงว่าเป็นความเค้นดึง เครื่องหมายลบหมายถึงความเค้นอัด

$$M_A = \text{น้ำหนักคูณระยะทาง (x)} = 10 \text{ kg} \times 80 \text{ mm} = 800 \text{ kg-mm.}$$

$$\sigma_a = 80 \text{ kg/mm}^2 \times 0.6 = 48 \text{ kg/mm}^2$$

$$V_A = 10 \text{ kg}$$

$$I_1 = I_2 = \frac{bt^3}{12} \quad (\text{สูตรการหา } I \text{ สำหรับ พท. หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยม})$$

$$Z \text{ ที่ section B-B} = \frac{I(B-B)}{C(B-B)} = 2I_1 + A_1(Z_1)^2$$

$$= 2 \frac{bt^3}{12} + bt \frac{(H-t)^2}{2}$$

$$Z_1 = Z_2 = \frac{I_1}{C_1} = \frac{bt^3}{12} \times \frac{2}{t} = \frac{bt^2}{6}$$

แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (1) และ (2) ได้ $t = 2.2$ มิลลิเมตร

เมื่อชั่งน้ำหนัก 10 Kg จะเกิด output ดังนี้

$$\text{เกิดความเครียดขึ้น เท่ากับ ความเค้น} = \frac{4,800}{2.3 \times 10^{-3}}$$

$$\text{ยัง โมดูลัส} = 2.09 \times 10^6$$

จากสมการ (2.15) จะเกิดเอาท์พุทโวลเตจที่วงจรบริดจ์ = ϵG
 = $2.3 \times 10^{-3} \times 2$
 = 4.6 mV/V



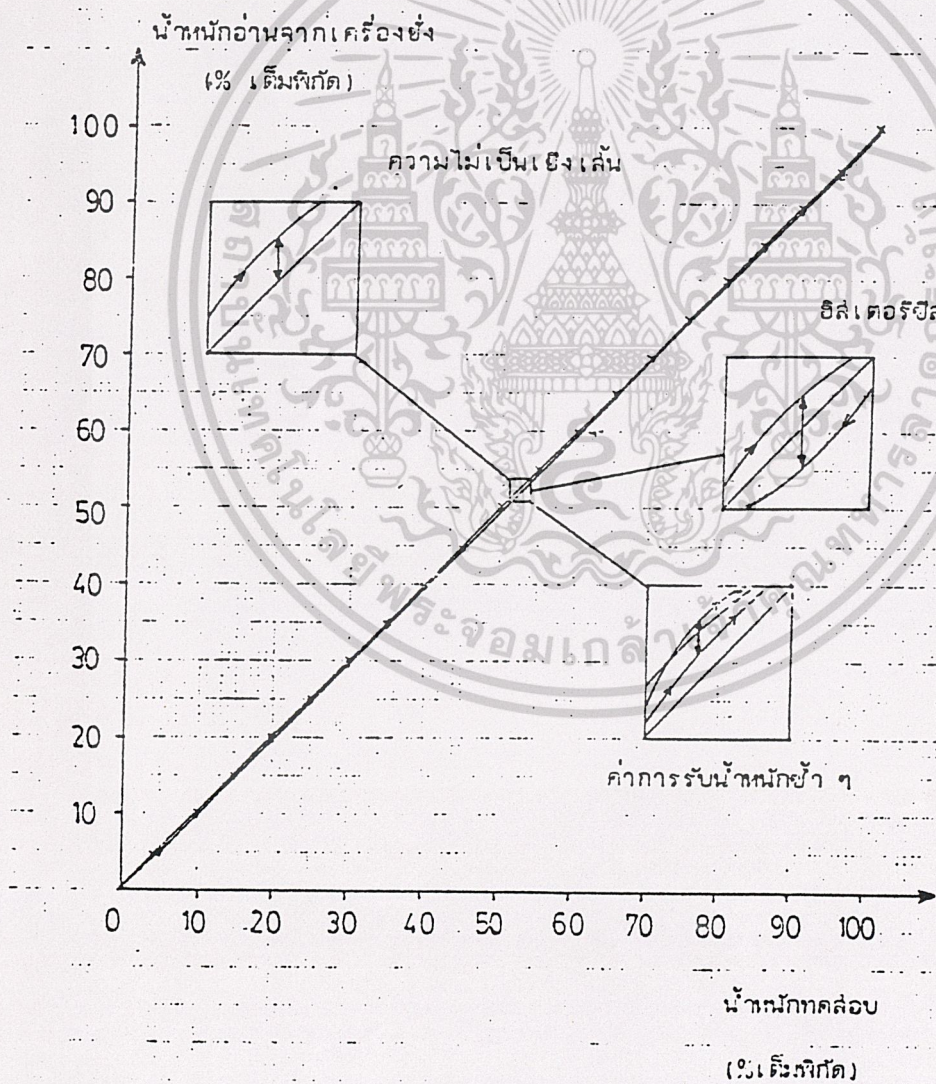
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบเครื่องชั่ง

