



ตำราวิชาเครื่องวัด

พ.ศ. ๒๕๖๒

โดย

กองมาตรวิทยา กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ

กองทัพอากาศ

ดอนเมือง

กรุงเทพมหานคร

คำนำ

การเรียบเรียงเนื้อหาวิชาเครื่องวัดเล่มนี้ เพื่อใช้เป็นตำราในการสอบคัดเลือกนายทหารสัญญาบัตร เหล่าทหารสื่อสาร จำพวกทหารสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ โดยผู้เรียบเรียงได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากตำราต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ และไฟฟ้า รวมถึงเครื่องวัดทางฟิสิกส์ โดยมีการปรับปรุงเนื้อหาให้มีความทันสมัยและครอบคลุมเนื้อหาวิชาเครื่องวัดทั้งหมด

ทั้งนี้ส่วนราชการต่างๆ สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องวัด และผู้เรียบเรียงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราเล่มนี้จะเกิดประโยชน์สูงสุดแก่ผู้สนใจและกองทัพอากาศต่อไป

นาวาอากาศโท

(ชาณุณรงค์ พิมพา)

นาวาอากาศเอก

(รณชิต วิจิตร)

คณะผู้จัดทำ

นาวาอากาศเอก

(ไชยานนท์ สุขประเสริฐ)

ผอ.กมว.สอ.ทอ.

ประธานที่ปรึกษา

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| คำนำ | ก |
| สารบัญ | ข |
| สารบัญตาราง | ง |
| สารบัญภาพ | จ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ฉ |
| บทที่ ๑ แนวความคิดเกี่ยวกับมาตรวิทยาเบื้องต้น | |
| ๑.๑ บทนำและประวัติความเป็นมา | ๑ |
| ๑.๒ ระบบการวัด | ๗ |
| ๑.๓ มาตรวิทยา | ๑๖ |
| ๑.๔ ระบบการสอบกลับได้ | ๑๙ |
| ๑.๕ บทสรุประบบมาตรวิทยา | ๒๓ |
| ๑.๖ คำสั่งกองบัญชาการทหารสูงสุด ที่ ๕๐๖/๒๕๑๓ | ๒๔ |
| ๑.๗ ระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการปฏิบัติต่อบริภัณฑ์เครื่องวัด พ.ศ.๒๕๕๔ | ๒๖ |
| บทที่ ๒ Meter | |
| ๒.๑ หลักการเบื้องต้นของมิเตอร์ | ๓๑ |
| ๒.๒ Analog Multimeter | ๓๕ |
| ๒.๓ Digital Multimeter | ๔๐ |
| ๒.๔ การวัดค่าความต้านทาน (Resistance) | ๔๒ |
| ๒.๕ การวัดค่า Capacitance | ๔๔ |
| ๒.๖ การวัดค่า Inductance | ๔๗ |
| บทที่ ๓ SIGNAL GENERATOR | |
| ๓.๑ กล่าวโดยทั่วไป | ๕๐ |
| ๓.๒ หลักการทำงาน | ๕๐ |
| บทที่ ๔ OSCILLOSCOPE | |
| ๔.๑ กล่าวทั่วไป | ๕๗ |
| ๔.๒ หลักการทำงาน | ๕๗ |
| ๔.๓ การนำไปใช้งาน (Application) | ๕๙ |
| ๔.๔ Digital Storage Oscilloscope | ๖๖ |
| ๔.๕ Automatic Measurements and Processing | ๗๗ |
| ๔.๖ การต่อเชื่อม (Interfacing) | ๗๙ |
| ๔.๗ ข้อควรระวังและการบำรุงรักษา | ๘๐ |
| บทที่ ๕ FREQUENCY COUNTER | |
| ๕.๑ กล่าวทั่วไป | ๘๑ |
| ๕.๒ TIME BASE | ๘๑ |
| ๕.๓ วิธีการวัดความถี่ | ๘๑ |
| ๕.๔ แหล่งที่มาของความผิดพลาดของเครื่องวัดความถี่ | ๘๖ |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|----------|
| บทที่ ๖ เครื่องวัดความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Measurement) | |
| ๖.๑ กล่าวทั่วไป | ๙๑ |
| ๖.๒ ช่วงความถี่ไมโครเวฟ | ๙๑ |
| ๖.๓ การวิเคราะห์สัญญาณความถี่ไมโครเวฟ | ๙๑ |
| ๖.๔ เครื่องวัดพลังงานไมโครเวฟ | ๙๑ |
| ๖.๕ เครื่องวัดความถี่ (Frequency Meter) | ๙๒ |
| ๖.๖ การวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณ | ๙๔ |
| บทที่ ๗ เครื่องวัดทางกลไกไฟฟ้าและเครื่องวัดทางฟิสิกส์เบื้องต้น | |
| ๗.๑ กล่าวโดยทั่วไป | ๙๙ |
| ๗.๒ มิติ (Dimensional) | ๙๙ |
| ๗.๓ แรง (Force) | ๑๐๐ |
| ๗.๔ แรงบิด (Torque) | ๑๐๒ |
| ๗.๕ อุณหภูมิ (Temperature) | ๑๐๖ |
| ๗.๖ ความกดดัน (Pressure) | ๑๑๑ |
| ๗.๗ ความชื้น (Humidity) | ๑๑๒ |
| ๗.๘ ความหนืด (Viscosity) | ๑๑๕ |
| ๗.๙ การสั่นสะเทือน (Vibration) | ๑๑๖ |
| ๗.๑๐ อัตราการไหล (Flow Rate) | ๑๑๘ |
| ๗.๑๑ ความเร็วรอบ (Speed) | ๑๒๑ |
| ๗.๑๒ แสงและระบบออปติก (Light & Optic) | ๑๒๒ |
| ๗.๑๓ ริงส์ | ๑๒๔ |
| ๗.๑๔ สรุปร | ๑๒๕ |
| บรรณานุกรม | ญ |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ ๑-๑ แสดงตัวอย่างของอนุพันธ์ที่ได้มาจากหน่วยรากฐาน | ๑๓ |
| ตารางที่ ๑-๒ บทบาทของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ในการสอบเทียบและสามารถสอบกลับได้ | ๒๑ |
| ตารางที่ ๖-๑ การลดทอนสัญญาณของ Attenuator | ๙๒ |
| ตารางที่ ๗-๑ แสดงขอบเขตที่ยอมรับให้อุปกรณ์วัดแรงบิดผิดพลาดได้ | ๑๐๕ |
| ตารางที่ ๗-๒ แสดงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของแต่ละชนิด | ๑๐๘ |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปภาพที่ | |
| ๑-๑ เครื่องชั่ง Balance | ๘ |
| รูปภาพที่ ๑-๒ เครื่องมือวัดทางฟิสิกส์ | ๙ |
| รูปภาพที่ ๑-๓ การเคลื่อนที่ของแสงใน ๑ หน่วยเวลา | ๑๐ |
| รูปภาพที่ ๑-๔ มวลมาตรฐาน | ๑๐ |
| รูปภาพที่ ๑-๕ การเคลื่อนที่ของอะตอม Cesium-133 | ๑๑ |
| รูปภาพที่ ๑-๖ กระแสไฟฟ้าคงที่ในลวดตัวนำ | ๑๑ |
| รูปภาพที่ ๑-๗ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทาน | ๑๑ |
| รูปภาพที่ ๑-๘ การหาความเข้มของการส่องสว่าง | ๑๒ |
| รูปภาพที่ ๑-๙ แสงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล | ๑๒ |
| รูปภาพที่ ๑-๑๐ มุม ๑ เรเดียน | ๑๒ |
| รูปภาพที่ ๑-๑๑ มุม ๑ สตอเรเดียน | ๑๓ |
| รูปภาพที่ ๑-๑๒ โครงสร้างของห้องปฏิบัติการมาตรฐาน | ๑๕ |
| รูปภาพที่ ๒-๑ แสดง Moving Coil Meter | ๓๑ |
| รูปภาพที่ ๒-๒ แสดง Moving Iron Vane Meter | ๓๒ |
| รูปภาพที่ ๒-๓ แสดง Electro Dynamo Meter | ๓๒ |
| รูปภาพที่ ๒-๔ แสดง Direct Heated Thermocouple | ๓๓ |
| รูปภาพที่ ๒-๕ แสดง Indirect Heated Thermocouple | ๓๓ |
| รูปภาพที่ ๒-๖ แสดง Isolated Thermocouple | ๓๔ |
| รูปภาพที่ ๒-๗ แสดง Linear Scale | ๓๔ |
| รูปภาพที่ ๒-๘ แสดง Square Law Scale | ๓๔ |
| รูปภาพที่ ๒-๙ แสดง Logarithmic Scale | ๓๕ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๐ แสดงสเกลแบบ Non-Linear scale ของ Ohms และ Db | ๓๕ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๑ แสดง Ammeter Diagram | ๓๕ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๒ แสดง Voltmeter Diagram | ๓๗ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๓ แสดงการ Loading ของ Voltmeter | ๓๘ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๔ แสดง Series Type Ohmmeter | ๓๙ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๕ แสดง Shunt Type Ohmmeter | ๓๙ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๖ แสดง Staircase Ramp DMM | ๔๐ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๗ แสดง Linear Ramp DMM | ๔๑ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๘ แสดง Dual Slope Integrating Technique DMM | ๔๑ |
| รูปภาพที่ ๒-๑๙ แสดง D.C. Resistance Bridge | ๔๒ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๐ แสดงวงจร Wheatstone bridge | ๔๓ |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปภาพที่ ๒-๒๑ แสดงวงจร Kelvin Bridge | ๔๓ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๒ แสดงวงจร D.C. Ratio Bridge | ๔๔ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๓ แสดง Equivalent Circuit ของ Capacitor | ๔๔ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๔ แสดง A.C. Bridge | ๔๕ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๕ แสดง Desauty (Series Capacitance) Bridge | ๔๖ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๖ แสดงส่วนประกอบของ Schering Bridge | ๔๖ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๗ แสดง Equivalent Circuit ของ Inductor | ๔๗ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๘ แสดงส่วนประกอบของ Maxwell Bridge | ๔๘ |
| รูปภาพที่ ๒-๒๙ แสดงส่วนประกอบของ Hay Bridge | ๔๘ |
| รูปภาพที่ ๓-๑ Fundamental Oscillator Signal Generator | ๕๐ |
| รูปภาพที่ ๓-๒ Heterodyne Oscillator Signal Generator | ๕๑ |
| รูปภาพที่ ๓-๓ Multiplied Oscillator Signal Generator | ๕๑ |
| รูปภาพที่ ๓-๔ Divider Oscillator Signal Generator | ๕๒ |
| รูปภาพที่ ๓-๕ แสดงหลักการทำงานของ Synthesized Oscillator | ๕๒ |
| รูปภาพที่ ๓-๖ แสดง Amplitude Modulation | ๕๔ |
| รูปภาพที่ ๓-๗ แสดงการ Modulation แบบ A.M. | ๕๕ |
| รูปภาพที่ ๓-๘ แสดงสัญญาณ F.M. | ๕๕ |
| รูปภาพที่ ๓-๙ แสดงอัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ F.M. | ๕๖ |
| รูปภาพที่ ๔-๑ แสดง Block Diagram ของออสซิลโลสโคป | ๕๗ |
| รูปภาพที่ ๔-๒ แสดงส่วนต่าง ๆ ของหลอด CRT | ๕๘ |
| รูปภาพที่ ๔-๓ ความถี่ที่ต้องการวัดใน ๑ หน่วยเวลา | ๕๙ |
| รูปภาพที่ ๔-๔ แสดงการวัดเฟสของสัญญาณสองสัญญาณ | ๖๐ |
| รูปภาพที่ ๔-๕ แสดงการวัดเฟสด้วยวิธีใช้ Dual Trace | ๖๑ |
| รูปภาพที่ ๔-๖ แสดงรูปที่ปรากฏบนจอออสซิลโลสโคปแบบต่างๆ | ๖๒ |
| รูปภาพที่ ๔-๗ แสดงสัญญาณ Pulse ซึ่งใช้เป็น Signal Generator | ๖๒ |
| รูปภาพที่ ๔-๘ แสดงรูปการ MOD แบบ AM. | ๖๓ |
| รูปภาพที่ ๔-๙ แสดงลักษณะรูปร่างของ Pulse | ๖๓ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๐ แสดงวงจรสมมูลของ Input ของออสซิลโลสโคป (a) เมื่อต่อร่วมกับวงจรภายนอก (b) | ๖๔ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๑ แสดงการต่อ R เข้าในวงจร เพื่อลดการ Loading | ๖๕ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๒ รูปแสดงภายใน Probe x ๑๐ | ๖๕ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๓ รูปแสดงการปรับ C comp ของ Probe | ๖๕ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๔ Block diagram ของ digital storage oscilloscope | ๖๖ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๕ วงจร Sample and hold | ๖๗ |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปภาพที่ ๔-๑๖ วงจร Analog-to-digital | ๖๗ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๗ ผลของ Vertical resolution ต่อรูปของสัญญาณ | ๖๘ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๘ แสดง Sine wave ที่ถูกสุ่มด้วยอัตราความเร็ว ๒ เท่าของความถี่ | ๖๙ |
| รูปภาพที่ ๔-๑๙ สัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยอัตราเร็ว ๓ เท่า | ๖๙ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๐ สัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยอัตราเร็ว ๕ เท่า | ๗๐ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๑ สัญญาณที่เกิดจากผลของการสุ่มสัญญาณซ้ำเกินไป | ๗๐ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๒ Real Time Sampling | ๗๑ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๓ Sequential Sampling | ๗๑ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๔ Random Sampling | ๗๒ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๕ แสดงรูป Sine Wave with Super-Imposed Glitch | ๗๓ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๖ A.M. Signal | ๗๔ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๗ Roll Mode | ๗๔ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๘ Glitch Triggering | ๗๕ |
| รูปภาพที่ ๔-๒๙ Event Delay | ๗๕ |
| รูปภาพที่ ๔-๓๐ N-cycle Triggering | ๗๖ |
| รูปภาพที่ ๔-๓๑ Statistical Format Measurement | ๗๗ |
| รูปภาพที่ ๔-๓๒ Envelope Mode | ๗๘ |
| รูปภาพที่ ๔-๓๓ สัญญาณที่แสดงในรูป FFT | ๗๙ |
| รูปภาพที่ ๔-๓๔ รูปแสดง ADAPTER และสายออสซิลโลสโคป | ๘๐ |
| รูปภาพที่ ๕-๑ การวัดความถี่แบบอ้อม | ๘๑ |
| รูปภาพที่ ๕-๒ การวัดแบบเปลี่ยนความถี่ | ๘๒ |
| รูปภาพที่ ๕-๓ การวัดแบบเปรียบเทียบ | ๘๓ |
| รูปภาพที่ ๕-๔ Totalizing Function | ๘๔ |
| รูปภาพที่ ๕-๕ Frequency Function | ๘๔ |
| รูปภาพที่ ๕-๖ Period Function | ๘๕ |
| รูปภาพที่ ๕-๗ Ratio Function | ๘๕ |
| รูปภาพที่ ๕-๘ Scaler Function | ๘๖ |
| รูปภาพที่ ๕-๙ Time Interval Function | ๘๖ |
| รูปภาพที่ ๖-๑ Absorption Cavity Connection For Frequency Measurement | ๙๓ |
| รูปภาพที่ ๖-๒ Transmission Type Wave Meter | ๙๓ |
| รูปภาพที่ ๖-๓ Oscilloscope CRT. Spectrum Analyzer CRT. | ๙๔ |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปภาพที่ ๖-๔ Directional Couplers | ๙๕ |
| รูปภาพที่ ๖-๕ Resistive Card Attenuator | ๙๖ |
| รูปภาพที่ ๖-๖ Variable Flap Attenuator | ๙๗ |
| รูปภาพที่ ๖-๗ Resistive "T" Network Attenuators | ๙๘ |
| รูปภาพที่ ๖-๘ High-Frequency Attenuator with Film Coated Center Rod | ๙๘ |
| รูปภาพที่ ๗-๑ แรงเค้นที่กระทำต่อวัตถุ | ๑๐๐ |
| รูปภาพที่ ๗-๒ แรงเครียดกระทำต่อวัตถุ | ๑๐๑ |
| รูปภาพที่ ๗-๓ แรงบิดที่กระทำต่อวัตถุ | ๑๐๒ |
| รูปภาพที่ ๗-๔ เครื่องมือใช้วัดแรงบิด | ๑๐๒ |
| รูปภาพที่ ๗-๕ Torsion or Fixion Bar Torque Wrench | ๑๐๓ |
| รูปภาพที่ ๗-๖ Dial Type Torque Wrench | ๑๐๓ |
| รูปภาพที่ ๗-๗ Digital Type Torque Wrench | ๑๐๓ |
| รูปภาพที่ ๗-๘ Dial Type Torque Screwdriver | ๑๐๔ |
| รูปภาพที่ ๗-๙ Digital Type Torque Screwdriver | ๑๐๔ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๐ Graduated Torque Wrench | ๑๐๔ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๑ Non-Graduated Torque Wrench | ๑๐๔ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๒ Graduated Torque Screwdriver | ๑๐๕ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๓ Non-Graduated Torque Screwdriver | ๑๐๕ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๔ หลักการของเทอร์โมคัปเปิล | ๑๐๗ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๕ การรักษา Reference Junction ด้วยน้ำแข็งบริสุทธิ์ | ๑๐๗ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๖ การรักษา Reference Junction ด้วยวงจรไฟฟ้าแบบ Bridge | ๑๐๗ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๗ แสดงค่าความกดดันของบรรยากาศ | ๑๑๑ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๘ การหาค่าความดัน | ๑๑๒ |
| รูปภาพที่ ๗-๑๙ สลิ่งไฮโครมิเตอร์ (Sling Psychrometer) | ๑๑๔ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๐ การหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของวัตถุ | ๑๑๗ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๑ เครื่องวัดแบบ เอ.ซี. โวลท์มิเตอร์ | ๑๑๗ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๒ หลักการเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ | ๑๑๘ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๓ แสดงถึงการวัดอัตราการไหลโดยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า | ๑๑๙ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๔ แสดงถึงการวัดอัตราการไหลโดยลูกกลอยในหลอดแก้ว | ๑๒๐ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๕ การอ่านค่าอัตราการไหลของลูกบอล | ๑๒๐ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๖ แสดงการวัดอัตราการไหลใช้หลักการซึ่งน้ำหนักของไหล | ๑๒๑ |
| รูปภาพที่ ๗-๒๗ แสดงถึงแสงเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า | ๑๒๒ |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

-

บทที่ ๑

แนวความคิดเกี่ยวกับมาตรวิทยาเบื้องต้น

๑.๑ บทนำและประวัติความเป็นมา

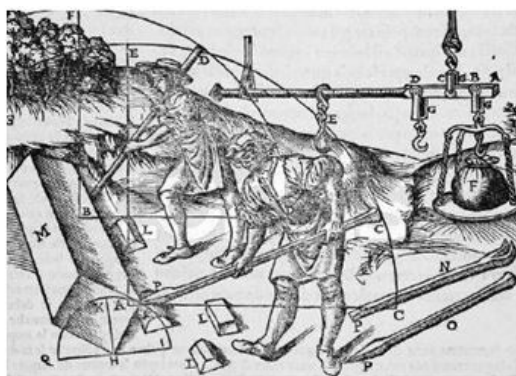
๑.๑.๑ บทนำ

การวัด (Measurement) คือ กลุ่มปฏิบัติการที่มีความมุ่งหมาย เพื่อการตัดสินค่าของปริมาณอันหนึ่ง (Set of operations having the object of determining a value of a quantity., VIM 2.1)

การวัดถือเป็นทั้ง “ศาสตร์และศิลป์” ควบคู่กันไป ด้วยการวัดต้องอาศัยหลักการและกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ทางฟิสิกส์และวิชาคำนวณเข้ามาช่วยในการวัด รวมทั้งการวัดเป็นเรื่องที่จะต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์เข้ามาช่วยในการตัดสินใจ ในบางครั้งการวัดจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสิ่งที่ไม่มีความแน่นอนให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ซึ่งจะต้องมีการผสมผสานกันอย่างดีระหว่างศาสตร์และศิลป์ เพื่อให้ประสบผลสำเร็จใช้เป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ต่อไป ดังนั้น จะเห็นได้ว่า การวัดนับเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งในสาขางานทุกแขนง เริ่มตั้งแต่ในชีวิตประจำวัน การซื้อขายแลกเปลี่ยนผลผลิต สินค้าอุปโภค บริโภค งานก่อสร้าง งานคมนาคมขนส่ง การติดต่อสื่อสาร จากระดับต้นไปจนถึงงานที่ต้องใช้เทคโนโลยีในระดับสูง

วิทยาศาสตร์ของการวัด (Metrology) นั้นเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่มีความคงอยู่ตลอดมาควบคู่กับประวัติศาสตร์ของมนุษยชาติ ตั้งแต่ในสมัยเริ่มแรกจนกระทั่งถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นสมัยที่มนุษย์มีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ศาสตร์แห่งการวัดเป็นศาสตร์ที่ไม่มีวันสิ้นสุด ยิ่งมนุษย์ต้องการพัฒนาเทคโนโลยีให้ก้าวไกลและสูงล้ำขึ้นเท่าใด ศาสตร์แห่งการวัดยิ่งต้องได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้ทันสมัยและใช้เทคโนโลยีสูงกว่างานนั้น ๆ มากยิ่งขึ้นหลายเท่า

นับแต่กาลโบราณยุคต้น ๆ ในประวัติศาสตร์ ได้มีการพัฒนาศาสตร์ของการวัดตั้งแต่การใช้พื้นฐานคือใช้องค์ประกอบจากธรรมชาติ จากชิ้นส่วนร่างกายมนุษย์ จากพืชพันธุ์ จากสิ่งที่มีมนุษย์ประดิษฐ์คิดค้นขึ้นเท่าที่สติปัญญาของมนุษย์และเทคโนโลยีในแต่ละยุคสมัยจะสามารถเอื้ออำนวยสิ่งเหล่านี้เป็นตัวกำหนดระบบการวัดที่สามารถคงอยู่และใช้มาจวบจนปัจจุบันโดยไม่เสื่อมสลายไปกับกาลเวลา หากแต่ได้รับการพัฒนาให้มีความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยยังคงไว้ซึ่งความหมายหรือนิยามที่มาจกธรรมชาติ



ปัจจุบันระบบของงานด้านมาตรวิทยาได้เข้ามามีบทบาทและเป็นตัวกำหนดมาตรฐานในสังคมศักยภาพขององค์กรในระดับโลก ว่าแต่ละองค์กร แต่ละสถาบัน ตลอดจนจนประเทศนั้น ๆ มีคุณภาพเป็นมาตรฐานที่น่าเชื่อถือได้ในระดับใด สามารถแข่งขันหรืออยู่ร่วมกับสังคมโลกได้ดีขนาดไหน ทั้งนี้ได้มีการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ ขึ้นมาเป็นกฎเกณฑ์สากลที่ทุกประเทศต้องยอมรับและปฏิบัติในแนวทางเดียวกัน เช่น มาตรฐาน ISO, ANSI, JIS, DIN เป็นต้น

หน่วยงาน องค์กรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิต งานค้นคว้าวิจัยทางวิทยาศาสตร์ งานวิศวกรรม งานด้านการแพทย์ และอื่น ๆ ที่ต้องใช้เทคโนโลยีมาเป็นตัวกำหนดและประเมินคุณภาพของงาน จึง

จำเป็นต้องมีหน่วยงานสำหรับตรวจสอบคุณภาพ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลงานเหล่านั้นถูกต้องตามข้อกำหนดมาตรฐานอย่างแท้จริง ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ ประสิทธิภาพ ตลอดจนสมรรถนะ จึงจำเป็นต้องได้รับการตรวจรับรองถึงความถูกต้อง แม่นยำ และน่าเชื่อถือได้ ในรูปแบบที่ปรากฏให้เห็นด้วยสายตา อันเป็นที่มาของห้องปฏิบัติการสอบเทียบมาตรฐานต่าง ๆ ทั้งในระดับหน่วยงาน องค์กร ประเทศ จนถึงระดับนานาชาติ

๑.๑.๒ ประวัติความเป็นมาระบบมาตรวิทยา

การวัด (Measurement) มีประวัติความเป็นมากว่า ๓,๐๐๐ ปีก่อนคริสต์ศักราช และได้มีวิวัฒนาการควบคู่มากับความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และวัฒนธรรมของมนุษยชาติมาอย่างต่อเนื่อง การวัดจึงถือได้ว่าเป็นพื้นฐานของวิทยาศาสตร์ เป็นภาพที่สามารถใช้สื่อสารเพื่อบอกขนาด ปริมาณ ตำแหน่ง สภาวะ และเวลา เป็นต้น ซึ่งวิชาที่ว่าด้วยศาสตร์แห่งการวัดนี้เรียกชื่อเฉพาะว่า “มาตรวิทยา (Metrology)” จุดมุ่งหมายที่สำคัญของการวัด ได้แก่ การตัดสินปริมาณวัดต่าง ๆ ด้วยความแม่นยำ (Precision) และถูกต้อง (Accuracy) เพื่อความเป็นธรรมเชิงพาณิชย์ที่มีมาในอดีต ดังจะเห็นได้จากการกำหนดหน่วยวัด มาตรการชั่ง ตวง วัด ที่แต่ละประเทศมีหน่วยวัดของตนอยู่และต่อมาได้มีการค้าขายระหว่างกันมากขึ้นจึงได้กำหนดหน่วยวัดที่เป็นสากล

ในระยะแรกมนุษย์รู้จักวิธีการวัดอย่างง่าย ๆ เพื่อใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น การวัดด้วยฝ่ามือ ฝ่าเท้า เป็นต้น แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับกันมากนัก และยังไม่สามารถหาหน่วยวัดที่สามารถใช้งานร่วมกันได้ เมื่อ ๓,๐๐๐ ปีก่อนคริสตกาล ฟาโรห์ KHUFU แห่งอียิปต์ ได้คิดกำหนดความยาวมาตรฐานขึ้นใช้เพื่อการก่อสร้างปิรามิดเป็นครั้งแรก โดยใช้ความยาวจากข้อศอกถึงปลายนิ้วกลางกับอีกหนึ่งฝ่ามือของพระองค์เป็นความยาวมาตรฐาน และถูกวัดลงบนหินแกรนิตสีดำที่เรียกว่า Royal Egyptian Cubit ดังปรากฏตามข้อความของศาสตราจารย์ ดร. Mohamed El-Fiki ประธาน Egyptian National Institute for Standards, Alexandria, Egypt ; 1996 ที่รายงานต่อ Ed Nemeroff รองผู้อำนวยการ (Vice President) NCSL (national Conference of Standards Laboratories) ความว่า

“It is believed that about 3,000 years B.C., the Egyptian unit of length was established. The royal Egyptian cubit was decreed to be equal to the length of the forearm from the bent elbow to the tip of extended middle finger plus the width of palm of the Pharaohs ruling at that time.

The Royal Cubit Master was carved from a block of black granite to endure for all time. Workers building tombs, temples and pyramids were supplied with cubit sticks made of wood or granite.

The royal architect or foreman of each construction site was responsible for maintaining and transferring the unit of length to the workers' cubit sticks. It was required that the cubit sticks be brought at full moon to be compared to the Royal Cubit Master. Failure to do so was punishable by death.

Though the punishment prescribed was severe, the ancient Egyptians had anticipated the spirit of the present day system of legal metrology, standards, traceability and calibration recall.

With this standardization and uniformity of length, they achieved amazing accuracy. The Great Pyramid of Giza was constructed to stand roughly 756 feet or 9,069.4 inches. Using cubit sticks, the builder were within 4.5 inches, an accuracy of 0.05 % as well as the right angle of 90 degree were within 12 second, an accuracy of 0.004 %.”

มนุษย์ได้ใช้เวลากว่า ๕,๐๐๐ ปีในการเกี่ยวข้องกับการวัดตั้งแต่สมัยแห่งหินแกรนิตมาตรฐาน จนกระทั่งปี ค.ศ.๑๙๐๐ จึงได้มีการยอมรับมาตรฐานความยาว โดยกำหนดให้หน่วยมาตรฐานความยาวเป็น เมตร ขึ้นใช้งานและได้ใช้กันต่อมาจนถึงปัจจุบัน

เมื่อประเทศสหรัฐอเมริกาแยกตัวเป็นอิสระจากประเทศอังกฤษเรื่องการวัดในอเมริกาไม่มีปัญหา แม้จะมีรัฐต่าง ๆ อยู่มากมาย เนื่องจากยังคงใช้ระบบหน่วยของการวัดของประเทศแม่แบบ (อังกฤษ) ซึ่งเป็นประเทศที่มีอาณานิคมอยู่ทั่วโลก ดังนั้นระบบมาตรฐานการวัดแบบอังกฤษยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจากอดีต จนถึงปัจจุบัน และถือว่าเป็นระบบที่มีมาตรฐานที่สุทธระบบหนึ่งของโลก จะเห็นได้จากความยาว ๑ หลาของกษัตริย์ เฮนรี่ที่ ๒ ในอดีต กับความยาว ๑ หลาในปัจจุบัน ต่างกันเพียง ๑/๑,๐๐๐ หลา และน้ำหนัก ๑ ปอนด์ของราชินี อลิซาเบธที่ ๑ มีค่าเดียวกับน้ำหนัก ๑ ปอนด์ในปัจจุบัน

แต่ในทวีปยุโรป ก่อนปี ค.ศ.๑๗๙๐ ไม่มีระบบการวัดเป็นหน่วยเดียวกัน การวัดในทวีปยุโรป นั้นไม่เพียงมีหน่วยต่างกันระหว่างประเทศต่อประเทศเท่านั้น แต่แตกต่างกันแม้กระทั่งในระหว่างเมืองเล็ก ๆ ด้วย เหตุนี้พระเจ้าหลุยส์ที่ ๑๖ จึงได้ออกพระราชบัญญัติเชิญ French Academy of Science ให้มาร่วมประชุมกับ Royal Society of London เรื่องการกำหนดมาตรฐานการ ชั่ง ตวง วัด เมื่อวันที่ ๘ พฤษภาคม ค.ศ.๑๗๙๐ แต่อย่างไรก็ตามอังกฤษไม่ยอมเข้าร่วมประชุมฝรั่งเศสจึงได้ดำเนินการเอง โดยกำหนดมาตราชั่งตวงวัด ให้เป็น มาตรฐานและยอมรับได้ใช้ร่วมกันเรียกว่า “ระบบเมตริก” ซึ่งระบบเมตริกนี้เรียกชื่อย่อตามหน่วยว่า MKS

ต่อมาในปี ค.ศ.๑๙๓๐ Giorgi วิศวกรชาวอิตาลีได้เสนอหน่วยไฟฟ้าแม่เหล็ก (Permeability, μ_0) ว่าเท่ากับ 10^{-7} แทนที่จะเป็น 1 ซึ่งหน่วยทางแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถเชื่อมต่อกับหน่วยทางกลของระบบ MKS โดยใช้หน่วยแม่เหล็กไฟฟ้าตัวหนึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานตัวที่สี่ เรียกว่า Giorgi-MKS

ระบบ Giorgi-MKS นี้ได้มีการยอมรับจาก คณะกรรมาธิการเทคนิคด้านไฟฟ้าสากล (IEC, International Electrotechnical Commission) ในปี ค.ศ.๑๙๓๕ และภายหลังจากสงครามโลกครั้งที่ ๒ (ค.ศ. ๑๙๔๖) ระบบนี้ได้ถูกจัดตั้งโดย IEC ได้ตกลงถือเอา แอมแปร์ เป็นหน่วยพื้นฐานตัวที่สี่อีกหน่วยหนึ่ง (ภายใต้ชื่อว่า ระบบ MKSA)

ค.ศ.๑๙๔๘ การประชุมการวัดนานาชาติ (International Conference on Weight and Measures) ได้ยอมรับนิยามของแอมแปร์และได้ตกลงถือเอาแอมแปร์เป็นหน่วยพื้นฐานอีกหน่วยหนึ่ง เรียกว่า MKSA

การประชุมมาตรวิทยานานาชาติในปี ค.ศ.๑๙๕๔ มีการตกลงเรียกชื่อระบบใหม่นี้ในภาษา ฝรั่งเศสว่า Systeme International D' Units วิทยาศาสตร์ของการวัดทุกสาขาได้เจริญก้าวหน้ามาเป็นลำดับ ได้มีการประชุมระหว่างประเทศเพื่อจัดทำข้อตกลงร่วมกันในการกำหนดมาตรฐานของการวัดขึ้นหลายครั้งจนในปี ค.ศ.๑๙๗๑ จากการประชุมของคณะกรรมการมาตร ชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ ครั้งที่ ๑๔ ได้กำหนดหน่วยทาง เคมีของสาร (โมล) เพิ่มในหน่วยพื้นฐานและในที่ประชุม ๆ ได้ตกลงร่วมกันกำหนดหน่วยวัดพื้นฐาน (International System Units) เพื่อใช้เป็นมาตรฐานสากลมีชื่อย่อว่า SI UNITS ซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานที่ใช้กันมา จนถึงทุกวันนี้

๑.๑.๓ มาตรวิทยาเชิงพาณิชย์ของประเทศไทย

สำหรับประเทศไทยในสมัยรัชกาลที่ ๕ พ.ศ.๒๔๔๐ กระทรวงเกษตรราธิการได้คิดจะวางระเบียบการชั่งตวงวัดให้เป็นหลักเกณฑ์ที่แน่นอนแต่ไม่ประสบผลสำเร็จ ต่อมากระทรวงเกษตรราธิการได้ร่าง พ.ร.บ.อัตราถั่งและทะนาน ร.ศ.๑๑๙ (พ.ศ.๒๔๔๕) ขึ้นเป็นฉบับแรก แต่มีการแก้ไขเพิ่มการชั่งและการวัดเข้าด้วย เป็นร่าง พ.ร.บ.วัดตวงและชั่ง ร.ศ.๑๑๙ ขึ้นใหม่ โดยทรงพระกรุณาโปรดเกล้าให้ตั้งคณะกรรมการเพื่อพิจารณาว่า

การใช้มาตราชั่งตวงวัดระบบใดจะเหมาะสม คณะกรรมการทำรายงานทูลเกล้า ฯ ถวายเมื่อ พ.ศ.๒๕๔๘ ว่าควรใช้ระบบเมตริก เรื่องได้ชะงักไปอีกครั้ง

พ.ศ.๒๕๕๒ สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (BIPM) ซึ่งตั้งขึ้นใน พ.ศ.๒๔๑๘ ได้มีหนังสือเชิญให้รัฐบาลไทยเข้าเป็นสมาชิก พระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ทรงแต่งตั้งคณะ กรรมการขึ้นพิจารณา คณะกรรมการได้พิจารณารายงานและนำทูลเกล้าถวายเมื่อเดือน กันยายน ๒๕๕๔ ว่าสมควรเข้าเป็นสมาชิก ได้มีพระบรมราชานุมัติเมื่อเดือน พฤศจิกายน ๒๕๕๔ ประเทศไทยได้แจ้งความจำนงไปยังสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ และประเทศไทยเป็น ๑ ใน ๔๘ ประเทศแรกในโลกที่ได้เข้าเป็นสมาชิกใช้การวัดระบบเมตริก (Member States of the Meter Convention) ของสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศเมื่อ พ.ศ.๒๕๕๕ และมีการประกาศใช้เป็นทางการโดย ๔๘ ประเทศในปี พ.ศ.๒๕๖๔

เมื่อตั้งสภาเผยแพร่พาณิชย์ขึ้นในกระทรวงพาณิชย์ สภานี้ได้มีการโอนงานจากกระทรวงเกษตรธิการไปขึ้นกับกระทรวงพาณิชย์เมื่อ พ.ศ.๒๕๖๓ และเมื่อประเทศไทยได้ร่าง พ.ร.บ.ชั่งตวงวัด พ.ศ.๒๕๖๖ กับกฎกระทรวง ฉบับที่ ๑ พ.ศ.๒๕๖๖ และส่งให้สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศช่วยตรวจพิจารณา หลังจากนั้นได้ประกาศใช้ตั้งแต่วันที่ ๑๗ ธ.ค.๒๕๖๖ และนำลงในราชกิจจานุเบกษาเมื่อ ๒๗ ธ.ค.๒๕๖๖ ซึ่งเป็นการออกกฎหมายเกี่ยวกับมาตรฐานการวัดครั้งแรก ดังคำอารัมภบทของ พ.ร.บ.ชั่งตวงวัด ดังนี้

"พระบาทสมเด็จพระรามาธิบดีศรีสินทรมหาวชิราวุธพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัวทรงพระราชดำริว่า พระราชอาณาจักรสยามในเวลานี้ยังมีวิธีชั่งตวงวัดเป็นสมานรูป ซึ่งกำหนดเป็นมาตราและบัญญัติเป็นกฎหมาย สมควรจะมีวิธีเช่นที่กล่าวนี้ขึ้น

อนึ่งวิธีชั่งตวงวัดของประเทศสยามนั้น ควรอนุโลมตามวิธีแห่งนานาประเทศ สุดแต่ว่าจะสมกับความประสงค์ภายในพระราชอาณาจักรและวิธีเมตริกนั้นปรากฏว่าได้ใช้กันไพศาลแล้ว จึงมีพระราชโองการดำรัสเหนือเกล้า ฯ สั่งว่า วิธีชั่งตวงวัดของประเทศสยามนั้นให้เป็นวิธีเมตริก"

ในเวลาต่อมาจึงประกาศใช้ พ.ร.บ.แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.๒๕๗๖ เรื่องคำจำกัดความของจำนวนหน่วย และ พ.ศ.๒๕๗๗ เรื่องการให้สินบนแก่ผู้จับ นำจับ หรือนำความมาแจ้งต่อเจ้าหน้าที่งานเรื่องผู้ทำผิดพระราชบัญญัติ และกฎกระทรวง ฉบับที่ ๒, ๓, ๔ และ ๕

จาก พ.ร.บ.ชั่งตวงวัด พ.ศ.๒๕๖๖ ได้กำหนดให้กระทรวงพาณิชย์เป็นผู้เก็บและบำรุงรักษามาตรฐานทางมาตรวิทยาของประเทศเฉพาะทางด้านชั่ง ตวง และวัด อันได้แก่ กิโลกรัม ลิตร และเมตร นับต่อจากนั้นนับครั้งศตวรรษ เนื้อหาของกฎหมายแม่บทฉบับดังกล่าวก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย ขณะที่ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมากมายนับหมื่นนับล้านเท่า

พ.ศ.๒๕๒๗ กรมทะเบียนการค้าได้ยกร่าง พ.ร.บ.มาตราชั่งตวงวัดขึ้นใหม่และมีการพิจารณา ทบทวนอีกหลายครั้ง จนกระทั่งปี พ.ศ.๒๕๓๕ รัฐบาลได้เสนอร่าง พ.ร.บ.ต่อรัฐสภา และร่าง พ.ร.บ.ฉบับนี้ได้รับการพิจารณาจากรัฐสภาอีกหลายชุด จนในที่สุดก็ผ่านออกมาเป็นกฎหมายในปี พ.ศ.๒๕๔๒ เรียกว่า "พ.ร.บ.มาตราชั่งตวงวัด พ.ศ.๒๕๔๒" อย่างไรก็ตาม พ.ร.บ.มาตราชั่งตวงวัดมีวัตถุประสงค์เพื่อคุ้มครองผู้บริโภคเป็นประการสำคัญ มีเนื้อหาสาระไม่เพียงพอต่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หรือการผลิตของประเทศเป็นส่วนรวมในปัจจุบัน

๑.๑.๔ มาตรวิทยาเชิงวิทยาศาสตร์ของประเทศไทย

ความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาระบบมาตรวิทยาเพื่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี นอกเหนือจาก พ.ร.บ.มาตราชั่งตวงวัด เห็นได้ชัดเจนจาก

๑.๑.๔.๑ การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในศตวรรษที่ ๒๐ เป็นไปอย่างรวดเร็ว

๑.๑.๔.๒ การส่งสินค้าออกถูกนำมาใช้เป็นมาตรการสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศโดยเฉพาะหลังสงครามโลกครั้งที่ ๒ ทำให้การแข่งขันเชิงคุณภาพและเทคโนโลยีของสินค้าเป็นไปอย่างรุนแรง

๑.๑.๔.๓ คุณภาพสินค้าเข้าใจได้และยอมรับได้โดยวิธีวัดวิเคราะห์ ทดสอบทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งยอมรับเป็นมาตรฐานสากลเท่านั้น

๑.๑.๔.๔ มีการออก พ.ร.บ. นอกเหนือจาก พ.ร.บ. มาตรการช่วงตวงวัด ซึ่งจำเป็นต้องใช้มาตรฐานการวัดปริมาณทางวิทยาศาสตร์ ใช้อ้างอิงเพื่อให้การดำเนินการตาม พ.ร.บ. ได้ผลและเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล เช่น พ.ร.บ. ควบคุมมาตรฐานซึ่งวัตถุ พ.ศ. ๒๔๘๓, พ.ร.บ. สินค้าขาออก พ.ศ. ๒๕๐๓, พ.ร.บ. ยา พ.ศ. ๒๕๑๐, พ.ร.บ. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๑๑, พ.ร.บ. ปุ๋ย พ.ศ. ๒๕๑๘ และ พ.ร.บ. การส่งออก ไปนอกและการนำเข้ามาในราชอาณาจักรซึ่งสินค้า พ.ศ. ๒๕๒๒

๑.๑.๔.๕ ประเทศต่าง ๆ ต้องการขจัดปัญหาความขัดแย้งในเรื่องผลการวัด ทดสอบสินค้าระหว่างประเทศ ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญทางการค้า (Technical Barrier to Trade) จึงได้จัดให้มีการประชุมเพื่อแก้ไขปัญหาอย่างกว้างขวาง เช่น ในภูมิภาคเอเชียและแปซิฟิก ทำให้มีโครงการร่วมภูมิภาคเอเชียและแปซิฟิกว่าด้วยมาตรวิทยา (Asia Pacific Metrology Program, APMP) การประชุมการรับรองห้องปฏิบัติการระหว่างประเทศ (International Laboratory Conference, ILAC) และมีการสรุปอย่างชัดเจนว่าจะต้องมีระบบการวัดปริมาณที่หรือระบบมาตรวิทยาสอบย้อนกลับได้ถึงมาตรฐานระหว่างประเทศเท่านั้นที่จะทำให้ข้อตกลงทางการค้าและการยอมรับคุณภาพสินค้าเป็นไปได้

๑.๑.๔.๖ อุตสาหกรรมของประเทศขยายตัวอย่างรวดเร็ว เริ่มตั้งแต่แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ ๕ (๒๕๒๕-๒๕๒๙) ซึ่งรัฐมีนโยบายผลิตเพื่อทดแทนการนำเข้า และโดยเฉพาะตั้งแต่แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ ๖ (๒๕๓๐-๒๕๓๔) เป็นต้นมา รัฐมีนโยบายส่งเสริมการส่งออก ทำให้ประเทศเปลี่ยนสภาพจากประเทศเกษตรกรรมมาเป็นประเทศอุตสาหกรรม

๑.๑.๔.๗ คุณภาพชีวิต คุณภาพสิ่งแวดล้อมในประเทศ จะต้องมีการแก้ไขโดยใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี เกณฑ์คุณภาพเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยการวัดปริมาณทางวิทยาศาสตร์ ฯลฯ

เหตุผลความจำเป็นที่ต้องพัฒนาระบบการวัด ทดสอบทางวิทยาศาสตร์ หรือระบบมาตรวิทยาข้างต้นประกอบกับพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีที่ค่อนข้างต่ำ แต่เดิมเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้เห็นได้ชัดถึงความจำเป็นที่จะต้องสร้างพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ขึ้นมาใหม่ทั้งหมด ถ้าประเทศต้องการที่จะต่อสู้กับตลาดโลก และยืนหยัดยั่งยืนทัดเทียมกับประเทศอื่น ๆ ทางเศรษฐกิจและสังคม

ด้วยเหตุผลการพัฒนาประเทศเพื่อส่งเสริมการส่งออกเป็นประการสำคัญ ค.ร.ม. มีมติเมื่อวันที่ ๕ ก.พ. ๒๕ ให้ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ดำเนินการตามโครงการที่สนับสนุนการส่งออก ๑ โครงการได้แก่ โครงการพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ”

พ.ศ. ๒๕๒๙ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการได้ดำเนินการเพื่อสนองตอบมติ ค.ร.ม. ดังกล่าว โดยมีการเสนอให้มีการแต่งตั้งคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยมาตรวิทยาและการรับรองมาตรฐานห้องปฏิบัติการขึ้น โดยมีปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ ฯ เป็นประธาน เพื่อดำเนินการให้การวัด วิเคราะห์ ทดสอบ โดยเฉพาะให้แน่ใจถึงความถูกต้องของเครื่องมือวัด และความถูกต้อง ความเชื่อถือได้ ความไว้วางใจได้ของห้องปฏิบัติการ