ในการทดสอบโพลด์เซลล์ที่สร้างขึ้นนั้น จะใช้ตุ้มน้ำหนักที่มีหน่วยเป็นบอนด์นำไปชั่งบนเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง ยี่ห้อ.....ซึ่งได้รับการจดทะเบียนจากกระทรวงพาณิชย์แล้ว น้ำต้วเลขที่ชั่งได้เป็นกิโลกรัมเขียนติดไว้ที่บนลูกตุ้มน้ำหนักที่จะใช้ทดสอบในครั้งนี้ จากข้อกำหนดที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบดังที่ได้กล่าวข้างต้นมีดังนี้

- 1) สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 10 กิโลกรัม
- 2) ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity error) น้อยกว่า $\pm 1\%$ เต็มพิสัย
- 3) ค่าฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) น้อยกว่า $\pm 1\%$ เต็มพิสัย
- 4) ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ กัน (Repeatability) ดีกว่า $\pm 1\%$ เต็มพิสัย

คุณสมบัติข้อ (2) ถึงข้อ (4) แสดงได้ดังกราฟรูป 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักทดสอบ
(กิโลกรัม)

น้ำหนักอ่านจากเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์
(กิโลกรัม)

	เพิ่ม	ลด
1.00	1.00	1.00
2.00	2.00	2.00
3.00	3.00	3.00
4.00	4.01	4.01
5.00	5.01	5.01
6.00	6.03	6.03
7.00	7.03	7.03
8.00	8.04	8.04
9.00	9.04	9.04
10.00	10.04	10.04

น้ำหนักทดสอบ
(%เต็มพิกัด)

น้ำหนักอ่านจากเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์
(%เต็มพิกัด)

	เพิ่ม	ลด
00.00	00.00	00.00
10.00	10.00	10.00
20.00	20.00	20.00
30.00	30.00	30.00
40.00	40.10	40.10
50.00	50.10	50.10
60.00	60.30	60.30
70.00	70.30	70.30
80.00	80.40	80.40
90.00	90.40	90.40
100.00	100.40	100.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (%เต็มพิกัด)	ฮีสเตอร์ซิส (%เต็มพิกัด)	ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ (%เต็มพิกัด)
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.10	0.10	0.00
0.10	0.10	0.00
0.30	0.30	0.00
0.30	0.30	0.00
0.40	0.40	0.00
0.40	0.40	0.00
0.40	0.40	0.00

หมายเหตุ ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ กันปกติจะวัดได้ค่าประมาณทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ซึ่งในที่นี้ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากความละเอียดของ เอชดี จากัด และทำให้ค่าฮีสเตอร์ซิสน้อยกว่าเต็มไปเล็กน้อย เนื่องจากทดลองซึ่ง 2 ครั้ง ได้ค่าเท่ากันจึงแสดงให้ดูเพียงครั้งเดียว