คณะกรรมการแห่งชาติได้ดำเนินการให้มีการเก็บรักษามาตรฐานแห่งชาติชั้นมูลฐานทางด้านวิทยาศาสตร์ขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อ ๑๓ ม.ค. ๓๐ ให้แบ่งหน้าที่ความรับผิดชอบในการเก็บและบำรุงรักษา

มาตรฐานแห่งชาติให้แก่สองหน่วยงานที่ปฏิบัติงานด้านมาตรฐานทางวิทยาศาสตร์ คือ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วศ.) ให้รับผิดชอบมาตรฐานชั้นปฐม (ชั้นมูลฐาน) และมาตรฐานชั้นที่ ๒ ด้าน มวล แรง ความดัน ความยาว เสียง และวัสดุอ้างอิง รวมทั้งการรับรองห้องปฏิบัติการด้วย

ในส่วนของ การรับรองห้องปฏิบัติการนั้น สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมซึ่งให้การรับรองห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์อยู่แล้ว ประกอบกับเป็นสมาชิกผู้แทนองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO/IEC) ขอรับหน้าที่การดำเนินการรับรองห้องปฏิบัติการไปดำเนินการ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) รับผิดชอบมาตรฐานชั้นปฐมและมาตรฐานชั้นที่ ๒ ด้าน ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ อุณหภูมิ แสงและรังสี (จากอัลตราไวโอเลตถึงอินฟราเรด) ในขณะที่ยังมีมาตรฐานทางมาตรวิทยาอื่น ๆ อีกที่ยังไม่มีการแบ่งหน้าที่ความรับผิดชอบอย่างเป็นทางการ เช่น กัมมันตภาพรังสี ความชื้น เวลาและความถี่ เป็นต้น ทำให้เกิดความสับสนในการปฏิบัติงาน

อย่างไรก็ดีการรักษามาตรฐานแห่งชาติด้านการวัดปริมาณให้อยู่ในระดับสอบย้อนกลับได้ถึงมาตรฐานระหว่างประเทศเป็นเรื่องยุ่งยาก ต้องอาศัยความพยายามและการลงทุนค่อนข้างสูงโดยต้องอาศัย บุคลากร (นักวิทยาศาสตร์ด้านมาตรวิทยาที่มีความรู้ความสามารถและจำนวนเพียงพอ) ห้องปฏิบัติการด้านมาตรวิทยาซึ่งสามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมได้ตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการอ้างอิง มาตรฐานแห่งชาติ การทำการวิจัย การยอมรับซึ่งกันและกันในผลการตรวจสอบและการรับรอง (MRA: Mutual Recognition Agreement) การทำการทดสอบความชำนาญ (PT, Proficiency Test) กับห้องปฏิบัติการมาตรฐานระหว่างชาติเป็นประจำ

การที่ วศ. และ วท. ร่วมกันรับผิดชอบมาตรฐานแห่งชาติและบริการสอบเทียบนั้นทำได้ชั่วคราวและมีขอบเขตจำกัด เนื่องจากต้องมีการกิจอื่น ๆ ที่ต้องรับผิดชอบอีกมาก ยังห่างไกลจากความต้องการของประเทศในปัจจุบัน และประมาณการได้ว่าจะมีปัญหาทวีคูณในอนาคต เนื่องจาก

- การขยายตัวของปริมาณการส่งออกสินค้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลายเท่าตัว เมื่อนับตั้งแต่แผนพัฒนาฯ ฉบับที่ ๖

- สินค้าที่ผลิตในประเทศ โดยเฉพาะที่ส่งออก ใช้เทคโนโลยีระดับสูง อุปกรณ์วัดทดสอบในการผลิตยังต้องผ่านการตรวจสอบและสอบเทียบตลอดเวลา

- ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ ทดสอบ รวมถึงห้องปฏิบัติการที่ให้บริการสอบเทียบเครื่องมือมีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

- มีความต้องการในการขอการรับรองห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ ทดสอบ การผลิต การส่งออกตาม ISO/IEC GUIDE 25 (ซึ่งต่อมาได้พัฒนาเป็น ISO/IEC 17025) ตามอนุกรม ISO 9000 และ ISO 14000 (ซึ่งต่อมาได้พัฒนาเป็น ISO 9100 และ ISO 14100) เพิ่มขึ้นมาก ซึ่งต้องมีความมั่นใจในเรื่อง การดูแลหรือสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ทดสอบ ที่สอบย้อนได้ถึงมาตรฐานแห่งชาติ ฯ

๑.๑.๕ โครงการพัฒนาระบบมาตรวิทยาภายใต้กรมวิทยาศาสตร์บริการ

จากมติ ค.ร.ม.ในปี พ.ศ.๒๕๒๘ ได้อนุมัติให้กรมวิทยาศาสตร์บริการ จัดตั้งโครงการพัฒนาระบบมาตรวิทยา ซึ่งเป็นโครงการหนึ่งในโครงการสนับสนุนมาตรการส่งเสริมการส่งออก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บรักษามาตรฐานการวัดปริมาณด้านต่าง ๆ ซึ่งสอบเทียบอ้างอิงได้กับมาตรฐานสากล และให้บริการสอบเทียบความถูกต้องของมาตรฐานและเครื่องมือวัดเครื่องมือทดสอบ ทำการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนามาตรฐานและเทคโนโลยีการวัด ตลอดจนให้คำแนะนำเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการวัดให้กับหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งในภาครัฐและเอกชน

ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ ๗ ในส่วนของแผนพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้มีการพัฒนาในเรื่อง การพัฒนาระบบมาตรวิทยา ในประเด็นที่จะให้มีการเร่งรัดจัดระบบงานด้านมาตรวิทยา เพื่อใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงของชาติและให้เป็นที่เชื่อถือได้ของประเทศ

พ.ศ.๒๕๔๐ รัฐสภาได้ตรา พ.ร.บ.พัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ พ.ศ.๒๕๔๐ เป็นผลให้เกิด สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology (Thailand)) โดยเป็นองค์กรมมหาชน (Public Agency) ภายใต้การกำกับของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้เปิดดำเนินการเมื่อ ๑ มิ.ย.๔๑ โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดตั้ง (มาตรา ๑๓) ดังนี้

- ทำหน้าที่เกี่ยวกับงานวิชาการและงานธุรการให้กับคณะกรรมการ รวมทั้งประสานงานด้านการกำหนดแผนการจัดการและให้ความช่วยเหลือแก่หน่วยงานและบุคคลต่าง ๆ เกี่ยวกับการพัฒนาระบบมาตรวิทยา

- พัฒนาระบบมาตรวิทยา จัดหาและเก็บรักษามาตรฐานแห่งชาติ วัสดุอ้างอิง มาตรฐานของประเทศทุกสาขา เพื่อให้สอดคล้องกับระบบมาตรวิทยาสากล รวมถึงการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัดไปสู่มาตรฐานแห่งชาติ

- ส่งเสริมการประกอบอาชีพด้านมาตรวิทยาและความสามารถของห้องปฏิบัติการ

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้จัดทำแผนแม่บทการพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติขึ้นแล้ว เสนอต่อคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติเพื่อขอความเห็นชอบในเดือน ต.ค.๔๑ และเสนอต่อที่ประชุมคณะกรรมการมาตรวิทยาแห่งชาติในเดือน ธ.ค.๔๑ และนำเสนอ ค.ร.ม.ซึ่งผ่านการเห็นชอบเมื่อ ๑๘ พ.ค.๔๒ ประกอบด้วย แผนงานพัฒนาด้านนโยบาย แผนงานพัฒนาสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ แผนงานพัฒนาเครือข่ายห้องปฏิบัติการสอบเทียบ แผนงานพัฒนาสภาพแวดล้อมเพื่อเอื้อต่อการพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ แผนงานพัฒนากลุ่มผู้ใช้บริการ

นับตั้งแต่ประเทศไทยได้มีการตราพระราชบัญญัติ ชั่ง ตวง วัด ขึ้นเมื่อ พ.ศ.๒๔๖๖ โดยกำหนดให้ระบบเมตริกเป็นระบบการวัดของประเทศ มาตรวิทยาจึงถือได้ว่าเป็นตัวแทนของความรู้ในเชิงลึกถึงการตัดสินใจที่ถูกต้อง โดยการนำเอาองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และความรู้ในเรื่องธรรมชาติ ตลอดจนพฤติกรรมของระบบการวัด มาเป็นเกณฑ์กำหนดของผลการวัด สาขาของมาตรวิทยาจึงครอบคลุมไปทุก ๆ มิติของกิจกรรมทางวิทยาศาสตร์ อันได้แก่ การกำหนดหน่วยวัดขึ้นมาจากรูปร่าง หรือ คำจำกัดความของแต่ละหน่วยวัด การทำให้นิยามเหล่านี้เป็นจริงได้ในทางปฏิบัติ รวมไปถึงการสร้างมาตรฐานการวัดขึ้นมาใช้เป็นตัวแทนของหน่วยวัดนั้น ๆ และสุดท้ายการเชื่อมโยงผลการวัดจากสิ่งที่ถูกต้องไปยังมาตรฐานการวัดเหล่านั้น ในรูปที่เป็นหลักฐานทางเอกสารที่เรียกกันว่า “การสอบกลับได้ของการวัด (Traceability of Measurement)”

๑.๒ ระบบการวัด (Measurement System)

๑.๒.๑ การวัด คือ ปฏิบัติทั้งปวงที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการตัดสินใจของปริมาณ (Set of operations having the object of determining a value of a quantity, VIM ๒.๑) ผลลัพธ์ของการวัดแบ่งเป็นสองส่วน คือส่วนที่ค่าที่วัดได้พร้อมความไม่แน่นอนของค่าวัดที่ได้ส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งคือหน่วยการวัด เช่น ผลของการวัดตุ้มน้ำหนักที่มีค่าที่ระบุ 1 kg คือ ค่าที่ได้จากการวัดของตุ้มน้ำหนัก คือ 1000.001 kg พร้อมค่าความไม่แน่นอนของตุ้มน้ำหนักคือ 1.00kg ซึ่งการรายงานผลการวัดอยู่ในรูป (1000.001 ± 0.001) kg

การวัดเป็นปฏิบัติการทางเทคนิค ที่ต้องปฏิบัติตามวิธีการวัดที่กำหนดขึ้นตอนไว้แล้ว เพื่อการเปรียบเทียบกันระหว่างปริมาณที่ถูกรวบรวมกับปริมาณมาตรฐาน (Standard) ซึ่งเป็นตัวแทนของหน่วยวัด ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดนั่นเอง สำหรับวิธีการวัดและเครื่องมือวัดที่ใช้ก็ควรจะขึ้นอยู่กับระดับของความถูกต้องของการวัดที่ต้องการ รวมทั้งความรู้ความชำนาญในระบบการวัดของผู้ทำการวัดประกอบกัน แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีการตลอดจนผู้มี

ความสามารถเพียงใดก็ไม่สามารถทำให้เกิดความถูกต้องของการวัดได้ตามต้องการ ถ้าเครื่องมือวัดที่ใช้กระบวนการวัดไม่ได้รับการสอบเทียบความถูกต้อง และสอบกลับไปยังมาตรฐานการวัดแห่งชาติ ที่รักษาไว้ โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของแต่ละประเทศ



รูปที่ ๑-๑ เครื่องชั่ง Balance

๑.๒.๒ ระบบการวัดแห่งชาติ

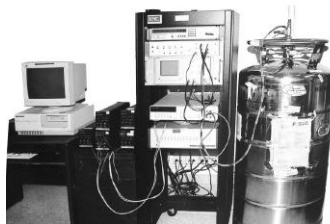
ประเทศไทยมีระบบการวัดที่สอดคล้องกับระบบการวัดแห่งชาติของนานาประเทศ โดยแบ่งระบบการวัดแห่งชาติออกเป็น ๒ ระบบดังนี้

๑.๒.๒.๑ ระบบการวัดแห่งชาติเชิงพาณิชย์หรือเชิงกฎหมาย (Legal Metrology)

เป็นระบบการวัดแห่งชาติที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อรักษาความถูกต้องและเป็นธรรมในการ ชั่ง ตวง วัด ในเชิงพาณิชย์หรือเชิงกฎหมาย ตามที่ได้กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติ ชั่ง ตวง วัด พ.ศ.๒๕๔๒ (ฉบับแรก พ.ศ.๒๕๖๖) โดยมีสำนักชั่งตวง วัด กระทรวงพาณิชย์ เป็นหน่วยงานหลักในการรับผิดชอบในการดำเนินการให้เป็นไปตามกฎหมายฉบับดังกล่าว อำนาจหน้าที่หลักของสำนักชั่ง ตวง วัด คือการกำหนดระดับความถูกต้องของการ ชั่ง ตวง วัด ในเชิงพาณิชย์ เพื่อความเป็นธรรมในการซื้อขาย แลกเปลี่ยนรวมถึงการควบคุมให้มีการปฏิบัติตามพระราชบัญญัติ ชั่ง ตวง วัด อย่างเคร่งครัดอีกด้วย ขอบเขตการรับผิดชอบของสำนักชั่ง ตวง วัด มิได้จำกัดอยู่เพียงแต่ส่วนกลางเท่านั้น ยังครอบคลุมไปทั่วประเทศ โดยผ่านสำนักงานพาณิชย์จังหวัดของแต่ละจังหวัด ปริมาณ ชั่ง ตวง วัด ที่ได้รับการควบคุม เช่น การชั่ง ได้แก่ เครื่องชั่ง และตม้มน้ำหนัก, การตวง ได้แก่ ลิตร มาตรฐาน และการวัด ได้แก่ ไม้มเมตร ตลับเมตร

๑.๒.๒.๒ ระบบการวัดแห่งชาติทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม (Scientific - Metrology or Industrial Metrology)

เป็นระบบการวัดแห่งชาติที่มุ่งเน้นในการสถาปนาและรักษามาตรฐานการวัดแห่งชาติ ที่มีความถูกต้องสูงสุดตามระบบการวัดสากลหรือระบบหน่วยวัด SI (International System of Units) ซึ่งเป็นพื้นฐานการวิจัย และการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการผลิต และการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในเชิงอุตสาหกรรม การดำเนินการเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของระบบการวัดแห่งชาติเชิงวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมนี้อยู่ภายใต้การรับผิดชอบของ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตามพระราชบัญญัติพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ พ.ศ.๒๕๔๐ ซึ่งนอกจากจะกำหนดให้สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติเป็นหน่วยงานที่รักษามาตรฐานการวัดแห่งชาติแล้ว ยังกำหนดให้สถาบันฯ สนับสนุนการถ่ายทอดความถูกต้องของมาตรฐานการวัด ในระบบหน่วยวัด SI สู่ผู้ใช้งานภาคอุตสาหกรรมโดยผ่านห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือวัดของทั้งภาครัฐ และเอกชน รวมทั้งการให้ความรู้ การฝึกอบรมและสนับสนุน การวิจัยและพัฒนา และสนับสนุน การวิจัยและพัฒนาด้านมาตรวิทยาอีกด้วย



รูปที่ ๑-๒ เครื่องมือวัดทางฟิสิกส์

๑.๒.๓ ระบบการวัดระหว่างประเทศ

การค้าขายแลกเปลี่ยนสินค้าระหว่างประเทศจะเป็นไปอย่างราบรื่น เมื่อทุกประเทศได้ใช้ระบบหน่วยวัดเดียวกันที่เป็นสากล ซึ่งเป็นที่มาของความตกลงระหว่างประเทศว่าด้วย มาตรการวัดปริมาณทางกายภาพ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญยิ่งต่อการค้าขายแลกเปลี่ยนระหว่างประเทศ นับตั้งแต่มีการลงนามในสนธิสัญญาเมตริก (Metric Treaty) ในปี ค.ศ.๑๘๗๕ ได้ทำให้มีการพัฒนาโลกซึ่งทำให้เกิดความเชื่อมั่นในความเท่าเทียมกันของมาตรฐานการวัดทางกายภาพการวัดระหว่างประเทศ และนำไปสู่การก่อตั้งห้องปฏิบัติการระหว่างชาติขึ้นหนึ่งแห่ง กับคณะกรรมการระหว่างชาติอีกหลายคณะ

สนธิสัญญาเมตริก กำหนดให้จัดตั้งองค์กรเพื่อควบคุมขึ้น ๒ องค์กร คือ General Conference on Weight and Measures (CGPM) และ International Committee for Weights and Measures (CIPM) พร้อมทั้งห้องปฏิบัติการระหว่างชาติอีกหนึ่งแห่งคือ International Bureau of Weights and Measures (BIPM) ซึ่งมีที่ตั้งอยู่ที่เมือง Sevres ใกล้กับกรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส พร้อมทั้งคณะกรรมการที่ปรึกษาอีกหลายคณะซึ่งได้รับการจัดตั้งภายหลังมีหน้าที่ให้คำปรึกษาในสาระทางวิชาการแก่ CIPM ในมหาวิทยาลัยหลายสาขา เช่น คณะกรรมการปรึกษาด้านไฟฟ้า (Consultative Committee for Electricity, CCE) คณะกรรมการที่ปรึกษาทางด้านอุณหภูมิต่ำ (Consultative Committee for Thermometry, CCT) และคณะกรรมการอื่น ๆ อีกหลายสาขา

สมาชิกของคณะกรรมการที่ปรึกษาได้รับการคัดเลือกมาจากห้องปฏิบัติการแห่งชาติของประเทศที่มีความกระตือรือร้น ในการวิจัยมาตรฐานการวัดในสาขาที่เกี่ยวข้อง ในขณะที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติของประเทศสมาชิกอื่น ๆ ก็มีสิทธิที่จะให้ข้อเสนอแนะแก่คณะกรรมการที่ปรึกษาได้เช่นกัน

สำหรับ International Bureau of Weights and Measures (BIPM) ซึ่งเป็นห้องปฏิบัติการระหว่างชาติมีความรับผิดชอบที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานการวัด ๓ ประการ คือ

๑.๒.๓.๑ การเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างกัน (International Comparison) ของประเทศสมาชิก

๑.๒.๓.๒ การส่งเสริมประสานงานและจัดทำเอกสารเพื่อการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างกัน

๑.๒.๓.๓ การวิจัย ในสาขาของมาตรวิทยาที่เลือกสรรแล้วภายใต้การอำนวยการของ CIPM

๑.๒.๔ ระบบของหน่วยวัด (The System of Units)

ผลสืบเนื่องมาจากการก่อตั้งสนธิสัญญาเมตริก ในปี ค.ศ.๑๘๗๕ ทำให้ คณะกรรมการที่ปรึกษาในสาขาต่าง ๆ ของการวัดได้จัดให้มีการประชุม CGPM ครั้งที่ ๑ และกำหนดให้สร้างมาตรฐานปฐมภูมิ (Prototype) เพื่อให้เป็นต้นแบบสำหรับหน่วยเมตรและกิโลกรัม แล้วเพื่อนำไปรวมเข้ากับหน่วยของวินาที ซึ่งได้มาจากนิยามปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ในสมัยนั้น เป็นรากฐาน ๓ หน่วยแรกของ Metre Convention

ในปี ค.ศ. ๑๙๕๔ ได้มีการรับรองหน่วยแอมแปร์ เคลวิน และแคนเดลา เป็นหน่วยรากฐานของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิต่ำทางเทอร์โมไดนามิกส์ และความเข้มของการส่องสว่าง ตามลำดับ และในปี ค.ศ. ๑๙๖๐ ได้ตั้งชื่อระบบหน่วยที่ประกอบด้วยรากฐานทั้ง ๖ ว่า International System of Unit หรือ SI จนในที่สุดการ

ประชุม CGPM ครั้งที่ ๑๔ ได้เพิ่มหน่วย Mole สำหรับปริมาณสารเข้ามาเป็นหน่วยรากฐานอีกหน่วยหนึ่ง การเข้าเป็นระบบของหน่วยการวัดที่ประกอบด้วยหน่วยรากฐาน ๗ หน่วย ในปัจจุบันนั่นเอง

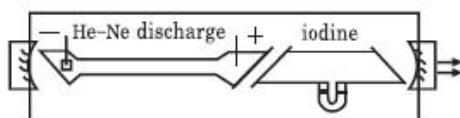
หน่วย SI เป็นหน่วยของการวัดที่มีพื้นฐานมาจากปริมาณของหน่วยวัดโดยการทำให้เป็นความจริงจากคำจำกัดความของแต่ละปริมาณรากฐาน ในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์จะแบ่งหน่วย SI ออกเป็น ๒ ชนิดคือหน่วยพื้นฐาน (Fundamental or Base Units) และ หน่วยสืบทอดหรือหน่วยอนุพันธ์ (Derived Units)

หน่วยพื้นฐานทางกล คือ การวัดความยาว (Length) มวล (Mass) และเวลา (Time) โดยเหตุที่ตั้งสามสิ่งนี้เป็นพื้นฐานของปริมาณทางฟิสิกส์อื่นนอกเหนือไปจากทางกล ขนาดของปริมาณทางฟิสิกส์อื่น เช่น ทางความร้อนไฟฟ้าและการส่องสว่างก็อาศัยกฎเกณฑ์เดียวกัน โดยแทนด้วยหน่วยพื้นฐานเหมือนกัน ดังนั้นจึงมักถูกเรียกว่า หน่วยพื้นฐานปฐม (Primary Fundamental Units) และมีบางหน่วยวัดที่ใช้แต่เพียงในส่วนที่เกี่ยวข้องกันเท่านั้นจึงมักถูกนิยามว่าเป็น หน่วยพื้นฐานเสริม (Supplementary Fundamental Units)

๑.๒.๔.๑ หน่วยพื้นฐานปฐม (Primary Fundamental Units) มี ๗ หน่วย คือ

(๑) ความยาว (Length) หน่วยวัดความยาวตามหน่วย SI คือเมตร (Metre, m)

จำกัดความ เมตร คือ ระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ในสุญญากาศ ในช่วงเวลา $1/299,792,458$ วินาที (The Meter is the length of the path, traveled by light in vacuum during a time interval of $1/299,792,458$ of a second.; 1983)



รูปที่ ๑-๓ การเคลื่อนที่ของแสงใน ๑ หน่วยเวลา

(๒) มวล (Mass) หน่วยวัดมวลตามหน่วย SI คือกิโลกรัม (Kilogram, kg)

จำกัดความว่า กิโลกรัม คือ หน่วยของมวล ซึ่งเท่ากับมวลแบบประณมระหว่างประเทศของกิโลกรัม รูปทรงกระบอกทำจากโลหะผสม Platinum-Iridium เก็บไว้ที่ BIPM เมือง Sevres ประเทศฝรั่งเศส (The kilogram is the unit of mass, It is equal to the mass of the international prototype of the kilogram. This is the only base unit still defined by artifact. ; 1899)

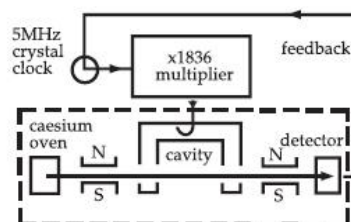


รูปที่ ๑-๔ มวลมาตรฐาน

(๓) เวลา (Time) หน่วยวัดเวลาตามหน่วย SI คือวินาที (Second, s)

จำกัดความว่า วินาที คือ ระยะเวลาระหว่าง ๙,๑๙๒,๖๓๑,๗๗๐ คาบของการแผ่รังสีที่สมนัยกับการเปลี่ยนระดับที่ละเอียดมากสองระดับของอะตอม Cesium-๑๓๓ ในสถานะพื้นฐาน (The

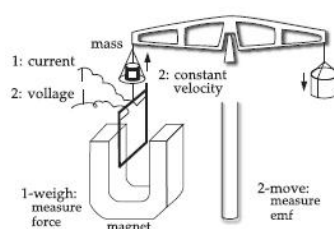
second is the duration of 9,192,631,770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium-133. ; 1899)



รูปที่ ๑-๕ การเคลื่อนที่ของอะตอม Cesium-133

(๔) กระแสไฟฟ้า (Electric Current) หน่วยวัดกระแสไฟฟ้าตามหน่วย SI คือ แอมแปร์ (Ampere, A)

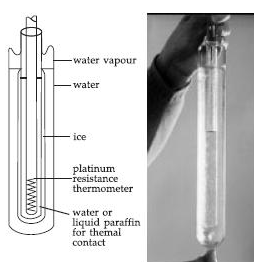
จำกัดความว่า แอมแปร์ คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ในลวดตัวนำที่มีความยาวเป็นอนันต์และมีพื้นที่หน้าตัดเล็กมากจนไม่ต้องคำนึงถึง วางขนานกันและห่างกัน ๑ เมตรในสุญญากาศ แล้วทำให้เกิดแรงระหว่างเส้นลวดทั้งสอง 2×10^{-7} นิวตันต่อความยาว ๑ เมตร (The ampere is the constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross section, and placed a meter apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to 2×10^{-7} Newton per meter of length. ; 1946)



รูปที่ ๑-๖ กระแสไฟฟ้าคงที่ในลวดตัวนำ

(๕) อุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Temperature) หน่วยวัดอุณหภูมิตามหน่วย SI คือเคลวิน (Kelvin, K)

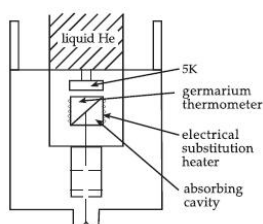
จำกัดความว่า เคลวิน คือ หน่วยของอุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเท่ากับ $1/273.16$ ของอุณหภูมิเทอร์โมไดนามิกส์ของจุดสามสถานะ (Triple point) ของน้ำ (The Kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction $1/273.16$ of the thermodynamic temperature of the triple point of water, ; 1967)



รูปที่ ๑-๗ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดัน

(๖) ความเข้มการส่องสว่าง (Luminous Intensity) หน่วยวัดความเข้มการส่องสว่าง คือ แคนเดลา (Candela, cd)

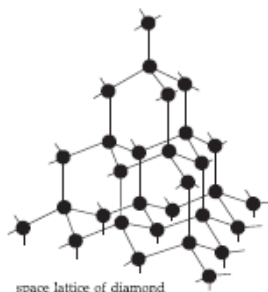
จำกัดความว่าแคนเดลา คือ ความเข้มของการส่องสว่างในทิศทางที่กำหนดให้ของแหล่งกำเนิดแสงสีเดียวที่มีความถี่ 540×10^{12} เฮิรตซ์ ด้วยความเข้มการส่องสว่างในทิศทางนั้น $1/683$ วัตต์ต่อสเตอริแอดิเยน (The candela is the luminous intensity, in a given direction, of source that emits monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz and that has a radiant intensity in that direction of $(1/683)$ watt per steradian. ; 1983)



รูปที่ ๑-๘ การหาความเข้มของการส่องสว่าง

(๗) ปริมาณสาร (Amount of Substance) หน่วยวัดปริมาณสารคือโมล (Mole)

จำกัดความว่า โมล คือ หน่วยของปริมาณสารของระบบที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐาน ซึ่งมีจำนวนเท่ากับอะตอมใน 0.012 กิโลกรัมของ C-12 (The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12. ; 1967)

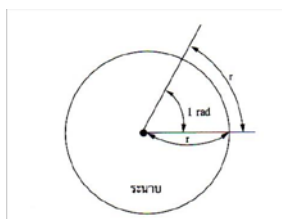


รูปที่ ๑-๙ แรงแยัดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

๑.๒.๔.๒ หน่วยพื้นฐานเสริม (Supplementary Fundamental Units) ๒ หน่วย

(๑) มุมระนาบ หน่วยเป็น เรเดียน (rad)

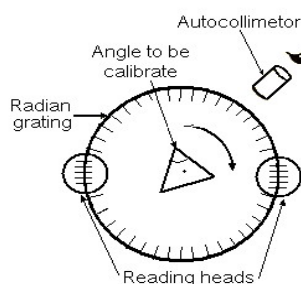
มุม ๑ เรเดียน คือมุมที่จุดศูนย์กลางของวงกลมซึ่งรองรับส่วนโค้งของวงกลมซึ่งมีความยาวเท่ากับรัศมีของวงกลมนั้น (The radian is the plane angle between two radiuses of a circle which cut off on the circumference an arc equal in length to the radius.)



รูปที่ ๑-๑๐ มุม ๑ เรเดียน

(๒) มุมตัน หน่วยเป็น สเตอเรเดียน (sr)

มุม ๑ สเตอเรเดียน คือมุมที่วัดจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมโดยปิดพื้นผิวของทรงกลมมีพื้นที่เท่ากับ กำลังสองของรัศมีทรงกลมนั้น (The steradian is the solid angle which, having its vertex in the center of a sphere, cut off an area of the surface of the sphere equal to that of square with sides of length equal to the radius of the sphere.)



รูปที่ ๑-๑๑ มุม ๑ สเตอเรเดียน

๑.๒.๔.๓ หน่วยสืบทอด (Derived Units)

หน่วยอื่นทั้งหมดที่เหลือสามารถแสดงความเกี่ยวข้องในเทอมของหน่วยพื้นฐานในหลายมิติ (Dimensions) เรียกว่า หน่วยสืบทอด (Derived Units) หน่วยสืบทอดทุกหน่วยจะมีจุดเริ่มต้นมาจากกฎทางฟิสิกส์ซึ่งนิยามหน่วยนั้น ๆ

ตารางที่ ๑-๑ แสดงตัวอย่างของอนุพันธ์ที่ได้มาจากหน่วยรากฐาน

| Derived quantity | Derived unit | Symbol |
|---|---------------------------|-------------------------------------|
| Area | square metre | m ² |
| Volume | cubic metre | m ³ |
| Speed, velocity | metre per second | m.s ⁻¹ |
| Acceleration | metre per second square | m.s ⁻² |
| Angular velocity | radian per second | rad.s ⁻¹ |
| Angular acceleration | radian per second square | rad.s ⁻² |
| Density | kilogram per cubic metre | kg.m ⁻³ |
| Magnetic field intensity (linear current density) | ampere per metre | A.m ⁻¹ |
| Current density | ampere per square metre | A.m ⁻² |
| Moment of force | Newton metre | N.m |
| Electric field strength | volt per metre | V.m ⁻¹ |
| Permeability | henry per metre | H.m ⁻¹ |
| Permittivity | farad per | F.m ⁻¹ |
| Specific heat capacity | joule per kilogram kelvin | J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Amount-of-substance concentration | mol per cubic metre | mol.m ⁻³ |
| Luminance | candela per square metre | cd.m ⁻² |

๑.๒.๕ การแยกประเภทของเครื่องวัด

กองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาได้แยกประเภท (Categories) ของเครื่องวัดและหน่วยงานที่รับผิดชอบในการซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด สามารถแยกออกได้ ๔ ประเภท ดังต่อไปนี้

๑.๒.๕.๑ เครื่องวัดประเภท ๑ (Category I : Instruments For Direct Operation Of Systems) หมายถึงเครื่องวัดเฉพาะแบบที่ติดตั้งในระบบย่อยรวมอยู่ในระบบอื่น ๆ เช่น เครื่องวัดประกอบการบินบนแผงหน้าปัดเครื่องบิน เครื่องวัดประกอบการยิงตอร์ปิโดบนแผงควบคุมการยิงติดตั้งบนเรือ เครื่องวัดบนแผงหน้าปัดของรถถัง เป็นต้น ซึ่งหน่วยผู้ใช้เป็นผู้รับผิดชอบในการซ่อมบำรุงและปรับเทียบมาตรฐาน

๑.๒.๕.๒ เครื่องวัดประเภท ๒ (Category II : Special-Purpose Test Equipments) หมายถึงเครื่องวัดที่ใช้งานเป็นพิเศษเฉพาะอย่างในการตรวจสอบบำรุงและปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัดประเภท ๑ เช่น เครื่องมือตรวจวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์ (Engine Analyzer) เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ การทำงานของจรวดหรืออาวุธปล่อย (Missile Test Standard) เป็นต้น ซึ่งหน่วยผู้ใช้เป็นผู้รับผิดชอบในการซ่อมบำรุงและปรับเทียบมาตรฐานโดยใช้เครื่องวัดประเภท ๓ เป็นเครื่องมือตรวจสอบปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด ผู้ใช้อาจจะร้องขอให้หน่วยซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด (PMEL) จัดส่งเจ้าหน้าที่ไปช่วยดำเนินการซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัดประเภท ๒ ให้ได้ถ้ามีความจำเป็นและมีอุปกรณ์ครบชุดพร้อมที่จะปฏิบัติงานได้

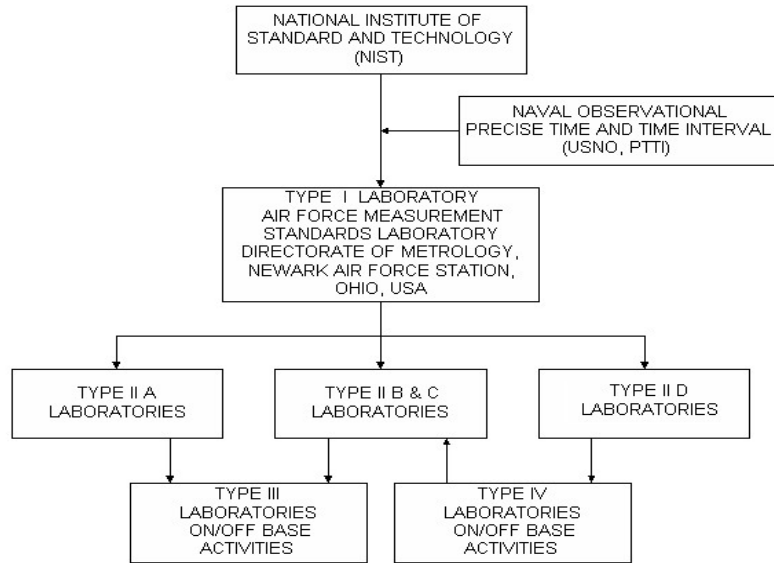
๑.๒.๕.๓ เครื่องวัดประเภท ๓ (Category III : General-Purpose Test Equipments) หมายถึงเครื่องวัดที่ใช้งานทั่วไป (Common Use) โดยมีความสมบูรณ์และสำเร็จรูปในตัวเอง (End Item) เช่น มัลติมิเตอร์ (Multimeter) เครื่องวิเคราะห์รูปร่างคลื่น (Oscilloscope) เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) เครื่องนับความถี่ (Frequency Counter) เป็นต้น เครื่องวัดประเภทนี้ใช้ในการซ่อมบำรุง ทดสอบ ปรับเทียบและค้นหาข้อขัดข้องของเครื่องวัดประเภท ๑ และ ๒ โดยมีหน่วยซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด (PMEL) เป็นผู้รับผิดชอบในการซ่อมบำรุงและปรับเทียบมาตรฐานโดยตรง หน่วยผู้ใช้ต้องไม่ดำเนินการเอง

๑.๒.๕.๔ เครื่องวัดประเภท ๔ (Category IV: Calibration Standards) หมายถึงเครื่องวัดที่ใช้เป็นมาตรฐานการวัดหรือมาตรฐานอ้างอิงเฉพาะภายในหน่วยซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด (PMEL) ที่ใช้สำหรับปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัดประเภท ๒ และ ๓ เช่น Source Calibrator หรือ Time/Frequency Standard เป็นต้น เครื่องวัดประเภทนี้จำเป็นต้องได้รับการสอบเทียบมาตรฐานตามระยะเวลาจากหน่วยงานมาตรฐานระดับชาติหรือหน่วยงานมาตรฐานระหว่างประเทศ (ระดับนานาชาติหรือระดับสากล)

๑.๒.๖ การแบ่งระดับห้องปฏิบัติการมาตรฐานเครื่องวัด

กองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาได้แบ่งระดับห้องปฏิบัติการมาตรฐานเครื่องวัด ออกเป็น ๗ แบบ ดังนี้

๑.๒.๖.๑ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ I (PMEL Type I) เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับสูงสุดของกองทัพอากาศ มีหน้าที่ในการเก็บรักษาเครื่องมาตรฐานอ้างอิงของกองทัพอากาศที่ได้รับการรับรองคุณภาพจาก NIST หรือ USNO (ในกรณีการวัดเวลาและช่วงเวลา PTTI: Precise Time and Time Interval) ห้องปฏิบัติการมาตรฐานนี้เรียกว่าห้องปฏิบัติการเครื่องมาตรฐานอ้างอิงกองทัพอากาศ



รูปที่ ๑-๑๒ โครงสร้างของห้องปฏิบัติการมาตรฐาน

๑.๒.๖.๒ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ IIA (PMEL Type IIA) เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ให้การสนับสนุนแก่ศูนย์ส่งกำลังบำรุงทางอากาศต่าง ๆ (Air Logistic Center) ห้องปฏิบัติการมาตรฐานเหล่านี้ดำเนินการโดยศูนย์ส่งกำลังบำรุงทางอากาศและกองบัญชาการสนับสนุนทหารอากาศต่าง ๆ

๑.๒.๖.๓ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ IIB (PMEL Type IIB) เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับฐานบินมีหน้าที่ในการสนับสนุน อากาศยาน จรวด และระบบทางภาคพื้นดิน

๑.๒.๖.๔ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ IIC (PMEL Type IIC) เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ให้การสนับสนุน การวิจัย การพัฒนา การทดสอบ และการประเมินผลกำหนดการต่าง ๆ ซึ่งตามปกติแล้วจะอยู่ภายใต้การอำนวยการของ กองบัญชาการระบบของกองทัพอากาศ (Air Force System Command)

๑.๒.๖.๕ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ IID (PMEL TYPE IID) เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ปฏิบัติการกิจเฉพาะอย่าง ตามปกติจะได้รับการสนับสนุนด้านการซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัดจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ I

๑.๒.๖.๖ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ III (PMEL TYPE III) เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ปฏิบัติการกิจเฉพาะอย่าง ตามปกติจะได้รับการสนับสนุนด้านการซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัดจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ II ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ III นี้จะไม่มีการจัดตั้งขึ้นอีกถ้าสถานที่นั้นมีการจัดตั้งห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ II แล้ว

๑.๒.๖.๗ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ IV (PMEL Type IV) เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่จัดตั้งขึ้นมาเพื่อสนับสนุนภารกิจเฉพาะอย่าง เกี่ยวกับระบบอาวุธ เป็นห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่เคลื่อนที่ไปตามที่ตั้งของการวางกำลังตามที่ต่าง ๆ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ IV นี้ตามปกติจะได้รับการสนับสนุนด้านการซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัดจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ II และอาจตั้งขึ้นในสถานที่ที่มีห้องปฏิบัติการมาตรฐานแบบ II อยู่แล้วก็ได้

๑.๒.๗ ชนิดของมาตรฐานการวัดตามเอกสารเทคนิค T.O. ๐๐-๒๐-๑๔ (Air Force Metrology and Calibration Program, AFMETCALP)

กองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา แบ่งระดับของมาตรฐานการวัดไว้เป็น ๔ ระดับ ดังนี้

๑.๒.๗.๑ National Measurement Standard หมายถึง เครื่องมือหรือค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่พิสูจน์แล้วและใช้ในสถาบัน National Institute of Standards and Technology (NIST) เพื่อเป็นค่าอ้างอิงพื้นฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาและจัดเป็นมาตรฐานการวัดระดับชาติ

๑.๒.๗.๒ Air Force Measurement Standard หมายถึง อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มีมาตรฐานสูงสุดใน กองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงระดับกองทัพ

๑.๒.๗.๓ Air Force Base Measurement Standard หมายถึง อุปกรณ์หรือเครื่องมือมาตรฐานการวัดที่ได้รับการรับรองจากห้องปฏิบัติการการวัดระดับกองทัพ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานการวัดระดับกองบิน

๑.๒.๗.๔ Working Standard หมายถึง บริษัทณ์เครื่องมือวัดที่ได้รับการรับรองค่าผิดพลาดแล้วโดยมาตรฐานที่สูงกว่า เครื่องวัดมาตรฐานแบบนี้ใช้ในการปรับเทียบให้กับเครื่องวัดทั่ว ๆ ไป

๑.๓ มาตรวิทยา (Metrology)

๑.๓.๑ มาตรวิทยา หมายถึง ศาสตร์แห่งการวัด หรือวิชาที่ว่าด้วยเรื่องของการวัด ไม่ว่าจะป็นสาขาใดก็ตาม เป็นการวัดที่รวมเอาทั้งเรื่องทฤษฎีและทุกมิติของการปฏิบัติมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้สามารถวัดได้อย่างถูกต้องตามต้องการ และสามารถรายงานค่าของผลการวัดได้ โดยการรายงานนั้นได้รวมเอาการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดเอาไว้ด้วย

มาตรวิทยาได้รวมถึงการกำหนดให้มีหน่วยของการวัด โดยการทำให้เป็นจริงขึ้นจากนิยามด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์ เช่น การทำหน่วยของเมตร โดยการใช้ปรากฏการณ์ของแสงที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศ นอกจากนี้ยังรวมถึงการจัดให้มีโซ่ของความสามารถสอบกลับได้ของการวัด (Traceability) โดยการสอบเทียบ (Calibration) และการทำเอกสารที่แสดงค่าที่ได้จากการวัดพร้อมกับความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการวัดอีกด้วย

๑.๓.๒ มาตรฐานการวัด

มาตรฐานการวัดเป็นปัจจัยอันสำคัญยิ่งในระบบการวัด หน่วยวัดที่เป็นที่ยอมรับกันระหว่างประเทศรวมกับมาตรฐานการวัดที่เท่าเทียมกัน มีความสำคัญต่อระบบการค้าและความร่วมมือระหว่างประเทศ ระดับความเชื่อมั่นในความเท่าเทียมกันของมาตรฐานการวัดย่อมได้มาจากการทำการเปรียบเทียบระหว่างกัน (Intercomparison) และความสามารถของผู้ปฏิบัติการที่ทำการวิจัยอยู่ในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ซึ่งผลคือความเชื่อถือในมาตรฐานการวัดเหล่านี้สามารถถ่ายทอดมาสู่ผู้ใช้งานได้โดยผ่านลูกโซ่ของการสอบกลับได้ (Chain of Traceability) การจัดลำดับขั้นของมาตรฐานในที่นี้ได้จาก International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM) ซึ่งนิยามไว้ ดังนี้

๑.๓.๒.๑ มาตรฐานปฐมภูมิ (Primary Standard)

มาตรฐานปฐมภูมิหมายถึง มาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ ถือเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีคุณสมบัติทางมาตรวิทยาสูงสุด และมีค่าเป็นที่ยอมรับโดยปราศจากการอ้างอิงถึงมาตรฐานอื่นที่เป็นปริมาณเดียวกัน (Standards that is designated or widely acknowledged as having the highest metrological qualities and whose value is accepted without reference to other standards of the same quantity, VIM 6.4)

๑.๓.๒.๒ มาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary Standard)

มาตรฐานทุติยภูมิ หมายถึง มาตรฐานที่ได้ค่ามาจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานปฐมภูมิของปริมาณเดียวกัน (Standard whose value is assigned by comparison with a primary standard of

the same quantity, VIM 6.5)

๑.๓.๒.๓ มาตรฐานการวัดแห่งชาติ (International Measurement Standards)

มาตรฐานการวัดแห่งชาติ คือ มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับโดยความตกลงกันระหว่างประเทศ เพื่อเป็นฐานในการกำหนดค่าของมาตรฐานอื่นทั้งหมดที่เกี่ยวข้องระหว่างประเทศ (Standard recognized by national decision to serve, in a country, as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned, VIM 6.3)

๑.๓.๒.๔ มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard)

มาตรฐานอ้างอิง คือ มาตรฐานที่โดยทั่วไปมีคุณสมบัติทางมาตรวิทยาสูงสุด มีไว้ ณ จุดใช้งาน หรือในหน่วยงาน ซึ่งการวัดที่กระทำในหน่วยงานได้มาจากมาตรฐานนี้ (Standard, generally having the highest metrological quality available at a given location or in a given organization, from which measurement made there are derived, VIM 6.6)

๑.๓.๒.๕ มาตรฐานถ่ายทอด (Transfer Standard)

มาตรฐานถ่ายทอด คือ มาตรฐานที่ใช้สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่น (A standard used as an intermediary to compare standards, VIM 6.8)

๑.๓.๒.๖ มาตรฐานชั้นใช้งาน (Working Standard)

มาตรฐานชั้นใช้งาน คือ มาตรฐานที่ใช้สอบเทียบ หรือการตรวจสอบกับวัสดุวัด เครื่องมือวัด หรือวัสดุอ้างอิง (Standard that is used to calibrate or check material measures, measuring instruments or reference materials, VIM 6.7)