สรุปและข้อเสนอแนะ

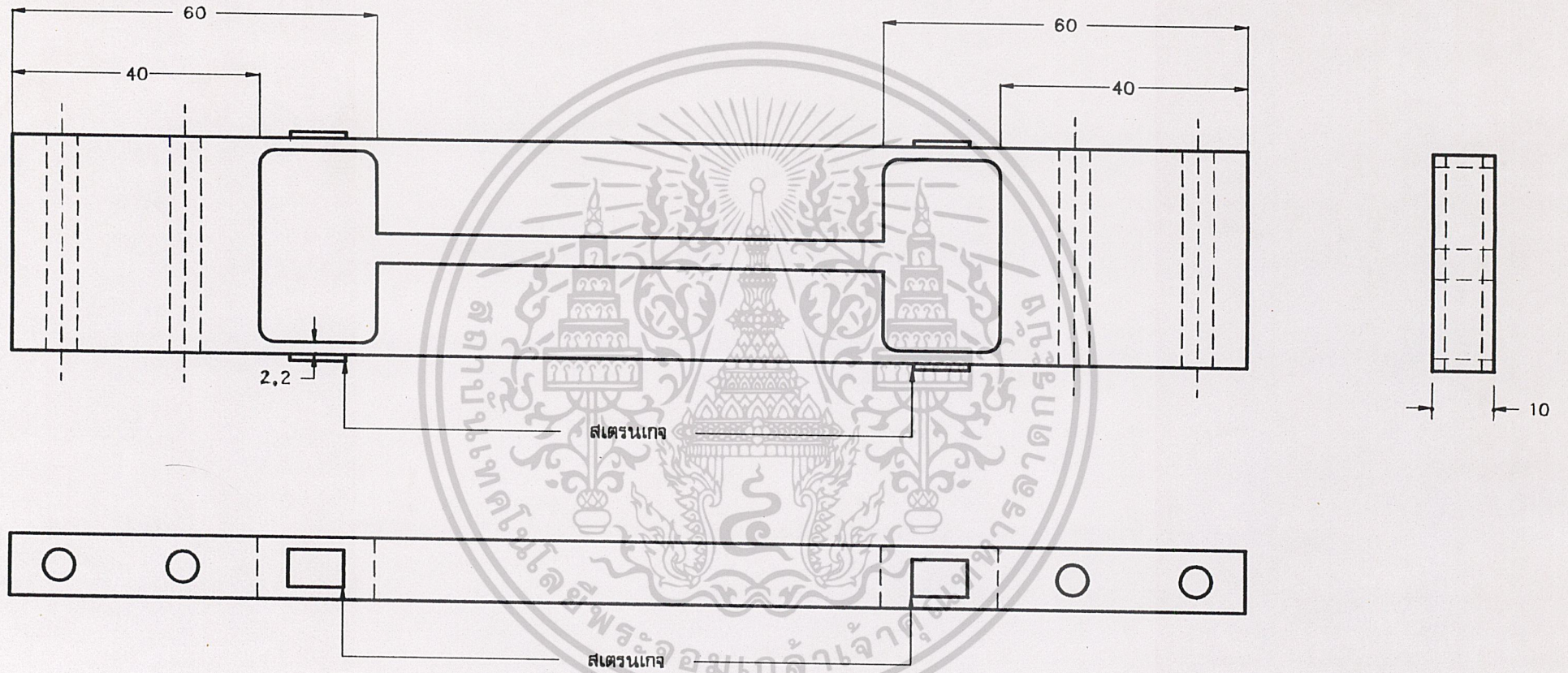
จะเห็นได้ว่าเครื่องซึ่งอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นนั้น สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพถูกจำกัด เช่น ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรอินสทรูเมนต์เดชั่น แอมพลิไฟเออร์ เบอร์ 725 ซึ่งถ้าใช้ IC เบอร์ LH 0038 แล้วค่าความไม่เป็นเชิงเส้นจะดีขึ้นมาก ส่วนของภาคจ่ายไฟบ้อนโพลดเซลล์ก็เช่นกัน ตัวที่ผลิตแรงดันอ้างอิงต้องมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูง ซึ่งถ้าใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ LM 399 แทนแล้วจะทำให้เสถียรภาพของแหล่งจ่ายไฟบ้อนโพลดเซลล์ดีขึ้น นอกจากนี้ความละเอียดของวงจร A/D ก็มีผลทำให้เครื่องซึ่งอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถที่จะแสดงค่าน้อย ๆ ได้ ในที่นี้ใช้บูร์ LCLZ107 ซึ่งเป็น A/D แบบ 3 หลักครั้ง ทำให้ความสามารถในการวัดต่ำสุดได้ 10 กรัม ซึ่งถ้าให้ A/D แบบ 4 หลักครั้งก็จะทำให้วัดต่ำสุดได้ถึง 1 กรัม จาก 10,000 กรัม IC ต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ไม่สามารถหาซื้อได้ภายในประเทศ ต้องสั่งซื้อและจะต้องซื้อทีละเป็นจำนวนมาก ๆ แต่ถ้ามองในแง่การผลิตเป็นอุตสาหกรรมก็น่าที่จะลงทุน

อย่างไรก็ตามเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ก็สามารที่จะใช้ในงานชุปเบอร์มาเกิดหัว ๆ ไป ตัวอย่างเช่น การชั่งเนื้อหมูซึ่งราคา กิโลกรัมละ 60 บาท ก็ทำได้โดยบ่อนราคา กิโลกรัมละ 60 บาท เข้าไป เมื่อชั่งเนื้อหมูซึ่งมีปริมาณตามต้องการบนเครื่องชั่งแล้ว เครื่องชั่งจะแสดงน้ำหนักออกมา ด้วยตัวเลขแบบฟลูออรีเรสเซนซ์ สีเขียวสว่างเย็นตามาก เมื่อต้องการทราบราคารวมทั้งหมดก็เพียงแต่กดปุ่ม C เครื่องก็จะคำนวณและแสดงราคารวมออกมา และสุดท้ายเครื่องก็จะพิมพ์ส่วนที่แสดงผลทั้งหมดลงบนกระดาษบันทึกไว้ให้ลูกค้าต่อไป