มาตรฐานชั้นใช้งานจะสอบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงเสมอ และมาตรฐานใช้งานนี้อาจใช้สำหรับงานประจำ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการวัดที่กระทำเป็นไปอย่างถูกต้องบางครั้งเรียกว่า มาตรฐานสำหรับการตรวจสอบ (Check Standard)

๑.๓.๓ การสอบเทียบ

๑.๓.๓.๑ นิยาม

การสอบเทียบ “ชุดของการดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ชี้บอกโดยเครื่องมือวัด หรือระบบการวัด หรือค่าที่แสดงโดยเครื่องมือวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัยที่รู้ของปริมาณที่วัด ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้” (Set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between values of quantities indicated by a measuring instrument or measuring system, or values represented by a material measure or a reference material and the corresponding values realized by standards, VIM 6.11)

การสอบเทียบ หมายถึง การตัดสิน และทำเอกสารแสดงความบ่าเบนของค่าชี้บอกของเครื่องมือวัดหรือค่าที่ระบุของวัสดุวัดจากค่าจริงที่ยอมรับร่วมกัน (Conventional True Value) ของปริมาณที่ถูกวัด ค่าจริงที่ยอมรับร่วมกันคือค่าจริงที่มีความไม่แน่นอนของการวัดที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในที่นี้คือค่ามาตรฐานที่สามารถสอบกลับได้สู่มาตรฐานแห่งชาติ หรือมาตรฐานระหว่างชาติ

การสอบเทียบ ประกอบด้วยปัจจัยหลักดังต่อไปนี้

(๑) ตัดสินความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ชี้บอกของเครื่องมือวัดกับค่ามาตรฐาน ภายใต้สภาวะที่กำหนด และ ณ วัน เวลาที่ระบุ

(๒) ออกใบรายงานผลการสอบเทียบที่รายงานทั้งค่าความบ่าเบน หรือค่าแก้พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัด

๑.๓.๔ ความสามารถสอบกลับได้

๑.๓.๔.๑ นิยาม

ผลการวัดจะไม่มี ความหมายถ้าไม่สามารถโยงหรืออ้างอิงสู่มาตรฐานแห่งชาติ คุณสมบัติดังกล่าวของผลการวัด เรียกว่า ความสามารถสอบกลับได้ (Traceability) ความสามารถสอบกลับได้ ได้รับนิยามไว้ว่า “สมบัติของผลการวัดที่สามารถโยงไปกับมาตรฐานแห่งชาติที่เป็นที่ยอมรับโดยการเปรียบเทียบกันอย่างไม่ขาดช่วงเป็นลูกโซ่ และจะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดไว้ด้วย” (Property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to state references usually nation or international standards, through an unbroken chain of comparisons all having state uncertainties, VIM 6.10) ดังนั้น ความสามารถสอบกลับได้จึงเป็นการส่งต่อหน่วยวัดตามนิยาม SI จากจุดเริ่มต้นจนถึงผู้ใช้งาน ความสามารถสอบกลับได้ของผลการวัดจึงต้องได้รับการถ่ายทอดผ่านห้องปฏิบัติการสอบเทียบหลายระดับจนกว่าจะถึงผู้ใช้งาน ซึ่งถ้าพิจารณาจากความหมายของความสามารถสอบกลับได้ จะเห็นว่า มีปัจจัยหลายอย่างด้วยกันที่ทำให้เกิดห่วงโซ่ของการเปรียบเทียบโดยไม่ขาดขั้นตอนได้

๑.๓.๕ ความไม่แน่นอนของการวัด

๑.๓.๕.๑ นิยาม

ความไม่แน่นอนของการวัด หมายถึง พารามิเตอร์ที่รวมมากับผลของการวัด ที่บอกลักษณะการกระจายของค่า ซึ่งสามารถอ้างอิงได้อย่างสมเหตุสมผลว่าเป็นของปริมาณที่ถูกวัดนั้น (Parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand, VIM 3.9)

จากนิยามข้างต้น สามารถทำให้ความหมายของความไม่แน่นอนของการวัดได้ว่า ความไม่แน่นอนของการวัด คือ สิ่งที่ชี้บอกความไม่สมบูรณ์ในความรู้ของปริมาณที่ถูกวัด ความไม่แน่นอนของการวัดเกิดขึ้นทุกครั้งที่ในการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัด ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนไหนของความสามารถสอบกลับได้ ซึ่งในแต่ละระดับของการวัดจะเกิดความไม่แน่นอนของการวัดสะสมขึ้นเรื่อย ๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายทอดการวัดของแต่ละห้องปฏิบัติการและความไม่แน่นอนอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น วิธีการวัด เครื่องมือวัด ผู้ปฏิบัติการ และสภาวะแวดล้อมในการวัด เป็นต้น ความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องคำนวณโดยวิธีที่ยอมรับอย่างเป็นทางการ และโดยทั่วไปจะต้องรายงานที่ระดับความเชื่อมั่นที่ ๙๕% การคำนวณความไม่แน่นอนของการวัด ในแต่ละขั้นตอนของการถ่ายทอดความถูกต้องนั้น จะต้องจัดทำไว้เป็นเอกสาร เพื่อให้สามารถทวนสอบความถูกต้องได้ของผู้เกี่ยวข้อง

เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถสอบกลับได้ของเครื่องวัด ค่าของความไม่แน่นอนของการวัดจะถูกรายงานร่วมกับความคลาดเคลื่อนของการวัด ในใบรายงานผลการสอบเทียบโดยห้องปฏิบัติการสอบเทียบ และค่าที่รายงานนี้จะเป็นจริงก็เฉพาะ ณ เวลาที่ทำการสอบเทียบและภายใต้เงื่อนไขของการสอบเทียบที่ระบุเท่านั้น การใช้เครื่องมือวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับผลการสอบเทียบ แต่ในเวลาที่ย่างออกไปหรือยิ่งกว่านั้นคือการใช้เครื่องมือวัดในเงื่อนไขที่ต่างออกไปจากผลการสอบเทียบก็จะต้องทำให้คลาดเคลื่อน และความไม่แน่นอนของการวัดยังมีค่ามากเกินกว่าที่ระบุไว้ในรายงานผลการสอบเทียบ ซึ่งบางครั้งอาจเกินกว่าที่จะยอมรับได้

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระบุไว้ในใบรายงานผลการสอบเทียบ จะได้รับการยอมรับว่ามีความสัมพันธ์กับมาตรฐานแห่งชาติได้ก็ต่อเมื่อใบรายงานผลการสอบเทียบนั้นออกให้โดยห้องปฏิบัติการที่สามารถแสดงความสามารถโดยผ่านกระบวนการรับรองความสามารถโดยองค์กรที่เป็นที่ยอมรับระหว่างประเทศ

บางครั้งในรายงานผลการสอบเทียบจะรายงานความเป็นไปตามข้อกำหนดจำเพาะทางมาตรวิทยาของปริมาณที่ถูกวัด ในกรณีเช่นนี้ค่าที่วัดได้เมื่อรวมกับความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องไม่ขยายไปเกินกว่าขีดจำกัดหรือเกณฑ์ยอมรับที่ระบุของปริมาณที่ถูกวัดนั้น ๆ

๑.๓.๕.๒ ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement)

ความไม่แน่นอนของการวัดคือสิ่งที่บอกได้ถึงคุณภาพของผลการวัด ว่ามีความเชื่อถือมากเพียงใด การรายงานความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องรายงานพร้อมกับผลของการวัดเสมอ เพื่อที่จะให้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับข้อกำหนดจำเพาะหรือมาตรฐาน หรือเกณฑ์ยอมรับสำหรับสิ่งที่ถูกวัด (Measured)

เป็นที่ยอมรับกันว่าการวัดทุกครั้งมีความคลาดเคลื่อน (Error) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผลการวัดมีความแตกต่างจากค่าจริงของสิ่งที่ถูกวัด (True Value) และความไม่แน่นอนของการวัดส่วนหนึ่งได้มาจากการกระจายค่าของผลการวัดนั้น ๆ เมื่อทำการวัดหลาย ๆ ครั้ง มีแนวคิดหลากหลายที่ใช้แสดงความน่าเชื่อถือได้เหล่านั้น โดยวิธีที่ต่าง ๆ กัน ในปี ค.ศ. ๑๙๙๐ องค์กรชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (BIPM) ร่วมกับ ISO ได้แนะนำให้ใช้ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นมาตรการบอกความน่าเชื่อถือของผลการวัด โดยใช้ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) ซึ่งมีแนวคิดดังนี้

ปริมาณที่วัด “Y” ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องในกระบวนการวัด

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของปริมาณอินพุตเหล่านี้ได้ ปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวัดจะมีความไม่แน่นอนติดมาด้วยเสมอ ดังนั้นผลการวัด “Y” จึงเป็นเพียงค่าประมาณ “y” พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจากปริมาณอินพุตเหล่านั้นด้วย

ในใบรายงานผล ปริมาณที่ถูกวัดจะอยู่ในรูป

$$Y = y \pm U$$

โดยค่าความไม่แน่นอน U ได้มาจากการประเมินองค์ประกอบรวมทั้งหมดของความไม่แน่นอนในรูปแบบที่เป็น Type A และ Type B การประเมิน Type A เป็นผลมาจากการประเมินมาตรฐานที่ได้มาจากใบรับรองการสอบเทียบ หรือข้อกำหนดจำเพาะของเครื่องมือ เป็นต้น

ตัวอย่างของการรายงานผลการวัด เช่น ผลการวัดความต้านทานที่มีค่าที่ระบุ 1 k Ω มีค่า 1.000001 k Ω มีค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจะอยู่ในรูป 1.00000 k Ω \pm 0.001 k Ω ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

๑.๔ ระบบการสอบกลับได้ (Traceability System)

การวัดและการทดสอบที่มีความถูกต้องและแม่นยำเป็นหลักประกันทางเทคนิคที่สำคัญที่สุด สำหรับการแสดงว่าผลิตภัณฑ์เป็นไปตามข้อกำหนดทางคุณภาพ ความสำคัญของการวัดและทดสอบได้รับการยอมรับและถือเป็นข้อกำหนด ของมาตรฐานการประกันคุณภาพที่สำคัญ ๆ เช่น ISO 9000, ISO 14000 และ ISO/IEC 17025 เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การยืนยันความถูกต้อง และความแม่นยำของการวัดก็ต้องอาศัยหลักประกันที่เป็นเอกสารที่สามารถทำให้เกิดความเชื่อถือในความถูกต้องและความแม่นยำที่อ้างถึงได้เช่นเดียวกัน และหลักประกันดังกล่าวคือ ใบรับรองการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่แสดงผลการวัด และความไม่แน่นอนของการวัดที่สามารถสอบกลับสู่หน่วยวัด SI Units ที่ทำให้เป็นจริง (Realized) และรักษาไว้ในฐานะที่เป็นมาตรฐานการวัดแห่งชาติ ซึ่งรักษาไว้โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ในที่นี้อธิบายถึงระบบการสอบกลับได้ของการวัด และบทบาทของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติทั้งในฐานะเป็นหน่วยงานของชาติที่รับผิดชอบต่อการรักษาถ่ายทอดมาตรฐานเครื่องวัด และการทำให้เกิดการยอมรับของมาตรฐานการวัดแห่งชาติในระดับสากล

๑.๔.๑ ปัจจัยหลักของความสามารถสอบกลับได้

ความสามารถสอบกลับได้ของการวัดจะต้องประกอบไปด้วยสิ่งต่อไปนี้

๑.๔.๑.๑ เปรียบเทียบอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ จากผู้ใช้งานเครื่องมือวัดกลับมาสู่มาตรฐานที่เกี่ยวข้องยอมรับ ซึ่งโดยทั่วไปคือมาตรฐานระหว่างชาติ หรือมาตรฐานแห่งชาติ

๑.๔.๑.๒ มีความไม่แน่นอนของการวัด ความไม่แน่นอนของการวัดในแต่ละขั้นตอนของความสามารถสอบกลับได้ จะต้องคำนวณตาม วิธีที่กำหนด และรายงานค่า เพื่อให้สามารถคำนวณความไม่แน่นอนรวมทุกขั้นตอนได้

๑.๔.๑.๓ ทำเป็นเอกสาร การเปรียบเทียบจะต้องทำตามวิธีดำเนินการที่เป็นเอกสาร และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป อีกทั้งผลของการเปรียบเทียบก็ต้องทำเป็นเอกสารเช่นกัน

๑.๔.๑.๔ มีความสามารถ ห้องปฏิบัติการหรือองค์กรที่ทำการเปรียบเทียบในขั้นตอนหนึ่งหรือมากกว่าห่วงโซ่สอบกลับได้ จะต้องแสดงให้เห็นถึงความสามารถทางเทคนิค (เช่น แสดงด้วยการได้รับการรับรองความสามารถ ตาม ISO/IEC 17025)

๑.๔.๑.๕ อ้างถึงหน่วยวัด SI ห่วงโซ่ของการเปรียบเทียบ ถ้าเป็นไปได้จะต้องสิ้นสุดลงที่มาตรฐานขั้นปฐมภูมิ ที่ทำให้เป็นจริงของหน่วยวัด SI

๑.๔.๑.๖ ช่วงระยะเวลาการระหว่างการสอบเทียบ การสอบเทียบจะต้องกระทำซ้ำตามช่วงเวลาที่เหมาะสม และระยะเวลาของช่วงเวลานี้จะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ตัวแปร (เช่น ความไม่แน่นอนที่ต้องการ ความถี่ของการใช้งาน การนำไปใช้ ความเสถียรของเครื่องมือ)

๑.๔.๒ ลำดับขั้นของการสอบเทียบ

๑.๔.๒.๑ การสอบเทียบระดับระหว่างชาติ

ความมั่นใจในความถูกต้องหรือความเท่าเทียมกันในมาตรฐานการวัดแห่งชาติของแต่ละประเทศ ได้มาจากการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างประเทศทั้งในระดับทวิภาคีละพหุภาคีแทนการสอบเทียบที่กระทำกันตามปกติทั่วไป ในระดับระหว่างชาติ หรือระหว่างประเทศนั้น มาตรฐานปฐมภูมิ (Primary Standard) ได้มาจากการทำให้เป็นจริง (Realized) จากนิยามของหน่วยวัด SI โดย General Conference on Weights and Measures (CGPM) ซึ่งหน่วยงานที่รับผิดชอบสำหรับ การพัฒนามาตรฐานปฐมภูมิ และจัดให้มีการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างประเทศในระดับที่มีความถูกต้องสูงสุด คือ International Bureau of Weights and Measures (BIPM) ซึ่งมีสำนักงานอยู่ที่กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส

๑.๔.๒.๒ การสอบเทียบระดับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของแต่ละประเทศถือเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่รักษามาตรฐานทางมาตรวิทยาขั้นสูงสุดของประเทศ เป็นแหล่งที่มาของความสอบกลับได้สำหรับปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับประเทศนั้น ๆ ในกรณีที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมีความสามารถถึงขั้นที่นำเอาหน่วย SI จากนิยามมาทำให้เป็นจริงได้ มาตรฐานแห่งชาตินั้นถือได้ว่ามีความเทียบเท่ามาตรฐานปฐมภูมิหรือสามารถสอบกลับได้โดยตรงกับหน่วยวัด SI นั้น แต่ในกรณีที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติยังไม่มีความสามารถถึงขั้นที่จะนำเอานิยามมาทำให้เป็นจริงได้ การทำให้มั่นใจว่าสามารถสอบกลับได้ถึงหน่วยวัด SI จะกระทำโดยการถ่ายทอดจากประเทศอื่น

ปัจจัยหลักคือ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติซึ่งมีหน้าที่หลักก็คือ รักษามาตรฐานขั้นปฐมภูมิของหน่วยวัด SI ของประเทศ รวมทั้งการวิจัยและพัฒนามาตรฐานการวัดและวิธีการวัดให้มี

ความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นตามความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การสอบเทียบที่กระทำโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติตามปกติแล้วจำกัดอยู่ที่การสอบเทียบเพื่อถ่ายทอดมาตรฐานของมาตรฐานของหน่วยวัด SI ในระดับปฐมภูมิของชาติสู่มาตรฐานระดับทุติยภูมิของห้องปฏิบัติการสอบเทียบในอุตสาหกรรมเท่านั้น

๑.๔.๒.๓ ห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองความสามารถ

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองโดยองค์กรให้การรับรองความสามารถอย่างเป็นทางการของแต่ละประเทศ สำหรับหน่วยงานให้การรับรองอย่างเป็นทางการของประเทศไทยก็คือ ส่วนงานรับรองห้องปฏิบัติการ สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (สมอ.) ห้องปฏิบัติการที่ผ่านการรับรองโดยการตรวจประเมินความสามารถทางเทคนิคตาม ข้อกำหนดมาตรฐาน ISO/IEC 17025 แล้วจะได้รับใบรับรองความสามารถของการวัดพร้อมกับความไม่แน่นอนน้อยที่สุดที่ห้องปฏิบัติการสามารถกระทำได้

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองความสามารถจะทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดจากภาคอุตสาหกรรม เพื่อถ่ายทอดความถูกต้องจากหน่วยวัด SI ที่ผู้ใช้งานโดยใช้มาตรฐานอ้างอิงหรือมาตรฐานถ่ายทอดที่ผ่านการสอบเทียบแล้วจากมาตรฐานแห่งชาติ หรือห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองความสามารถในระดับสูงกว่า

๑.๔.๒.๔ การสอบเทียบที่กระทำภายในภาคอุตสาหกรรม

การสอบเทียบที่กระทำขึ้นเองภายในภาคอุตสาหกรรม เพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องมือตรวจและทดสอบทั้งหมดที่มีผลต่อคุณภาพได้รับการสอบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงภายในโรงงาน และมาตรฐานอ้างอิงของโรงงานนั้น ควรจะต้องได้รับการสอบเทียบมาตรฐานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองหรือจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ แล้วแต่กรณี ซึ่งความสามารถในการทำการสอบเทียบภายในโรงงาน จะต้องคำนึงถึงความสามารถของผู้ปฏิบัติการ (การศึกษา, การฝึกอบรม, ความชำนาญ และประสบการณ์) วิธีการในการวัด เครื่องมือวัดและมาตรฐานการวัดห้องปฏิบัติการ (สภาวะแวดล้อม) ตลอดจนระบบการบันทึกผล เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้อง และแม่นยำของการวัด

ตารางที่ ๑-๒ บทบาทของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ในการสอบเทียบและสามารถสอบกลับได้

| ระดับมาตรฐาน | องค์กร | ขอบข่ายงาน |
|--------------|--|--|
| | สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ | <ul style="list-style-type: none"> - จัดทำ รักษา และพัฒนามาตรฐานแห่งชาติ - พัฒนาให้องค์กรเป็นที่ยอมรับและเชื่อถือในระดับนานาชาติ - เป็นองค์กรนำในการพัฒนาและผลักดันให้เกิดระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ |
| | ห้องปฏิบัติการสอบเทียบของภาครัฐและเอกชน | - ถ่ายทอดความถูกต้องของมาตรฐานการวัดจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติไปสู่มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standards) ของภาคอุตสาหกรรม |
| | ห้องปฏิบัติการสอบเทียบในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ | - รักษามาตรฐานระดับทำงาน (Working Standards) โดยสอบกลับได้ (Traceable) ถึงมาตรฐานแห่งชาติสู่เครื่องมือตรวจวัดและทดสอบในโรงงาน |
| | เครื่องมือตรวจวัดและทดสอบที่ต้องการสอบเทียบ | - เครื่องมือตรวจวัด และทดสอบที่ใช้แสดงความเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ |

(๑) เมื่อเป็นไปได้ที่จะสอบกลับผลการวัดสู่หน่วยวัด SI

ในบางกรณี การสอบกลับได้ของการวัดสู่หน่วยวัด SI ไม่สามารถเป็นไปได้หรือไม่สมเหตุผล ห้องปฏิบัติการ ลูกค้า และผู้เกี่ยวข้องอาจตกลงกันที่จะใช้วัสดุอ้างอิงที่ได้รับการรับรองแล้ว (Certified Reference Material, CRM) จากผู้ส่งมอบที่มีความสามารถหรือการใช้วิธีบ่งชี้เฉพาะ และ/หรือ การใช้มาตรฐานที่ตกลงยอมรับร่วมกันของผู้เกี่ยวข้องทั้งหมด

(๒) วัสดุอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับแล้ว (Certified Reference Material)

วัสดุอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับแล้ว คือ วัสดุอ้างอิงที่มีใบรับรองกำกับมีค่าสมบัติหนึ่งอย่างหรือมากกว่า ที่รับรองโดยวิธีดำเนินการซึ่งทำการสอบกลับได้สู่หน่วยวัด ที่ทำให้เป็นจริงได้อย่างถูกต้องที่แสดงค่าสมบัติ ซึ่งค่ารับรองแต่ละค่าจะกำกับด้วยความไม่แน่นอนที่ระดับความน่าเชื่อถืออันหนึ่ง (A reference material, accompanied by a certificate, one or more of whose property values are certified by a procedure which established traceability to an accurate realization of the unit in which the property values are expressed, and for which each certified value is accompanied by an uncertainty at a stated level of confidence)

(๓) วัสดุอ้างอิง (Reference material)

วัสดุอ้างอิง คือ วัสดุหรือสารที่มีค่าสมบัติอย่างหนึ่งหรือมากกว่าที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และจัดเตรียมมาอย่างดี สำหรับใช้สอบเทียบอุปกรณ์สำเร็จ ใช้ประเมินวิธีวัด ก. หรือกำหนดค่าให้กับวัสดุ (Material or substance one or more of whose property values are sufficiently homogeneous and well established to be used for calibration of an apparatus, the assessment of measurement method, or for assigning values to materials)

หมายเหตุ วัสดุอ้างอิงอาจอยู่ในรูปของก๊าซบริสุทธิ์ หรือก๊าซผสมของเหลว หรือของแข็ง

(๔) มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับระหว่างกัน (Consensus Standard)

มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับระหว่างกัน คือ มาตรฐานที่ใช้โดยความตกลงระหว่างองค์กรที่เป็นคู่สัญญากัน เมื่อไม่มีมาตรฐานแห่งชาติ