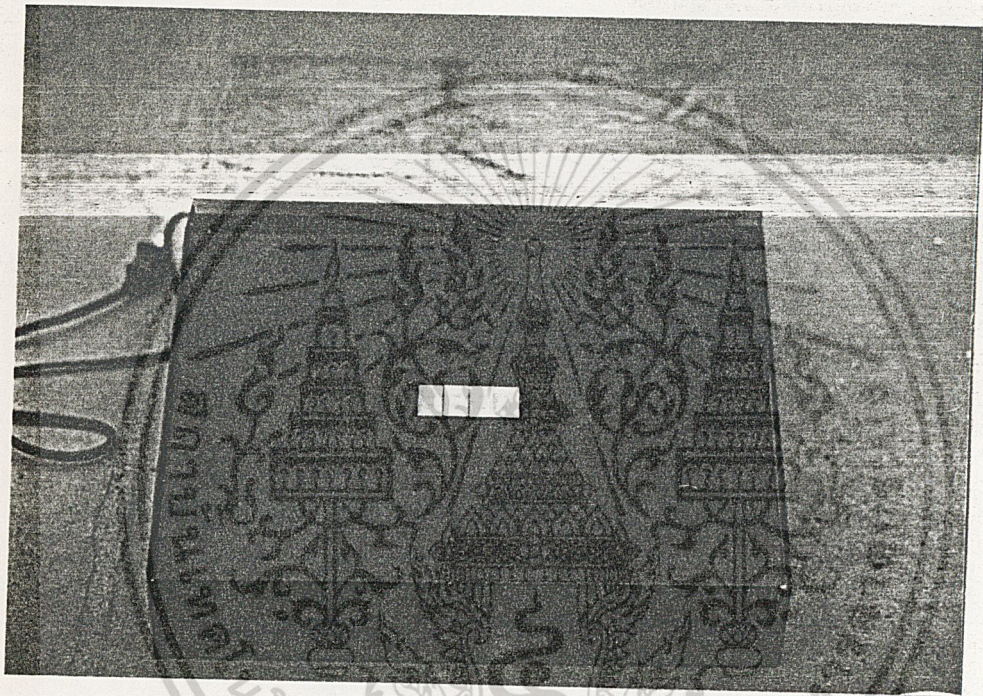
หนังสืออ้างอิง

1. ดร. วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์ และ ดร. พันธุ์ สุขารณ, กลศาสตร์วัสดุ บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด พ.ศ. 2522
2. ดร. สิทธิชัย โกโดยอุดม และ วัลลภ สุรกาพลธร, วงจรรยายสัญญาณโอเปอร์-
เรชั่นแนล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์ดวงกมล, 2523
3. ไพฑูรย์ วิเศษการ เครื่องชั่งแบบอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2533
4. Shigky Edward, Joseph Applied mechanics of materials Mc Graw - Hill, 1976
5. Perry, C.C. and Lissner, H.R. The strain gage primer 2 nd ed. New York, Mc Graw - Hill, 1954.
6. Mc menamin, J. Michael Linear integrated circuit operation and application. Engle Wood Cliff, N.J., Prentice - Hall, 1985.
7. Raymond J. Roark Formulas for stress and strain 3 rd ed. New York, Toronto, London, Mc Graw - Hill, 1954.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงชิ้นส่วนน้ำหนักที่ออกแบบแล้ว



แสดงรูปถ่ายเครื่องซิ่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



National Semiconductor

Operational Amplifiers/ Buffers

LM725/LM725A/LM725C (Instrumentation) Operational Amplifier

General Description

The LM725/LM725A/LM725C are operational amplifiers featuring superior performance in applications where low noise, low drift, and accurate closed-loop gain are required. With high common mode rejection and offset null capability, it is especially suited for low level instrumentation applications over a wide supply voltage range.

The LM725A has tightened electrical performance with higher input accuracy, and like the LM725, is guaranteed over a -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ temperature range. The LM725C has slightly relaxed specifications and has its performance guaranteed over a 0°C to 70°C temperature range.

Features

- High open loop gain 3,000,000
- Low input voltage drift $0.6 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
- High common mode rejection 120 dB
- Low input noise current $0.15 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Low input offset current 2 nA
- High input voltage range $\pm 14\text{V}$
- Wide power supply range $\pm 3\text{V}$ to $\pm 22\text{V}$
- Offset null capability
- Output short circuit protection

Schematic and Connection Diagrams



Compensation Component Values

A_{VCL}	R1 (k Ω)	C1 (μF)	R2 (k Ω)	C2 (μF)
10,000	10k	50 pF	2.2	0.01
1,000	170	0.01	2.2	0.01
100	47	0.01	2.2	0.01
10	27	0.05	270	0.015
1	10	0.5	39	0.2

The R1 - C1 or R2 - C2 capacitor is optional and capacitor load.

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	±22V	Operating Temperature Range	$T_A(\text{MIN})$	$T_A(\text{MAX})$
Internal Power Dissipation (Note 1)	500 mW		-55°C to	+125°C
Differential Input Voltage	±5V	LM725	-55°C to	+125°C
Input Voltage (Note 2)	±22V	LM725A	0°C to	+70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	LM725C		
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	300°C			

Electrical Characteristics (Note 3)

PARAMETER	CONDITIONS	LM725A			LM725			LM725C			UNITS					
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX						
Input Offset Voltage (Without External Trim)	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			0.5	0.5	1.0			0.5	2.5	mV					
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		2.0	5.0	2.0	20			2.0	35	nA					
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		42	80	42	100			42	125	nA					
Input Noise Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$															
												$f_o = 10\text{ Hz}$	15	15	15	nV/√Hz
												$f_o = 100\text{ Hz}$	9.0	9.0	9.0	nV/√Hz
												$f_o = 1\text{ kHz}$	8.0	8.0	8.0	nV/√Hz
Input Noise Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$															
												$f_o = 10\text{ Hz}$	1.0	1.0	1.0	pA/√Hz
												$f_o = 100\text{ Hz}$	0.3	0.3	0.3	pA/√Hz
												$f_o = 1\text{ kHz}$	0.15	0.15	0.15	pA/√Hz
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1.5		1.5		1.5		1.5	MΩ						
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$	±13.5	±14		±13.5	±14		±13.5	±14	V						
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $V_{OUT} = 110\text{ V}$	1000	3000		1000	3000		250	3000	V/mV						
Common-Mode Rejection Ratio	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	120			110	120		94	120	dB						
Power Supply Rejection Ratio	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$		2.0	5.0		2.0	10		2.0	35	μV/V					
Output Voltage Swing	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	±12.5	±13.5		±12	±13.5		±12	±13.5	V						
		±12.0	±13.5		±10	±13.5		±10	±13.5	V						
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$		80	105		80	105		80	150	mW					
Input Offset Voltage (Without External Trim)	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			0.7		1.5				3.5	mV					
Average Input Offset Voltage Drift (Without External Trim)	$R_S = 50\Omega$			2.0		2.0	5.0		2.0		μV/°C					
Average Input Offset Voltage Drift (With External Trim)	$R_S = 50\Omega$		0.6	1.0		0.6			0.6		μV/°C					
Input Offset Current	$T_A = T_{MAX}$, $T_A = T_{MIN}$	1.2	4.0		1.2	20		1.2	35	nA						
		7.5	18.0		7.5	40		4.0	50	nA						
Average Input Offset Current Drift		35	90		35	150		10		pA/°C						
Input Bias Current	$T_A = T_{MAX}$, $T_A = T_{MIN}$	20	70		20	100			125	nA						
		80	180		80	200			250	nA						
Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $T_A = T_{MAX}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $T_A = T_{MIN}$	1,000,000			1,000,000			125,000		V/V						
		500,000			250,000			125,000		V/V						
Common-Mode Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	110			100			115		dB						
Power Supply Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$		8.0			20			20	dB						
Output Voltage Swing	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	±12			±10			±10		μV/V						

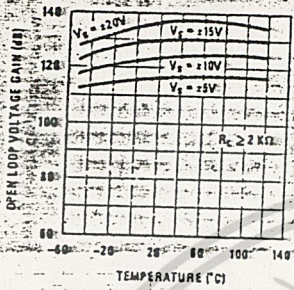
Note 1: Derate at 150°C/W for operation at ambient temperatures above 75°C.

Note 2: For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

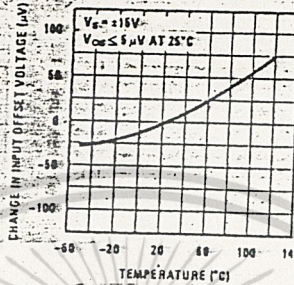
Note 3: These specifications apply for $V_{CC} = \pm 15\text{V}$ unless otherwise specified.

Typical Performance Characteristics

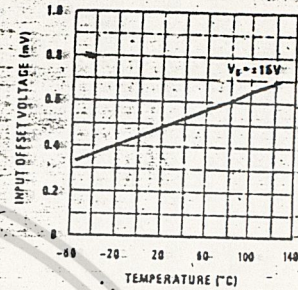
Open Loop Voltage Gain vs. Temperature for Various Supply Voltages



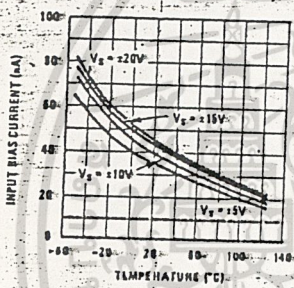
Nulled Input Offset Voltage vs. Temperature



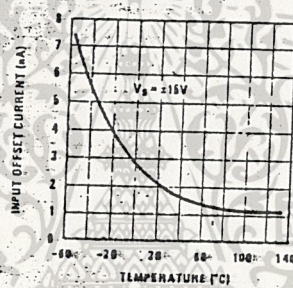
Unnulled Input Offset Voltage vs. Temperature



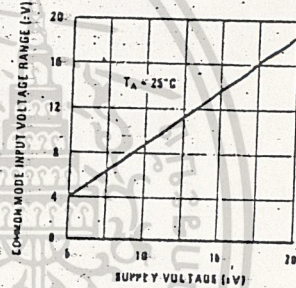
Input Bias Current vs. Temperature



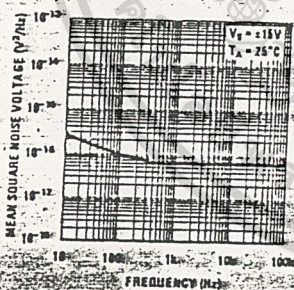
Input Offset Current vs. Temperature



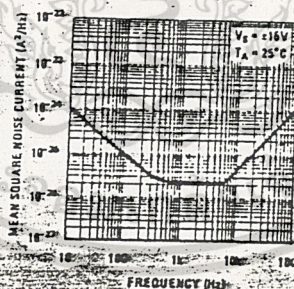
Common Mode Input Voltage vs. Supply Voltage



Input Noise Voltage vs. Frequency



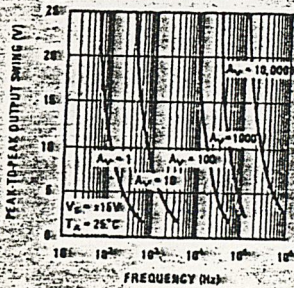
Input Noise Current vs. Frequency



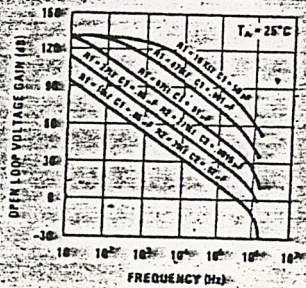
Values for Suggested Compensation Networks for Various Closed Loop Voltage Gains



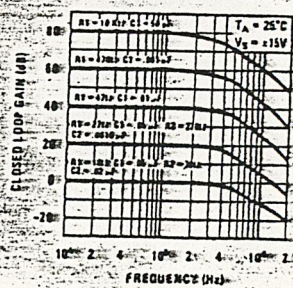
Output Voltage Swing vs. Frequency for Recommended Compensation Networks