๑.๔.๓ การแสดงให้เห็นถึงความสามารถสอบกลับได้ของการวัด

ในการขอรับรองระบบคุณภาพ ISO 9000 Series หรือ การรับรองความสามารถตาม ISO/IEC 17025 ทั้งผู้ส่งมอบและห้องปฏิบัติการต่างก็ต้องแสดงความสามารถสอบกลับได้ของการวัดแก่ผู้ตรวจประเมินด้วยกันทั้งนั้น แต่ด้วยความเข้าใจที่แตกต่างกันของความหมายของประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจประเมิน เช่น การสอบเทียบ ความสามารถสอบกลับได้ มาตรฐานแห่งชาติและความไม่แน่นอนของการวัด เป็นต้น เป็นผลให้เกิดความคิดเห็นที่ขัดแย้งกันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทั้งสองฝ่ายจะต้องทำความเข้าใจกับความหมายและความเป็นจริงที่ยอมรับได้ของความสามารถสอบกลับได้ ทั้งที่ได้จากมาตรฐานแห่งชาติของการวัด โดยผ่านห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองความสามารถ และมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับร่วมกัน (Consensus Standards) ในกลุ่มอุตสาหกรรมเดียวกัน โดยผ่านห้องปฏิบัติการที่ไม่ได้รับการรับรองความสามารถ

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของการพิจารณายอมรับความสามารถสอบกลับได้ของการวัด เมื่อการสอบเทียบไม่ได้กระทำโดยห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองความสามารถ

๑.๔.๓.๑ พารามิเตอร์ ที่ไม่ได้รับการรักษาไว้โดยมาตรฐานแห่งชาติ เช่น แม่เหล็ก ความแข็ง ความเงา ความเพี้ยนของสัญญาณ เป็นต้น ซึ่งทั้งผู้ส่งมอบ และผู้ตรวจประเมินต่างก็ไม่ทราบว่าจะสามารถสอบกลับได้สู่หน่วยวัดที่รักษาไว้โดยมาตรฐานแห่งชาติได้อย่างไร ความเชื่อมั่นในความสามารถสอบกลับ

ได้อาจต้องอาศัยประจักษ์พยานจากการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการหรือการทดสอบความชำนาญของห้องปฏิบัติการเป็นองค์ประกอบในการพิจารณา

๑.๔.๓.๒ ใบรับรองการสอบเทียบ ควรจะชี้แจงการสอบกลับได้สู่มาตรฐานแห่งชาติรวมถึงการบอกถึงความไม่แน่นอนของการวัดที่รายงานด้วย

๑.๔.๓.๓ มีประจักษ์พยานที่ชัดเจนของการตรวจประเมินห้องปฏิบัติการตามเกณฑ์กำหนดของระบบคุณภาพ โดยผู้ส่งมอบเองหรือบุคคลที่สาม

๑.๔.๓.๔ การสอบได้ของการวัด โดยอาศัยค่าคงที่ตามธรรมชาติทางกายภาพ (Natural Physical Constants) ที่รักษาไว้โดยผู้ส่งมอบเอง จะกระทำได้อาศัยการยืนยันความถูกต้องของการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการ หรือกับมาตรฐานแห่งชาติก่อน

๑.๔.๓.๕ วัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการสอบเทียบ และทวนสอบอุปกรณ์การวัดจะต้องมีใบรับรองกำกับ และให้มั่นใจว่าผลการวัดที่รายงานในใบรับรองความสามารถสอบกลับได้สู่มาตรฐานของหน่วยวัด SI และวิธีวิเคราะห์ทดสอบที่ใช้เป็นวิธีที่ยอมรับในระดับนานาชาติ

๑.๕ บทสรุประบบมาตรวิทยา

ระบบมาตรวิทยา (Metrology System) หรือ ระบบการวัดแห่งชาติ (National Measurement System) ประกอบด้วย สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ทำหน้าที่รักษามาตรฐานการวัดของประเทศ และห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดความถูกต้องของมาตรฐานการวัดจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติสู่ผู้ใช้งาน เพื่อยืนยันผลการวัดและความถูกต้องของการตรวจ วัด และทดสอบ ที่กำกับไปกับสินค้า ให้เป็นไปตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดของประเทศคู่ค้า

ระบบการวัดแห่งชาติ จึงเป็นความจำเป็นที่แต่ละประเทศจะต้องมี และพัฒนาให้มีความสามารถในการวัดที่แม่นยำ เพื่อลดการทดสอบซ้ำจากปลายทางและเพื่อให้มีสินค้าสามารถแข่งขันได้

ถ้าปราศจากระบบการวัดแห่งชาติที่เข้มแข็ง ก็อาจกล่าวได้ว่า ประเทศไม่สามารถที่จะแข่งขันกับนานาชาติประเทศได้ในยุคของการกีดกันทางการค้า โดยอาศัยความได้เปรียบทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มาเป็นข้อจำกัดทางคุณภาพของสินค้านั่นเอง

๑.๖ คำสั่งกองบัญชาการทหารสูงสุด ที่ ๕๐๖/๒๕๑๓

(สำเนา)

กบ.ทอ.๗๑๘๑/๑๓

คำสั่งกองบัญชาการทหารสูงสุด (เฉพาะ)

ทอ.๑๖๑๑๓/๑๓

ที่ ๕๐๖/๒๕๑๓

เรื่อง กิจการตรวจปรับมาตรฐานเครื่องวัดชนิดอิเล็กทรอนิกส์-ไฟฟ้า ประเภท ๓

ตามที่ได้อนุมัติหนังสือ บก.ทหารสูงสุด ที่ กท ๐๓๐๖/๔๐๑๓ ลง ๑๑ พ.ย.๑๒ ให้ ทอ.เป็นผู้จัดงานเอกเทศในกิจการตรวจปรับมาตรฐานเครื่องวัดชนิดอิเล็กทรอนิกส์-ไฟฟ้า ประเภท ๓ ของหน่วยงานใน บก.ทหารสูงสุด แล้วนั้น เพื่อให้กิจการนี้ดำเนินไปโดยเรียบร้อย จึงให้ปฏิบัติดังต่อไปนี้

๑. ให้ ทอ.เป็นผู้ควบคุมอำนวยการ โดยมีหน้าที่ดังนี้

- ๑.๑ ควบคุมทางด้านกำหนดนโยบายวิธีการและการกำกับดูแล พร้อมทั้งประสานงาน
- ๑.๒ จัดการในเรื่องการจัดหน่วยงาน
- ๑.๓ ให้การสนับสนุนโดยทั่วไป

๒. เพื่อให้มีหน่วยงานและเจ้าหน้าที่ที่เหมาะสมสามารถดำเนินการนี้ได้โดยไม่ชักช้า จึงให้ ทอ.จัดหน่วยงานและผู้มีตำแหน่งดังต่อไปนี้ ปฏิบัติหน้าที่ให้เป็นไปตามความมุ่งหมาย คือ

๒.๑ จัด ส.ทอ.ให้ปฏิบัติหน้าที่เป็นหน่วยตรวจปรับมาตรฐานเครื่องวัดชนิดอิเล็กทรอนิกส์-ไฟฟ้า ประเภท ๓ ตาม ผนวก ก.ที่แนบ โดยมีหน้าที่ดังนี้-

๒.๑.๑ พิจารณาจัดหน่วยงาน สถานที่ เครื่องมือเครื่องใช้ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ

๒.๑.๒ พิจารณาจัดหา และอบรมเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานในกิจการนี้ให้มีจำนวนเพียงพอและปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

๒.๑.๓ เสนอระเบียบและวิธีการปฏิบัติต่อกิจการทั้งหมดที่อยู่ในความรับผิดชอบ

๒.๑.๔ จัดหาชิ้นส่วนซ่อมเครื่องวัดที่อยู่ในความรับผิดชอบทั้งหมด

๒.๑.๕ พิจารณาจัดทำโครงการในการดำเนินการ เพื่อให้สามารถทำการตรวจปรับมาตรฐานเครื่องวัดชนิดอิเล็กทรอนิกส์-ไฟฟ้า ประเภท ๓ ที่มีใช้อยู่ในขณะนี้ และคาดว่าจะมีใช้ในโอกาสต่อไป

๒.๒ ให้ จก.ส.ทอ.เป็นผู้อำนวยการกิจการตรวจปรับมาตรฐานเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์-ไฟฟ้า ประเภท ๓ มีหน้าที่ คือ

๒.๒.๑ รับผิดชอบจัดการควบคุมดูแลการปฏิบัติของกิจการให้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ

๒.๒.๒ รายงานผลงานและการปฏิบัติประจำเดือนต่อหน่วยเหนือตามลำดับถึง บก.ทหารสูงสุด

๓. เพื่อให้การอำนวยการในกิจการนี้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการของเหล่าทัพ และส่วนราชการที่เกี่ยวข้อง จึงให้จัดตั้งคณะเจ้าหน้าที่ประสานงานทางเทคนิค ขึ้นดังนี้

๓.๑ เจ้าหน้าที่ประสานงานทางเทคนิค ประกอบด้วยผู้แทนจาก บก.ทหารสูงสุด และเหล่าทัพ หน่วยละอย่างน้อย ๒ นาย อย่างมาก ๓ นาย

๓.๒ เจ้าหน้าที่ประสานงานทางเทคนิค มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

๓.๒.๑ พิจารณาช่วยเหลือและเสนอแนะงานด้านเทคนิคแก่ผู้อำนวยการกิจการ ฯ

๓.๒.๒ ช่วยเหลือผู้อำนวยการกิจการ ฯ ในการประสานงานทางเทคนิคระหว่างเหล่าทัพ

๓.๒.๓ พิจารณาวิเคราะห์และประเมินค่าผลงาน เพื่อเสนอแนะการที่เหมาะสมในการส่งเสริมให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด ทั้งนี้โดยทำการพบปะปรึกษาหารือกันเป็นประจำ

๓.๓ ให้ บก.ทหารสูงสุด และเหล่าทัพ เสนอรายชื่อเจ้าหน้าที่ประสานงานทางเทคนิคตามข้อ ๓.๑ ไปยังผู้อำนวยการกิจการ ฯ

๔. เรื่องงบประมาณ ให้ ทอ.ของงบประมาณในการจัดตั้งในรูปโครงการ และเสนอของงบประมาณ
ดำเนินการประจำปี

๕. ให้ส่วนราชการใน บก.ทหารสูงสุด และเหล่าทัพ ดำเนินการดังนี้

๕.๑ ส่วนราชการใน บก.ทหารสูงสุด และเหล่าทัพ ให้ความร่วมมือเต็มที่

๕.๒ ให้ผู้อำนวยการกิจการ ฯ ติดต่อประสานงานกับเจ้าหน้าที่ของ บก.ทหารสูงสุด และเหล่าทัพ
ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับกิจการปรับมาตรฐานเครื่องวัดโดยตรง

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๑๘ ธันวาคม พ.ศ.๒๕๑๓

รับคำสั่ง ผบ.ทหารสูงสุด
(ลงชื่อ) พล.อ.อ.ทวิ จุลละทรัพย์
(ทวิ จุลละทรัพย์)
เสธ.ทหาร



ระเบียบกองทัพอากาศ
ว่าด้วยการปฏิบัติต่อบริษัทเครื่องวัด
พ.ศ.๒๕๕๔

โดยที่เป็นการสมควรปรับปรุงและแก้ไขระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการปฏิบัติต่อบริษัทเครื่องวัดให้เหมาะสม และสอดคล้องกับโครงสร้างกองทัพอากาศ ตามอัตรากองทัพอากาศปี ๒๕๕๒ และระเบียบ คำสั่งที่เกี่ยวข้อง จึงวางระเบียบไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ระเบียบนี้เรียกว่า “ระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการปฏิบัติต่อบริษัทเครื่องวัด พ.ศ.๒๕๕๔”

ข้อ ๒ ระเบียบนี้ให้ใช้บังคับตั้งแต่วันนี้เป็นต้นไป

ข้อ ๓ ให้ยกเลิกระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการปฏิบัติต่อบริษัทเครื่องวัด พ.ศ.๒๕๔๔ บรรดาระเบียบ หรือคำสั่งอื่นใด ในส่วนที่กำหนดไว้แล้วในระเบียบนี้ หรือซึ่งขัดหรือแย้งกับระเบียบนี้ ให้ใช้ระเบียบนี้แทน

ข้อ ๔ ในระเบียบนี้

๔.๑ “เครื่องวัด” หมายความว่า อุปกรณ์ทดสอบ วัด และวิเคราะห์ (Test, Measurement and Diagnostic Equipment) ที่ใช้ในการบำรุงรักษา ประเมิน วัด สอบเทียบ ทดสอบ ตรวจสอบ วินิจฉัย หรืออาจใช้ในการตรวจสอบวัตถุ พัสตุ ตลอดจนระบบต่าง ๆ ของอุปกรณ์

๔.๒ “กองมาตรวิทยา” หมายความว่า กองมาตรวิทยา กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ ทหารอากาศ

๔.๓ “หน่วยผู้ใช้” หมายความว่า ผู้ใช้เครื่องวัดหรือหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในสาขาของของผู้ใช้เครื่องวัด เช่น เครื่องวัดที่ใช้งานในสาขาช่างอากาศ กรมช่างอากาศ เป็นหน่วยผู้ใช้ เป็นต้น

๔.๔ “หน่วยเกี่ยวข้อง” หมายความว่า หน่วยงานที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัดในเรื่องต่าง ๆ ที่ไม่เกี่ยวกับการซ่อมบำรุงและการทำงาน เช่น การเก็บรักษา การขนย้าย เป็นต้น

๔.๕ “Reference Standards” หมายความว่า เครื่องวัดที่เป็นมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งใช้เป็นหลักในการสอบเทียบมาตรฐานและซ่อมบำรุงเครื่องวัด

๔.๖ “No Calibration Required (NCR)” หมายความว่า เครื่องวัดที่ไม่ต้องสอบเทียบมาตรฐาน

๔.๗ “Calibrate Before Use (CBU)” หมายความว่า เครื่องวัดที่ต้องสอบเทียบมาตรฐานก่อนใช้งาน

๔.๘ “No Periodic Calibration (NPC)” หมายความว่า เครื่องวัดที่ไม่ต้องสอบเทียบมาตรฐานตามระยะเวลา

๔.๙ “User” ...

๔.๙ “User” หมายความว่า เครื่องวัดที่หน่วยผู้ใช้รับผิดชอบในการสอบเทียบมาตรฐาน และซ่อมบำรุงเอง ไม่ต้องสอบเทียบมาตรฐานที่กองมาตรวิทยา

๔.๑๐ “User/PMEL” หมายความว่า เครื่องวัดที่หน่วยผู้ใช้รับผิดชอบในการสอบเทียบมาตรฐาน โดยกองมาตรวิทยา ช่วยในด้านการซ่อมบำรุงเมื่อหน่วยผู้ใช้ร้องขอ

ข้อ ๕ การสอบเทียบมาตรฐานและซ่อมบำรุงเครื่องวัดอนุโลมให้ปฏิบัติตาม T.O. 00-20-14 หรือ T.O. 33K-1-100 หรือเอกสารอื่น ๆ ที่กองมาตรวิทยาพิจารณาแล้วว่าใช้อ้างอิงได้

ข้อ ๖ การปฏิบัติต่อเครื่องวัด

๖.๑ No Calibration Required (NCR) เมื่อหน่วยผู้ใช้ตรวจสอบแล้วพบว่าเครื่องวัดทำงานไม่ถูกต้อง ให้ส่งซ่อมหรือสอบเทียบมาตรฐานที่กองมาตรวิทยา

๖.๒ Calibrate Before Use (CBU) เมื่อหน่วยผู้ใช้ต้องการใช้งานให้ส่งเครื่องวัดไปสอบเทียบมาตรฐานที่กองมาตรวิทยา ส่วนการกำหนดเครื่องวัดใดเป็น CBU กองมาตรวิทยาเป็นผู้กำหนด โดยได้รับความยินยอมจากหน่วยผู้ใช้ก่อนเสมอ

๖.๓ No Periodic Calibration (NPC) ได้แก่

๖.๓.๑ เครื่องวัดที่ไม่มีผลต่อความปลอดภัย และไม่ได้ใช้ตรวจรับรองเครื่องวัดอื่น

๖.๓.๒ เครื่องวัดที่ใช้ในการเรียนการสอน

เมื่อเครื่องวัดดังกล่าวทำงานไม่ถูกต้อง ให้ส่งซ่อม หรือสอบเทียบมาตรฐานที่กองมาตรวิทยา ส่วนการกำหนดเครื่องวัดใดเป็น NPC กองมาตรวิทยาเป็นผู้กำหนด โดยได้รับความยินยอมจากหน่วยผู้ใช้ก่อนเสมอ

ข้อ ๗ ป้ายกำกับพัสดุที่ใช้ในการสอบเทียบมาตรฐานและซ่อมบำรุงเครื่องวัด มี ๓ ชนิด ตามผนวกที่แนบ มีดังนี้

๗.๑ ทอ.สอ.๑๑๐ หมายถึง ป้ายรับรองมาตรฐานของเครื่องวัดที่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานและซ่อมบำรุงเรียบร้อยแล้วจากกองมาตรวิทยา

๗.๒ ทอ.สอ.๑๑๑ หมายถึง ป้ายที่แสดงว่าเครื่องวัดนั้นไม่ต้องสอบเทียบมาตรฐาน

๗.๓ ทอ.สอ.๑๑๒ หมายถึง ป้ายที่แสดงให้หน่วยผู้ใช้ทราบว่า ถ้าป้ายนี้ชำรุดฉีกขาดจากกัน ถือว่าการรับรองคุณภาพของเครื่องวัดนั้นเป็นโมฆะ

ข้อ ๘ การใช้ป้ายกำกับพัสดุ

๘.๑ ป้ายกำกับพัสดุตามข้อ ๗ กองมาตรวิทยา เป็นผู้ใช้

๘.๒ การใช้ป้ายกำกับพัสดุนอกเหนือจากที่กล่าวในระเบียบนี้ ให้ปฏิบัติตามคู่มือว่าด้วยการพัสดุของกองทัพอากาศ พ.ศ.๒๕๐๘ และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม

๘.๓ ป้ายกำกับพัสดุนั้นใดที่สอบเทียบโดยหน่วยงานภายนอกซึ่งได้รับการรับรองขีดความสามารถตามมาตรฐานสากลให้อนุโลมใช้ได้ตามระเบียบนี้

ข้อ ๙ กองมาตรวิทยา มีหน้าที่รับผิดชอบดำเนินการดังนี้

๙.๑ สอบเทียบมาตรฐาน ซ่อมบำรุง และรับรองมาตรฐานเครื่องวัดของกองทัพอากาศ และหน่วยงานอื่นใด ตามที่ได้รับมอบหมาย

๙.๒ บำรุงรักษาเครื่องวัดที่เป็น Reference Standards ระดับกองทัพ ให้เป็นมาตรฐานสากล และสอบเทียบ Reference Standards ระดับหน่วยขึ้นตรงกองทัพอากาศ และหน่วยงานอื่นใดตามที่ได้รับมอบหมาย

๙.๓ ดำเนินการ ...

๙.๓ ดำเนินการจัดทำแผน กำหนดการ ประสานงาน ในการควบคุมสถานภาพ เครื่องวัดที่เป็น Reference Standards และเครื่องวัดอื่น ๆ ซึ่งเกินขีดความสามารถในการสอบเทียบมาตรฐาน ของกองมาตรวิทยา ให้ได้รับการสอบเทียบมาตรฐานในระดับที่สูงกว่า

๙.๔ จัดทำคำแนะนำทางเทคนิคและวิชาการ การใช้งาน การซ่อมบำรุง และการ สอบเทียบมาตรฐานเครื่องวัด เมื่อหน่วยผู้ใช้ร้องขอ

๙.๕ พิจารณาออกใบรับรองการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration Certificates) และ ใบรายงานการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration Reports) ให้กับหน่วยผู้ใช้ที่ร้องขอตามความเหมาะสม

๙.๖ วิเคราะห์ข้อมูล วางแผน ตรวจสอบ ประกันคุณภาพให้ได้ตามระบบมาตรฐานสากล รวมทั้งให้คำปรึกษา แนะนำ การแก้ไขปัญหาการซ่อมบำรุง

ข้อ ๑๐ หน่วยผู้ใช้ มีหน้าที่รับผิดชอบดำเนินการดังนี้

๑๐.๑ สอบเทียบมาตรฐานและซ่อมบำรุงเครื่องวัด User

๑๐.๒ สอบเทียบมาตรฐานเครื่องวัด User/PMEL

๑๐.๓ ขอคำแนะนำทางเทคนิคและวิชาการ การใช้งาน การซ่อมบำรุง และการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องวัด จากกองมาตรวิทยา เมื่อจำเป็น

๑๐.๔ ส่งเครื่องวัดไปสอบเทียบมาตรฐานที่กองมาตรวิทยาตามระยะเวลาที่กำหนด ในป้าย ทอ.สอ.๑๑๐ หากเครื่องวัดดังกล่าวขัดข้องหรือชำรุดก่อนกำหนด ให้ดำเนินการตรวจสอบการทำงาน เบื้องต้นก่อนส่ง กองมาตรวิทยาทำการซ่อมบำรุงโดยไม่ต้องรอให้ถึงกำหนดวันหมดอายุใช้งาน

๑๐.๕ ส่งเครื่องวัดไปสอบเทียบมาตรฐานทันทีที่กองมาตรวิทยา เมื่อพบว่าป้าย ทอ.สอ.๑๑๒ ชำรุดฉีกขาดจากกัน หรือเมื่อป้ายกำกับพัสดุ ตามข้อ ๗ เกิดสูญหายหรือไม่ชัดเจน

๑๐.๖ ใช้เครื่องวัดแต่ละแบบอย่างระมัดระวัง โดยปฏิบัติตามหนังสือคู่มือการใช้งาน คู่มือการบริหารการซ่อมบำรุงอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ พ.ศ.๒๕๕๓ รวมทั้งระเบียบคำสั่งอื่นใดที่เกี่ยวข้อง

๑๐.๗ แต่งตั้งเจ้าหน้าที่ ควบคุม บำรุงรักษา และรับผิดชอบเครื่องวัด เพื่อดูแลรักษา เครื่องวัดให้มีสภาพพร้อมใช้งาน