Open Loop Voltage Gain vs. Frequency Using Recommended Compensation Networks

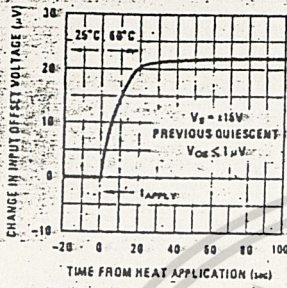


Frequency Response for Various Closed-Loop Gains Using Recommended Compensation Networks

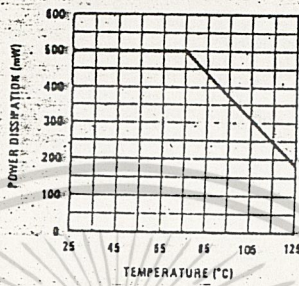


Typical Performance Characteristics (Continued)

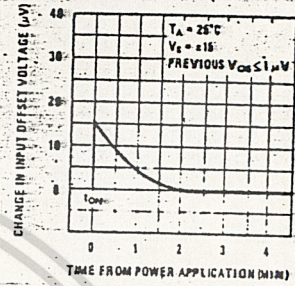
Change in Input Offset Voltage Due to Thermal Shock vs Time



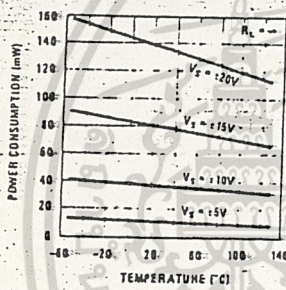
Absolute Maximum Power Dissipation vs Ambient Temperature



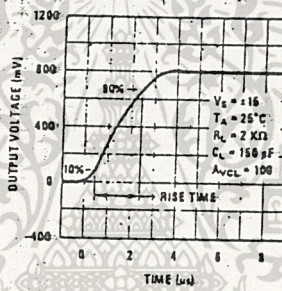
Stabilization Time of Input Offset Voltage from Power Turn-On



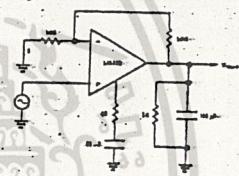
Power Consumption vs Temperature



Transient Response



Transient Response Test Circuit





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของ เครื่องชั่ง และข้อกำหนด

เครื่องชั่งชนิดที่ 1

ข้อ 66 เครื่องชั่งชนิดที่ 1 นั้น คือ เครื่องที่มีค้ำยื่นออกไปจากฟัลครัม (fulcrum) เท่ากันทั้ง 2 ข้าง และภาคชั่งทั้งสองห้อยอยู่ที่ค้ำ

ข้อ 67 สายห้อยภาคชั่งของเครื่องชั่งชนิดนี้ ห้ามมิให้ใช้เชือก

ข้อ 68 อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อย และอัตราความรู้สึกนั้น อนุญาตดังนี้

ชั่งน้ำหนักเต็มพิกัดกำลังเครื่อง อนุญาต 1/2000 ของน้ำหนัก

ข้อ 69 เครื่องชั่งชนิดที่สำหรับใช้ซึ่งมีมีค่าเงิน ทอง เครื่องประดับมณีและของเล็กที่มีค่ามากนั้น อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดและอัตราความรู้สึกดังนี้

ชั่งน้ำหนักเต็มพิกัดกำลังเครื่อง อนุญาต 1/5000 ของน้ำหนักนั้น

เครื่องชั่งชนิดที่ 2

ข้อ 70 เครื่องชั่งชนิดที่ 2 นั้น คือ เครื่องที่มีค้ำยื่นออกไปจากฟัลครัม เท่ากันทั้ง 2 ข้าง และภาคชั่ง และแท่นชั่งทั้ง 2 อยู่เหนือค้ำ

ข้อ 71 ถ้ำค้ำหรือตัวเครื่องเป็นชนิดแปดต้องเป็นราวตามอย่างน้อย 2 อัน ที่รับภาคชั่งต้องทำอย่างแข็งแรง

เสากลางต้องทำโดยมิให้บิดหมุนเคลื่อนจากที่ได้

ที่ยึด ข้อ และห่างทั้งบาง ในส่วนซึ่งกระทบกับที่อื่นต้องทำด้วยเหล็กดีอย่างแข็งหรือด้วยหินแก้ว (agate) หรือวัสดุอื่นที่สำนักงานกลางเห็นชอบ

ข้อ 72 สำหรับเครื่องที่ทำให้เที่ยงโดยใช้บาแลนซิงบ็อกซ์ ๆ นั้นต้องติดแน่นได้ภาคชั่งและมีขนาดเพียงบรรจุวัตถุที่ทำให้เที่ยงได้ไม่เกิน 1 เบอร์เซนต์ ของพิกัดกำลังแห่งเครื่องนั้นและจะใส่ ถอดได้ก็ด้วยโดยใช้เครื่องมืออย่างใดอย่างหนึ่งทำ