๑๐.๘ รายงานยอดและสถานภาพเครื่องวัดทั้งหมดของหน่วย ส่งถึงกองมาตรวิทยา กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ จำนวน ๑ ชุด ภายในวันที่ ๑๐ มกราคม ของทุกปี สำหรับหน่วยใน กองทัพอากาศที่มีเครือข่าย Intranet ให้รายงานในรูปแบบไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอากาศ (e-mail) ส่งถึง pmel_job@rtaf.mi.th โดยปฏิบัติตามคู่มือการบริหารการซ่อมบำรุงอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ พ.ศ.๒๕๕๓ และต้องรายงานยอดและสถานภาพของเครื่องวัด เมื่อหน่วยผู้ใช้รับเครื่องวัดเพิ่มเติมใหม่ หรือเครื่องวัดเก่ามีสถานภาพเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทุกครั้ง

๑๐.๙ จัดอุปกรณ์ประกอบของเครื่องวัดประจำไว้กับตัวเครื่องวัด ตรวจสอบยอด และเก็บรักษาไว้ให้คงสภาพครบถ้วนตลอดเวลา พร้อมทั้งจัดทำบัญชีแสดงรายการอุปกรณ์ประกอบนั้น ผูกหรือ ติดกับตัวเครื่องวัดหรือกล่องใส่เครื่องวัดนั้นตามความเหมาะสม

๑๐.๑๐ เก็บเครื่องวัดที่มีกล่องบรรจุโดยเฉพาะ ไว้ในกล่องบรรจุนั้นตลอดเวลา ยกเว้นขณะใช้งาน เพื่อป้องกันฝุ่นละอองและความชื้น

ข้อ ๑๑ ห้ามใช้เครื่องวัด ในกรณีดังต่อไปนี้

๑๑.๑ แสดงค่าการวัดไม่ถูกต้องตามคู่มือหรือเอกสารเทคนิค

- ๑๑.๒ ครอบอายุใช้งานตามที่กำหนดไว้ในป้าย ทอ.สอ.๑๑๐
 ๑๑.๓ ป้าย ทอ.สอ.๑๑๒ ชำรุดฉีกขาดจากกัน
 ๑๑.๔ ป้ายกำกับพัสดุ ตามข้อ ๗ สูญหายหรือไม่ชัดเจน

ข้อ ๑๒ การส่งเครื่องวัดเข้าสอบเทียบมาตรฐานและซ่อมบำรุงที่กองมาตรวิทยา ให้หน่วยผู้ใช้งานดำเนินการดังนี้

๑๒.๑ ส่งอุปกรณ์ประกอบเครื่องวัดที่จำเป็น สำหรับใช้สอบเทียบมาตรฐานเครื่องวัดคู่มือการใช้งาน คู่มือการซ่อมบำรุง ไปพร้อมกับเครื่องวัดที่ส่งสอบเทียบมาตรฐาน และบันทึกรายการอุปกรณ์ประกอบพิเศษเหล่านั้นลงในใบหลักฐานการนำส่งด้วยทุกครั้ง

๑๒.๒ ส่งผ่านคลังหน่วย ในสายงานรับผิดชอบประเภทพัสดุนั้น

๑๒.๓ กรณีที่มีความจำเป็นเร่งด่วนให้นำส่งโดยตรงที่กองมาตรวิทยา หรือเจ้าหน้าที่ไปปฏิบัติงานนอกที่ตั้งหรือปฏิบัติตามคำแนะนำในคู่มือการบริหารการซ่อมบำรุงอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ พ.ศ.๒๕๕๓

ข้อ ๑๓ การส่งเครื่องวัดคืนหน่วยผู้ใช้งาน ให้กองมาตรวิทยา ส่งเครื่องวัดคืนหน่วยผู้ใช้งานตามสายงานปกติ หรือเจ้าหน้าที่ไปปฏิบัติงานนอกที่ตั้ง หรือประสานหน่วยผู้ใช้งานให้รับกลับคืน

ข้อ ๑๔ การเคลื่อนย้าย การขนย้าย และนำพาเครื่องวัด ให้หน่วยผู้ใช้งานและหน่วยเกี่ยวข้องดำเนินการ ดังนี้

๑๔.๑ จัดลำดับความสำคัญเร่งด่วนในการขนส่งเครื่องวัดเป็นอันดับ ๑

๑๔.๒ ปฏิบัติ ตามข้อ ๑๒ และ ๑๓

๑๔.๓ บรรจุในภาชนะที่มิดชิดและมีวัสดุกันกระแทกกระเทือน เพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายจากสภาพอากาศ และการเคลื่อนย้าย

๑๔.๔ กระทำการเคลื่อนย้าย ขนย้าย และนำพาด้วยความระมัดระวังให้กระทบกระเทือนน้อยที่สุด

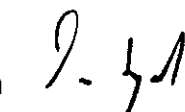
๑๔.๕ ปฏิบัติตามคู่มือว่าด้วยการพัสดุของกองทัพอากาศ พ.ศ.๒๕๐๘ และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม และระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.๒๕๕๒ และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม รวมทั้งระเบียบคำสั่งอื่นใดที่เกี่ยวข้อง

ข้อ ๑๕ การจำหน่ายเครื่องวัด ให้กองมาตรวิทยา เป็นหน่วยพิจารณาจำหน่ายเครื่องวัดที่เห็นว่าชำรุดจนไม่สามารถซ่อมให้ใช้ราชการได้ หรือซ่อมแล้วไม่คุ้มค่า หรือไม่ปลอดภัยในการใช้ราชการ โดยปฏิบัติตามคู่มือว่าด้วยการพัสดุของกองทัพอากาศ พ.ศ.๒๕๐๘ และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม และระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.๒๕๕๒ และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม

ข้อ ๑๖ ให้เจ้ากรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ รักษาการตามระเบียบนี้ และมีอำนาจออกระเบียบปลีกย่อยซึ่งไม่ขัดหรือแย้งกับระเบียบนี้ได้ตามที่เห็นสมควรโดยให้ถือเป็นส่วนหนึ่งซึ่งมีผลใช้บังคับตามระเบียบนี้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ ๒๑ กรกฎาคม พ.ศ.๒๕๕๔

พลอากาศเอก



(อิทธิพร สุภวงศ์)

ผู้บัญชาการทหารอากาศ

ผนวก ประกอบระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการปฏิบัติต่อบริษัทเครื่องวัด

พ.ศ.....

| | | |
|---|---------------------------------|------------------|
| หมายเลขเครื่อง IDENTIFICATION NO. | | |
| เลขที่ทางเทคนิค AUTHORITY (T.O. ETC) | | |
| เปรียบเทียบมาตรฐาน CALIBRATION | | |
| % ความผิดพลาด % ACCURACY | หน้าที่ FUNCTION | พิเศษ SPECIAL |
| ชื่อผู้รับ Certified By: | วันที่รับ DATE CALIBRATED | |
| | วันที่หมดอายุใช้งาน DATE DUE | |
| ชื่อผู้รับ Certified By: | วันที่รับ DATE CALIBRATED | |
| | วันที่หมดอายุใช้งาน DATE DUE | |
| ป้าย ทอ.สอ.๑๑๐ | | |

ป้าย ทอ.สอ.๑๑๐

| |
|--|
| <p>NO CALIBRATION REQUIRED</p> <p>ไม่ต้องสอบเทียบมาตรฐาน</p> <p>ป้าย ทอ.สอ.๑๑๑</p> |
|--|

ป้าย ทอ.สอ.๑๑๑

| |
|--|
| <p>NOTICE CERTIFICATION VOID WHEN SEAL IS BROKEN</p> <p>การรับรองคุณภาพเป็นโมฆะเมื่อป้ายฉีกขาด</p> <p>ป้าย ทอ.สอ.๑๑๒</p> |
|--|

ป้าย ทอ.สอ.๑๑๒

บทที่ ๒ METER

๒.๑ หลักการเบื้องต้นของมิเตอร์

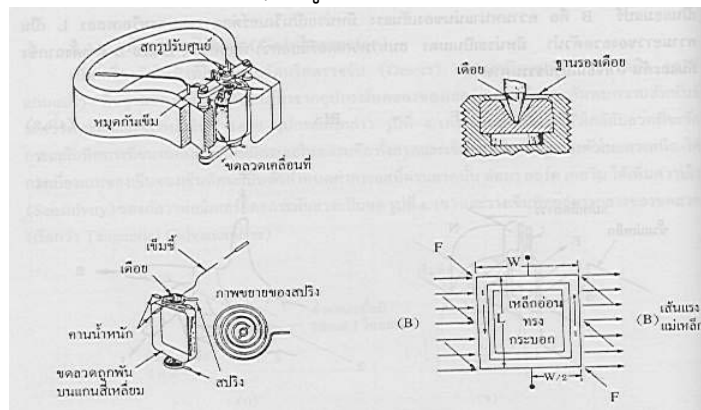
โดยเหตุที่ไม่สามารถที่จะนับจำนวนอิเล็กตรอน หรือ ปริมาณไฟฟ้า ที่ไหลผ่านตัวนำได้ด้วยตาเปล่า จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดเป็นเครื่องบ่งชี้ เครื่องวัดนั้นก็คือ มิเตอร์ (Meter) โดยอาศัยสมบัติเบื้องต้น เมื่อกระแสเคลื่อนที่ไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิด ๒ ปรากฏการณ์ คือ กระแสทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรอบ ๆ ตัวนำและกระแสทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวนำ และความร้อนทำให้เกิดกระแสใน

๒.๑.๑ มิเตอร์ที่ใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำ สนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับมัน ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวบอกทิศทางของกระแส มิเตอร์ที่ใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ Moving Coil Meter, Moving Iron Vane Meter และ Electro Dynamo Meter

๒.๑.๑.๑ Moving Coil Meter

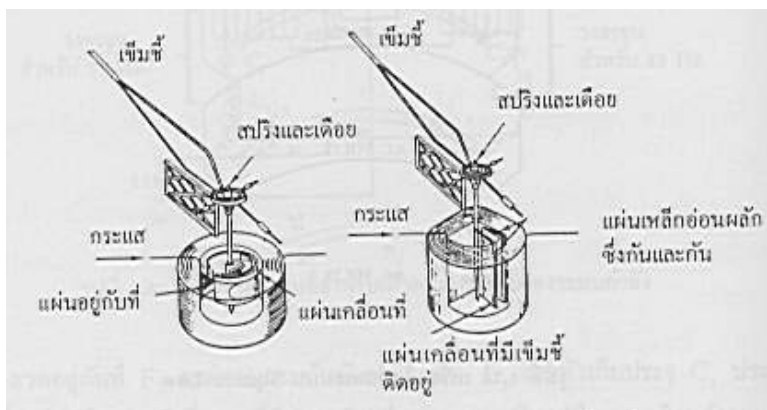
เป็นมิเตอร์ใช้ในการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำในการบอกปริมาณไฟฟ้า บางทีเรียกว่า D' Arsonval Meter หรือ Weston Type Meter มิเตอร์ชนิดนี้จะประกอบขึ้นด้วย แม่เหล็กถาวร Moving Coil และส่วนประกอบอื่น ๆ ดังรูป



รูปภาพที่ ๒-๑ แสดง Moving Coil Meter

๒.๑.๑.๒ Moving Iron Vane Meter

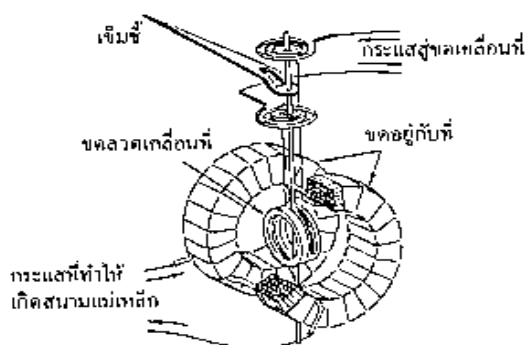
มิเตอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการผลัดกันของขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกับเมื่อขดลวดได้รับกระแสก็จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้ Vane สองอันที่บรรจุอยู่ในขดลวดรูปทรงกระบอกอันหนึ่งเคลื่อนที่ได้ อีกอันหนึ่งอยู่กับที่ จะเกิดการผลัดกันเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก เข็มของมิเตอร์ที่ยึดอยู่กับ Vane ที่เคลื่อนที่ได้ จะชี้บอกปริมาณของกระแส



รูปภาพที่ ๒-๒ แสดง Moving Iron Vane Meter

๒.๑.๑.๓ Electro Dynamo Meter

มิเตอร์ชนิดนี้หลักการการทำงานเหมือนกับ Moving Coil Meter โดยการใช้แม่เหล็กไฟฟ้าแทนแม่เหล็กถาวร ซึ่งเป็นขดลวดอยู่กับที่ แต่แยกเป็นสองส่วน เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณที่ส่วนขดลวดเคลื่อนที่ (Moving Coil) วางตัวอยู่ ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่อยู่กับที่ กระทำต่อกันเมื่อมีกระแสผ่านจะทำให้เกิดแรงบิด แรงบิดนี้จะถูกต้านโดยสปริง ซึ่งเป็นทางเดินของกระแสเข้าสู่ Moving Coil เข็มมิเตอร์ที่ติดตั้งบน Moving Coil จะแสดงขนาดของปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการวัด



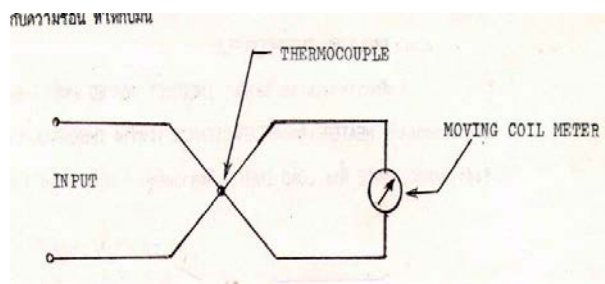
รูปภาพที่ ๒-๓ แสดง Electro Dynamo Meter

๒.๑.๒ มิเตอร์ที่ใช้ความร้อน

มิเตอร์ที่ทำงานโดยใช้ความร้อนก็คือ Thermocouple Meter เมื่อนำลวดโลหะ ๒ เส้น ที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าจุดปลายทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อและถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออกจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายด้านเปิด (See Beck Voltage) ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เทอร์โมคัปเปิล จะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิของส่วนที่ทำให้เกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้น และการเบี่ยงเบนของส่วนขดลวดเคลื่อนที่ที่จะเป็นสัดส่วนต่อค่ากำลังที่ใช้ไป (I^2R) ในตัวนำความร้อน (Heater) ค่าที่อ่านได้จะแปรค่าตาม I^2 ของตัวนำความร้อนและเป็นค่าประสิทธิผล (Effective) มิเตอร์แบบนี้แบ่งออกเป็น ๓ แบบ คือ Direct Heated Thermocouple, Indirect Heated Thermocouple และ Isolated Thermocouple

๒.๑.๒.๑ Direct Heated Thermocouple

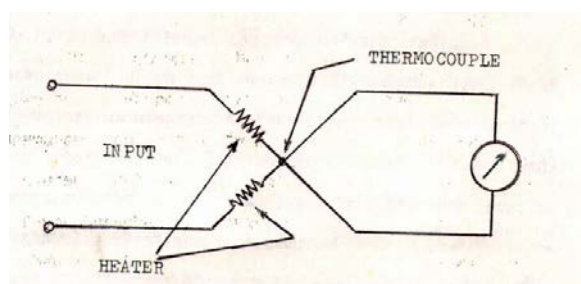
เมื่อเอาโลหะต่างชนิดกัน สองอัน เอาปลายข้างหนึ่งเชื่อมติดกันแล้วให้ความร้อนที่ปลายที่ปลายที่ติดกันนั้น จะเกิดกระแสไหลขึ้นอีกข้างหนึ่งของปลายโลหะทั้งสอง กระแสนี้จะแปรผันตรงกับความร้อน ที่ให้กับมัน THERMOCOUPLE ชนิดนี้เหมาะสำหรับวัดอุณหภูมิมากกว่าวัดกระแสไฟฟ้าเพราะมีความต้านทานต่ำมาก



รูปภาพที่ ๒-๔ แสดง Direct Heated Thermocouple

๒.๑.๒.๒ Indirect Heated Thermocouple

หลักการก็เหมือนกับ Direct Heated แต่เพื่อเป็นการเพิ่ม Sensitivity ของ Thermocouple จึงใส่ความต้านทานติดไว้กับ Thermocouple เพื่อเป็น Heater เมื่อตัวต้านทานได้รับกระแสทำให้เกิดความร้อน ซึ่งเป็นกำลังสองของกระแส Input ความร้อนนี้จะถูกส่งไปยัง Thermocouple เพื่อให้ได้กระแสออกมา



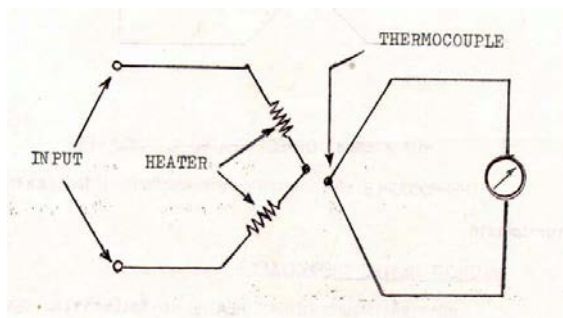
รูปภาพที่ ๒-๕ แสดง Indirect Heated Thermocouple

คุณสมบัติที่สำคัญของ Indirect Heated Thermocouple

- (๑) สามารถใช้ได้ทั้ง A.C. และ D.C.
- (๒) Response ค่า RMS ของ A.C. Input
- (๓) มิเตอร์เป็นแบบ Square Law
- (๔) มีความต้านทานต่ำไม่เหมาะสมสำหรับ D.C. (ที่ความถี่ต่ำกว่า ๑๐ Hz)
- (๕) ใช้ได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่ R.F. (ไม่เกิน ๑๐ MHz)

๒.๑.๒.๓ Isolated Thermocouple

มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ Indirect Heated แต่ตัว Thermocouple จะถูกแยกออกจาก Heater เพื่อลด Capacitance ระหว่าง Thermocouple กับ Heater ซึ่งค่า Capacitance นี้จะ Load Input เมื่อความถี่สูง ๆ ผ่านมากกว่า ๑,๐๐๐ MHz ขึ้นไป



รูปภาพที่ ๒-๖ แสดง Isolated Thermocouple

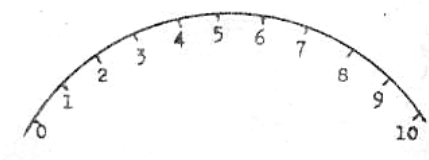
๒.๑.๓ Meter Sensitivity

Sensitivity ของการเคลื่อนที่ของเครื่องวัดโดยทั่วไปแสดงออกในรูปของข้อเท็จจริงที่ว่า มันต้องการกระแสจำนวนเล็กน้อยเพียงใด เพื่อให้เข็มของเครื่องวัดสามารถเคลื่อนที่ไปได้สูงสุดสเกล ดังนั้นเครื่องวัดที่มี Sensitivity สูง ก็คือเครื่องวัดที่ใช้กระแสเพียงจำนวนเล็กน้อย ก็สามารถทำให้เข็มเคลื่อนที่ไปได้สูงสุดสเกล Sensitivity ของมิเตอร์ แสดงในรูปของกระแสเต็มสเกล (I-Full-Scale หรือ I_{FS} หรือ Ohm-Per-Volt)

๒.๑.๔ Meter Scale

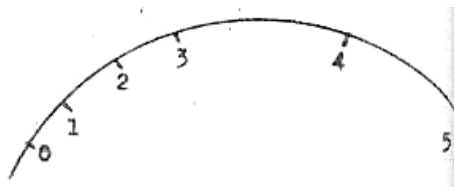
โดยทั่วไปแล้ว มิเตอร์ตัวหนึ่งมักออกแบบ ให้วัดได้หลายอย่าง เช่น วัดกระแสโวลเตจ ความต้านทาน และ Output ฉะนั้น มิเตอร์จึงมีการแบ่งสเกลออกเป็นหลายแบบด้วยกัน โดยทั่วไป สเกลจะแบ่งออกเป็น ๔ แบบ

๒.๑.๔.๑ Linear Scale คือ มิเตอร์ที่แบ่งสเกลออกเป็นส่วน ๆ ซึ่งแต่ละส่วน มีขนาดเท่ากันตัวอย่างมิเตอร์ที่ใช้ Linear Scale คือ Moving Coil Meter



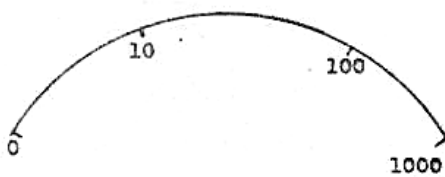
รูปภาพที่ ๒-๗ แสดง Linear Scale

๒.๑.๔.๒ Square Law Scale มิเตอร์ที่แบ่งสเกลในลักษณะ Square Law ตัวอย่างมิเตอร์ที่ใช้ Square Law Scale คือ Iron Vane Meter หรือ Thermocouple Meter ลักษณะของสเกล ช่วงแรกถี่ช่วงหลังจะห่าง



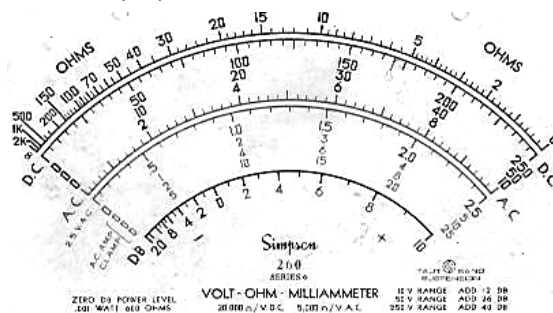
รูปภาพที่ ๒-๘ แสดง Square Law Scale

๒.๑.๔.๓ Logarithmic Scale คือ มิเตอร์ที่แบ่งสเกลตามค่าของ Log บางทีเรียกว่า Db Scale ตัวอย่างของมิเตอร์ที่ใช้ Log Scale คือ Output Meter



รูปภาพที่ ๒-๙ แสดง Logarithmic Scale

๒.๑.๔.๔ Non-Linear Scale คือ มิเตอร์ที่แบ่งสเกลออกเป็น ส่วน ๆ ที่แต่ละส่วนไม่เท่ากันเลย และไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอน แต่เกิดจากการกำหนดค่าที่ได้จากเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนของมันที่เกิดจากการต่อความต้านทานในวงจรที่ได้รับการออกแบบเฉพาะแบบ เช่น สเกลของโอห์มมิเตอร์หรือ สเกลของเดซิเบล (dB) เป็นต้น