การทำให้เครื่องเที่ยงนั้น ห้ามมิให้ใช้วิธีอื่น

(ความในข้อ 73 ถูกยกเลิกโดยข้อ 1 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2486) และใช้ความต่อไปนี้แทน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ 73 ถาดชั่งหรือแทนชั่ง ต้องทำด้วยวัตถุแข็งหรือโลหะ และห้ามมิให้ทาสีถาดชั่ง
ข้อ 74 อัตรารอบเพื่อขาดทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อย และอัตราความรูสึกนี้ขึ้นอยู่กับชนิดนี้
ซึ่งน้ำหนักเต็มพิกัดกำลังเครื่อง อนุญาต 1/500 ของน้ำหนักนั้น

เครื่องชั่งชนิดที่ 3

ข้อ 75 เครื่องชั่งชนิดที่ 3 นั้น คือ เครื่องชั่งซึ่งพัลครัมอยู่ค่อนไปข้างหนึ่งของ
คันทางด้านสั้นแขนที่รับของชั่ง (จะเป็นถาดหรือชอกก็ตาม) และทางด้านยาวมีชั้นหมาย
มาตราและคัมพอยส์เพื่อบอกอัตราน้ำหนักเครื่องนี้เป็นเครื่องประเภทลิเวอร์ จะใช้ชั่งต้อง
ห้อยแขวนหรือติดไว้ กับสิ่งอื่นอันอยู่เหนือเครื่อง และไม่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องนั้น

ข้อ 76 คันชั่งนั้นต้องทำด้วยเหล็กเหนียว หรือเหล็กตี หรือวัตถุใด ๆ ที่สา
นักงานกลางเห็นชอบ คันชั่งทางด้านยาวต้องตรงจริง ๆ
(ความในข้อ 77 และข้อ 78 ถูกยกเลิกโดยข้อ 1 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 3 (พ.ศ.
2486) และใช้ความต่อไปนี้แทน)

ข้อ 77 ชั้นหมายมาตราบนคันชั่งชนิดชิดหรือพันเลื่อย ซึ่งมีขนาดพิกัดกำลังตั้งแต่
100 กิโลกรัมลงมา ต้องทำไว้ข้างเดียวให้ได้ฉากกับคันชั่ง

ข้อ 78 เครื่องชนิดนี้ห้ามมิให้มีขนาดพิกัดกำลังต่ำกว่า 10 กิโลกรัม หรือมีชั้น
หมายมาตราไม่ตั้งต้นด้วยศูนย์ (0)

ข้อ 79 อัตรารอบเพื่อเหลือเพื่อขาดทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อย และอัตราความรูสึกนี้
อนุญาตดังนี้

ซึ่งน้ำหนักเต็มพิกัดกำลังเครื่อง อนุญาต 1/500 ของน้ำหนักนั้น

เครื่องชั่งชนิดที่ 4

ข้อ 80 เครื่องชั่งชนิดที่ 4 นั้น คือ เครื่องชั่งที่มีรับของชั่ง เป็นแทนอยู่เหนือลิ
เวอร์อันเนื่องอยู่กับคันหรือกับที่อื่น ซึ่งเป็นที่บอกอัตราน้ำหนัก แทนนี้ที่มีหมอนอันเป็นที่รับไนฟ
เอดซ์ 4 ทาง เป็นอย่างน้อยและที่หมอนนี้ตั้งที่บนไนฟเอดซ์ในลิเวอร์

ข้อ 81 ที่คันชั่งของเครื่องนั้น นอกจากที่รองคัมเคาน์เตอร์พอยส์ (counter
poise) แล้ว ต้องทำมิให้มีส่วนถอดจากกันได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ 82 ถ้าไม่ใช่แทนซึ่งธรรมดา จะใช้ที่รับของอย่างอื่นที่ถอดได้แทนที่รับของนั้น ต้องเป็นส่วนสำคัญของเครื่อง ซึ่งถ้าไม่มีสิ่งนั้นแล้ว เครื่องจะเที่ยงไม่ได้เลย

ข้อ 83 ตุ่มเคาน์เตอร์พอยส์ทุกชิ้นสำหรับเครื่องนั้น ต้องมีเครื่องหมายบนตุ่มพอยส์ที่จะให้เห็นได้ว่าเป็นตุ่มประจำกับเครื่องใด เครื่องหมายนั้นต้องไม่ลบเลือนได้ง่าย ตุ่มนั้นต้องหมายไว้ว่าจะให้แทนหน้าหนักเท่าใด

ข้อ 84 ตุ่มเคาน์เตอร์พอยส์นี้ต้องทำรูปให้ผิดไปจากตุ่มหน้าหนักธรรมดา (ความในข้อ 84 ทวิ เพิ่มเติมโดย ข้อ 2 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 3 พ.ศ. 2486) ดังต่อไปนี้)

ข้อ 84 ทวิ ตุ่มเคาน์เตอร์พอยส์ และตุ่มพอยส์ชนิดเลื่อน ถ้าต้องมีรูสำหรับเติมตะกั่วเพื่อให้ตุ่มตรงอัตรา จะมีได้เพียงรูเดียว

ข้อ 85 เครื่องซึ่งชนิดนี้ ถ้ามีพิกกัดกำลังต่ำกว่า 50 กก. ห้ามมิให้เจ้าพนักงานให้คำรับรอง

ข้อ 86 อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อย และอัตราความรู้สึกล้นอนุญาตดังนี้

ซึ่งหน้าหนักเต็มพิกกัดกำลังเครื่อง อนุญาต $1/2,000$ ของหน้าหนัก

เครื่องซึ่งชนิดที่ 5

ข้อ 87 เครื่องซึ่งชนิดที่ 5 นั้น คือ เครื่องซึ่งไฮโดมาติก (automatic) ที่โดยมากใช้ในการชั่งเร็ว ๆ เพราะประกอบด้วยเครื่องกลอันทันสมัยเป็นพิเศษสำหรับบอกอัตราหน้าหนักหรือรวมปริมาณหน้าหนักของที่ชั่งได้เอง

ข้อ 88 เครื่องซึ่งชนิดที่ 5 นี้มีลักษณะเข้าอยู่ในจำพวกเครื่องซึ่งชนิดใดต้องทดลองให้ถูกต้องตามข้อบังคับที่กล่าวด้วยเครื่องชนิดนั้นทุกประการ

(ความในข้อ 88 ทวิ เพิ่มเติมโดยข้อ 2 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2486) ดังต่อไปนี้)

เครื่องซึ่งชนิดที่ 6

ข้อ 88 ทวิ เครื่องซึ่งชนิดที่ 6 ได้แก่เครื่องซึ่งสปริงมีลักษณะและวิธีใช้ดังต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) ชั้นหมายมาตราที่หน้าบัตต้องให้เห็นเด่นชัด และช่องระหว่างชั้นต้องมีระยะห่างกันไม่น้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร

(2) หน้าบัตที่แสดงชั้นหมายมาตราต้องตรงติดแน่นกับตัวเครื่อง

(3) มีชั้นหมายมาตราศูนย์ (0) แสดงอย่างชัดเจน กับต้องไม่มีที่กันเข็มชี้อัตรา
น้ำหนัก

(4) เข็มชี้อัตราน้ำหนักต้องยาวพอ และอยู่ในลักษณะที่จะชี้ชั้นหมายมาตราได้ โดยชัดเจนทั้งปลายเข็มต้องมีระยะห่างจากหน้าบัตไม่เกิน 5 มิลลิเมตร

(5) มีตะกั่วตรึงหน้าบัตติดกับตัวเครื่อง ให้ปลายข้างหนึ่งทะลุหน้าบัตขึ้นมา สำหรับประทับเครื่องหมายรับรองของเจ้าพนักงาน

(6) ที่ตั้งเครื่องให้เที่ยงและให้ได้ระดับ ถ้ามี ต้องมีลักษณะที่จะตั้งได้ก็แต่โดย
ใช้เครื่องมือ

(7) เครื่องชั่งชนิดแขน ต้องใช้ห่วงเป็นที่สำหรับแขวน และห้ามมิให้ถือด้วยมือ

ต้องให้ถาดห้อยจากห่วงที่เครื่อง จะใช้ขอแทนห่วงสำหรับเกี่ยวถาดไม่ได้แต่ถ้าเครื่องใดมี
ขอสำหรับเกี่ยวของชั่ง จะให้ถาดรับของชั่งเกี่ยวเข้ากับขออีกต่อหนึ่งก็ได้

(9) ถาดรับของชั่งให้ทำด้วยสังกะสี หรือเหล็กแผ่นชุบสังกะสี ชุบทองแดง ชุบนิกเกิล หรือชุบดีบุก และห้ามมิให้ทาสี

(10) อัตราเพื่อเหลือเพื่อชาดทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อย อนุฐาน 1/500 ของน้ำหนักนั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEW 7225 (42 Cr Mo 4)

DIN-Material -No.1.7225

Code 42 CrMo 4

เทียบมาตรฐาน AISI/SAE 4140

ส่วนผสม %	C	Si	Mn	Cr	Mo
	0.38-0.45	0.15-0.40	0.50-0.80	0.90-1.20	0.15-0.30

การใช้งาน เพลาล้อรถ ก้านสูบ เพลาช้อเหยียง เฟืองเพลลา และชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่ทำงานในลักษณะคล้ายกัน

คุณสมบัติของ สภาพอบอ่อน annealed: ไม่เกิน 217 HB

เหล็กที่จำหน่าย สภาพผ่านการชุบแข็งและคืนไฟ Hardened and Tempered:

ขนาดกลมโต	จุดล้า	แรงดึง	การยืดตัว	การลดพื้นที่	แรงกระแทก
	0.2 Yield Point	Tensile Strength	Elongation (Lo = 5do)	Reduction of area	Impact Energy
	N/mm ²	N/mm ²	%	%	J
	Kp/mm ²	Kp/mm ²	min	min	min
16	885	1080-1280	10	40	34
	90	110-130			
16-40	765	980-1180	11	45	41
	78	100-120			
40-100	635	880-1080	12	50	41
	65	90-110			
100-160	560	780-930	13	55	41
	57	80-95			
160-250	510	740-890	14	55	41
	52	75-90			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอบชุบ	เผาตีขึ้นรูป	อบอ่อน	การคืนตัว			คืนไฟ
		Soft-annealing	Normalizing	น้ำ	น้ำมัน	Temperi
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
	1050-850	680-720	840-880	820-850	830-860	540-680



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 72
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๘๘๕๕๐