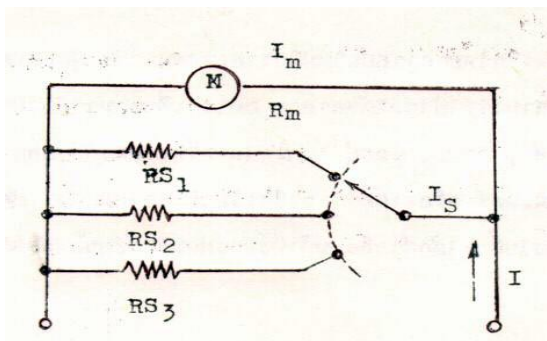
รูปภาพที่ ๒-๑๐ แสดงสเกลแบบ Non-Linear scale ของ Ohms และ dB

๒.๒ Analog Multimeter

๒.๒.๑ กล่าวนำ

เนื่องจากวิทยาการสมัยใหม่มีความเจริญมากขึ้น ผู้ผลิตเครื่องวัดจึงได้ออกแบบมิเตอร์ขึ้นมา โดยให้สามารถใช้งานได้หลาย ๆ อย่าง เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้ซึ่งสามารถวัดได้ทั้ง โวลต์, โอห์ม, แอมแปร์ ได้ภายในเครื่องเดียวกัน ผลจากการนำเอาหน้าที่หลาย ๆ อย่างมาไว้ในมิเตอร์เครื่องเดียว เราจึงเรียกมิเตอร์ชนิดนี้ว่า มัลติมิเตอร์ ซึ่งต่อไปนี้จะได้กล่าวถึง หน้าที่ของแต่ละฟังก์ชันของมัลติมิเตอร์

๒.๒.๒ Ammeter กระแสตรง



รูปภาพที่ ๒-๑๑ แสดง Ammeter Diagram

Ammeter เป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดกระแส ถ้าฟังก์ชันเคลื่อนที่ของขดลวด (Moving Coil) เพียงอย่างเดียวไม่สามารถวัดกระแสจำนวนมาก ๆ ได้ เนื่องจากตัวมันเองทนกระแส

สูงสุดได้แค่ย่าน μA เท่านั้นเองเพื่อที่จะวัดกระแสได้มากขึ้น จำเป็นต้องนำความต้านทานมาต่อขนานกับขดลวด Moving Coil (ตามรูปภาพที่ ๑๑) ดังนั้นกระแสจำนวนที่มากกว่าจะไหลผ่านความต้านทานที่นำมาต่อ และกระแสส่วนน้อยจะไหลผ่านมิเตอร์ เครื่องวัดที่ออกแบบไว้สำหรับวัดกระแสได้หลาย ๆ ย่านต่างกัน ก็จะต้องมีความต้านทาน (R-Shunt) แต่ละอันสำหรับแต่ละย่านของการวัด เช่น ย่านการวัด ๐-๑๐ mA จะมี R_{S1} ต่อขนานกับขดลวด Moving Coil สำหรับค่าความต้านทานที่นำมาต่อขนานสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$R_s = \frac{I_m \times R_m}{I_s} \text{ และ } I_s = I - I_m$$

เมื่อ R_s = Shunt Resistance (ความต้านทานชัณฑ์)

R_m = Meter Resistance (ความต้านทานภายในของส่วนที่เคลื่อนที่)

I_s = Shunt Current (กระแสผ่านชัณฑ์)

I = กระแสที่ต้องการวัด

I_m = Meter Current (กระแสสูงสุดสเกล)

๒.๒.๒.๑ ตัวอย่าง ในการสร้าง Ammeter ตัวหนึ่ง เพื่อให้วัดกระแสได้ตั้งแต่ 0 - 10 mA, 0 - 100 mA และ 0 - 1 A ถ้ามิเตอร์มี Sensitivity 1 mA และความต้านทานของมิเตอร์ ๗๕ โอห์มจงหาค่า R_1 , R_2 และ R_3

วิธีทำ

ย่าน 0 - 10 mA

$$R_s = \frac{I_m \times R_m}{I_s}$$

เพื่อให้การอ่านบนสเกลได้สูงสุด 10 mA กระแสจะไหลผ่านมิเตอร์ 1 mA และกระแสที่เหลือจะไหลผ่าน R_s ซึ่งเท่ากับ 9 mA แทนค่าในสมการ

$$R_{S1} = \frac{1 \times 75}{9} = ๘.๓๓ \text{ โอห์ม}$$

ย่าน 0 - 100 mA

$$R_{S2} = \frac{1 \times 75}{99} = ๐.๗๕๘ \text{ โอห์ม}$$

ย่าน 0 - 1 A.

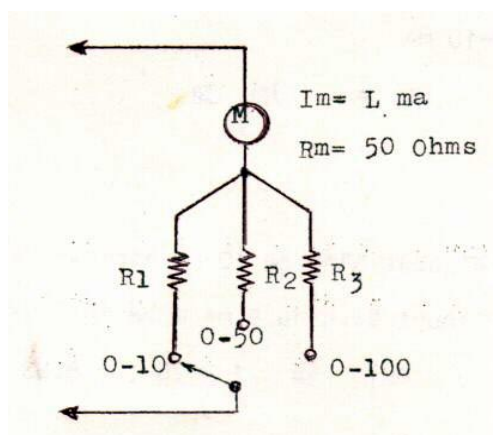
$$R_{S3} = \frac{1 \times 75}{999} = ๐.๐๗๕๑ \text{ โอห์ม}$$

๒.๒.๒.๒ ข้อควรระวังในการใช้แอมมิเตอร์

- (๑) ต่อแอมมิเตอร์อันดับกับวงจรหรือส่วนของวงจรที่มีกระแสไหลผ่านเสมอ
- (๒) ห้ามต่อแอมมิเตอร์คร่อมขนานกับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ใด ๆ เนื่องจากความต้านทานภายในมีค่าน้อย
- (๓) เมื่อไม่ทราบจำนวนที่จะทำการวัดให้ตั้ง Range สูงสุดก่อน และค่อย ๆ เปลี่ยน Range จนสามารถอ่านค่าได้ความเที่ยงตรงจะสูงขึ้นที่พิสัยการวัดให้ค่าใกล้ค่าสูงสุดสเกล
- (๔) ตรวจสอบ Function และ Polarity ให้เรียบร้อยก่อนจะทำการวัด เพราะการต่อกลับขั้วจะทำให้เข็มเคลื่อนที่กลับทิศ อาจทำให้เข็มงอหรือถูกทำลาย

๒.๒.๓ Voltmeter กระแสตรง

เครื่องวัดแบบ D' Arsonval Meter นอกจากจะใช้เป็น Ammeter แล้ว ยังสามารถใช้เป็น Volt Meter ได้ด้วย โดยอาศัยการวัดค่ากระแส แล้วนำมาคูณกับ ค่า ความต้านทานของมิเตอร์ ซึ่งทราบค่าแล้ว ก็จะได้ค่า Voltage ที่ตกคร่อมมิเตอร์อาศัยหลักการนี้นำมาสร้างเป็น Voltmeter ถ้าพ่วงมิเตอร์เพียงตัวเดียวไม่สามารถวัดค่า Voltage สูง ๆ ได้ จึงต้องนำความต้านทานต่ออนุกรมกับ Moving Coil เพื่อขยาย Range ของการวัดให้สูงขึ้น



รูปภาพที่ ๒-๑๒ แสดง Voltmeter Diagram

$$R_S = R_T - R_m = \frac{V}{I_m} - R_m$$

เมื่อ R_S = Series Resistance

R_T = Total Resistance

R_m = Meter Resistance

I_m = Meter Current

V = Voltage Range

๒.๒.๓.๑ ตัวอย่าง ในการสร้าง Voltmeter เครื่องหนึ่ง เพื่อให้วัดโวลต์ได้ตั้งแต่ 0 – 10 V., 0 – 50 V. และ 0 – 100 V. ถ้ามิเตอร์มีกระแส Full Scale 1 mA และความต้านทานของมิเตอร์ ๕๐ โอห์ม จงหาค่า R_1 , R_2 และ R_3

วิธีทำ

ย่าน 0 – 10 V.

$$R_T = R_1 + R_m$$

เมื่อ R_T = ความต้านทานรวมทั้งวงจรของย่าน 0 – 10 V.

R_1 = ความต้านทานที่นำมาต่ออนุกรม

R_m = ความต้านทานของมิเตอร์ (Moving Coil)

$$R_1 = R_T - R_m = \frac{E}{I_m}$$

$$R_1 = \frac{10}{0.001} - 50 = 10,000 - 50 = ๙,๙๕๐ \text{ โอห์ม}$$

ย่าน 0 – 50 V.

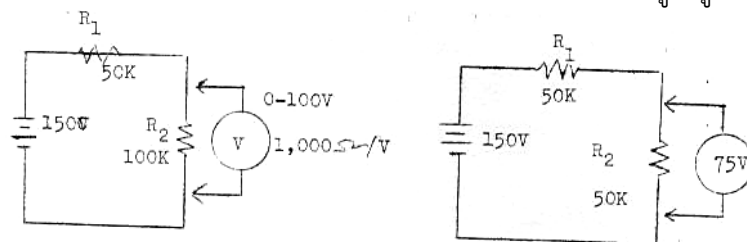
$$R_2 = \frac{50}{0.001} - 50 = 50,000 - 50 = 49,950 \text{ โอห์ม}$$

ย่าน 0 - 100 V.

$$R_3 = \frac{100}{0.001} - 50 = 100,000 - 50 = 99,950 \text{ โอห์ม}$$

๒.๒.๓.๒ Loading Effect

ในการนำ Voltmeter ไปใช้งาน เพื่อวัดโวลเตจ จะต้องนำมิเตอร์ ไปต่อขนานกับวงจรที่จะวัด ถ้ามิเตอร์ตัวที่เราไปวัด มีความต้านทานต่ำกว่าวงจรที่จะวัด ก็จะทำให้เกิดการผิดพลาด สาเหตุเนื่องมาจากตัวมิเตอร์เอง เพื่อความเข้าใจได้ง่ายโดยพิจารณาจากรูปภาพที่ ๑๓



รูปภาพที่ ๒-๑๓ แสดงการ Loading ของ Voltmeter

จากรูป แสดงให้เห็นการดึงกำลังแก่งจรด้วยโวลต์มิเตอร์ จะเห็นได้ว่าก่อนที่จะต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับวงจร โวลต์ตกคร่อม R_1 เท่ากับ ๑๐๐ โวลต์ เมื่อต่อมิเตอร์คร่อม R_2 ซึ่งตั้งไว้อย่าง ๐ - ๑๐๐ โวลต์ และมีเตอร์มี Sensitivity ๑,๐๐๐ โอห์ม/โวลต์ ก็เท่ากับว่า มีความต้านทาน ๑๐๐,๐๐๐ โอห์ม มาต่อขนานกับ R_2 (ความต้านทานในของมิเตอร์ในตำแหน่งใด ๆ = Sensitivity x Full Scale Voltage Reading) ฉะนั้นความต้านทานสมมูลตกคร่อม R_2 เท่ากับ ๕๐,๐๐๐ โอห์ม ดังนั้นโวลต์ที่ตกคร่อม R_2 ซึ่งอ่านจากมิเตอร์จึงเท่ากับ ๗๕ โวลต์ จะเห็นได้ว่าเครื่องวัดได้ทำการดึงกำลังวงจร จนเป็นเหตุให้อ่านค่าโวลต์ผิดพลาด

ถ้าเครื่องวัดอันเดียวกันนี้ใช้ย่านการวัด 0 - 500 V. ค่าความต้านทานของมิเตอร์เท่ากับ ๕๐๐,๐๐๐ โอห์ม เมื่อรวมกับ R_2 ความต้านทานรวมทั้งหมดก็จะกลายเป็น ๘๓.๓ x ๑,๐๐๐ โอห์ม โวลต์ตกคร่อม R_2 ประมาณ ๘๓.๗๕ โวลต์ จะเห็นได้ว่าความต้านทานของเครื่องวัดที่สูง ก็จะไม่ดึงกำลังวงจร ดังนั้นในการวัดควรเลือกใช้เครื่องวัดที่มี Sensitivity สูง ๆ หรือเลือกย่านการวัดที่สูง ๆ เท่าที่จะทำได้ในการจะอ่านค่าเพื่อไม่เกิดการดึงกำลังวงจร และค่าในการวัดก็จะเที่ยงตรงแน่นอนมากขึ้น

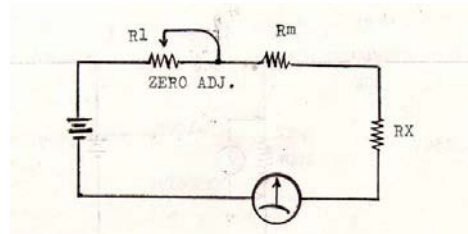
๒.๒.๓.๓ ข้อควรระวังในการใช้ Voltmeter

- (๑) ต้องพิจารณาขีดของการต่อให้ถูกต้อง
- (๒) ต่อ Voltmeter คร่อมวงจร หรือองค์ประกอบวงจรที่ต้องการวัดแรงดัน
- (๓) เมื่อวัดค่าแรงดันที่ไม่ทราบค่าแน่นอนให้เลือกพิสัยการวัดสูงสุด แล้วจึงปรับให้ต่ำลง
- (๔) ระวังผลของการโหลดวงจรกับการวัดแรงดันค่าต่ำ ๆ หรือคร่อมความต้านทานค่าสูง ๆ

๒.๒.๔ Ohmmeter กระแสตรง

Ohmmeter กระแสตรง เป็นเครื่องมือเพื่อใช้วัดค่าความต้านทานซึ่งแบ่งออกเป็น ๒ แบบ คือ Series Type Ohmmeter และ Shunt Type Ohmmeter

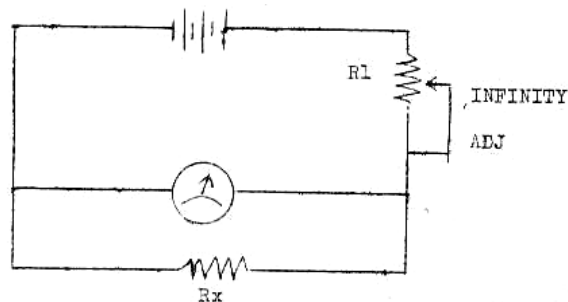
๒.๒.๔.๑ Series Type Ohmmeter



รูปภาพที่ ๒-๑๔ แสดง Series Type Ohmmeter

หลักการทำงานอย่างง่าย ๆ ของ Series Type Ohmmeter คือก่อนทำการวัดค่าความต้านทานจะต้อง Short ปลายสาย และปรับ R_1 (Zero Adjust) เพื่อให้กระแสที่สุดสเกลนั้นก็ คือ การปรับเข็มของมิเตอร์ให้อ่านศูนย์โอห์ม หลังจากนั้นนำ สายวัดที่ Short กันออกเชื่อมมิเตอร์จะชี้ (Infinity) นำความต้านทานที่ต้องการจะวัด (R_x) ต่อระหว่างปลายสายทั้งสอง จะทำให้เข็มมิเตอร์ชี้ตำแหน่งระหว่าง $0 - \alpha$ ณ จุดนี้เองคือค่าความต้านทานของ R_x ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะอ่านได้จากสเกล ค่า R_m และค่าแรงไฟของ Battery จะเป็นตัวกำหนด Range มิเตอร์แบบนี้มี Uncertainty 3%

๒.๒.๔.๒ Shunt Type Ohmmeter



รูปภาพที่ ๒-๑๕ แสดง Shunt Type Ohmmeter

โอห์มมิเตอร์แบบนี้ มิเตอร์จะชี้สุดสเกล เมื่อความต้านทานเป็น Infinity ที่ปลายสายและจะไม่มีกระแสไหลผ่านวงจรมิเตอร์ เมื่อ Short ปลายสาย และเข็มจะชี้ศูนย์ เมื่อมีความต้านทาน R_x มาต่อระหว่างปลายสาย จะมีกระแสจำนวนหนึ่งซึ่งไหลผ่าน R_x และมีกระแสอีกจำนวนหนึ่งไหลผ่านมิเตอร์ จะทำให้มิเตอร์ชี้ค่าหนึ่งระหว่าง 0 และ α (Full Scale) และค่านี้ก็คือค่า R_x นั่นเอง มิเตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับวัดความต้านทานที่มีค่าต่ำ ๆ และส่วนมากนิยมใช้กับ VTVM

๒.๒.๔.๓ ข้อควรระวังในการใช้ Ohmmeter

(๑) ก่อนทำการวัดค่าความต้านทาน ให้ต่อสายวัดเข้าด้วยกันและปรับ "Zero" หรือ "Ohm Adjust" ให้เข็มเครื่องวัดชี้ค่าศูนย์ก่อน และ ถ้าหากจำเป็นจะต้องเปลี่ยนย่านการวัด จะต้องตรวจสอบการปรับค่าศูนย์อีกครั้ง

(๒) โอห์มมิเตอร์จะจ่ายแรงไฟตรงจากภายในและขั้วของแรงไฟนี้ จะแตกต่างกันไปตามบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นจะต้องระมัดระวังในการวัดพวกสารกึ่งตัวนำ คือวงจรมีสารกึ่งตัวนำร่วมอยู่

(๓) โหมดมิเตอร์อาจเสียหายได้ ถ้าหากนำไปวัด หรือต่อ กับวงจรที่มีแรงไฟอื่นป้อนอยู่ และจะต้องเพิ่มความระมัดระวังให้มาก เมื่อใช้เครื่องวัดแบบ Multimeter จะต้องไม่ตั้งตำแหน่งโหม้มมิเตอร์ในขณะที่ต้องการวัด Voltage

(๔) เนื่องจากสเกลของเครื่องวัด ความต้านทานเป็นแบบ Nonlinear เพื่อความถูกต้องในการอ่านค่าความต้านทานควรเลือกอ่านค่าบริเวณกึ่งกลางของสเกลหรือทางด้าน 0Ω เมื่อต้องการค่าความถูกต้องที่สูงมากขึ้น

(๕) ควรถอดสายวัดออก และไม่ตั้งไว้ในตำแหน่งโหม้มมิเตอร์เมื่อเลิกใช้งาน แล้วควรตั้งไว้ที่ A.C. High Voltage

๒.๓ Digital Millimeter

๒.๓.๑ กล่าวโดยทั่วไป

Digital Multimeter เป็น Multimeter ที่แสดงค่าของการวัดออกเป็นตัวเลขแทนการใช้เข็มชี้บนสเกล Analog Meter การอ่านเป็นตัวเลขจะกระทำโดยอัตโนมัติ ข้อดีของ DMM เมื่อเปรียบเทียบกับ Analog Meter คือ

๒.๓.๑.๑ การอ่านเป็นตัวเลขโดยตรง ช่วยลดการผิดพลาดในการอ่าน

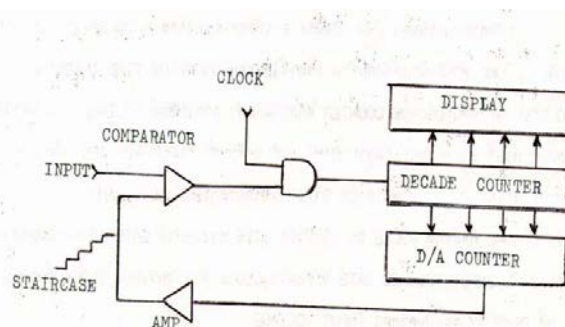
๒.๓.๑.๒ สามารถเปลี่ยน Range และ Polarity โดยอัตโนมัติ ทำให้ใช้งาน และลดการเสียหาย อันเกิดจาก Overload

๒.๓.๑.๓ มีความเที่ยงตรงและวัดได้รายละเอียด (Resolution) มากกว่า Analog Meter

๒.๓.๒ หลักการทำงาน DMM

DMM อาจแบ่ง ตามการทำงาน ของ Digital To Analog Converter ซึ่งมีหลายแบบด้วยกัน จะขอยกตัวอย่างเพียง ๓ แบบ คือ Staircase Ramp, Linear Ramp DMM และ Dual Slope Integrating Technique

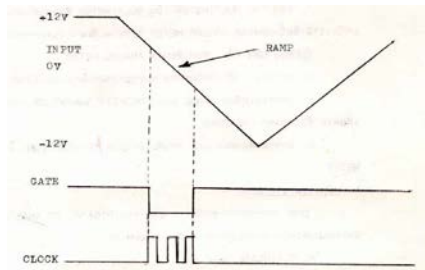
๒.๓.๒.๑ Staircase Ramp DMM



รูปภาพที่ ๒-๑๖ แสดง Staircase Ramp DMM

จากรูป Staircase Ramp DMM เกิดจากการทำงานร่วมกันของ Decade Counter และ D/A Converter การทำงานเริ่มต้นโดย Clock จะถูกป้อนให้กับ Decade Counter ซึ่งต่ออยู่กับ D/A Converter ซึ่งทำให้เกิด Staircase ขึ้น เมื่อค่าของ Staircase เท่ากับค่าของ Input Voltage แล้ว Gate จะหยุด Clock ค่าของจำนวนนับที่สะสมอยู่ใน Decade Counter จะถูกส่งไปให้ชุด Display ซึ่งจะอ่านค่าของ Input Voltage นั้นเอง

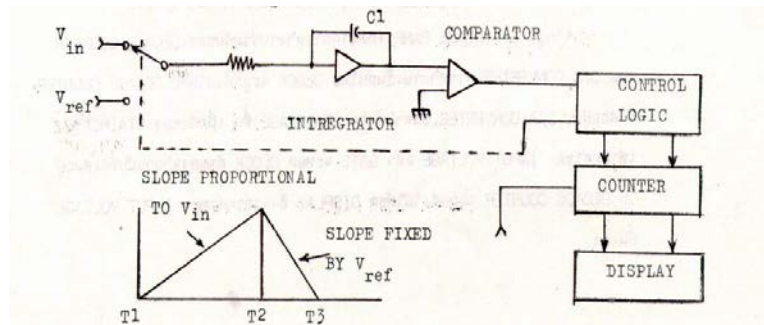
๒.๓.๒.๒ Linear Ramp DMM



รูปภาพที่ ๒-๑๗ แสดง Linear Ramp DMM

หลักการการทำงานของ Linear Ramp DMM คือการวัดระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงจาก Input จนถึง Ground หรือในทางตรงกันข้าม เวลาที่ได้จะถูกนำไปวัดแบบ Time Interval Counter คล้ายกับ Decade Counter ที่กล่าวมาแล้ว การเปลี่ยน Voltage เป็นเวลาได้แสดงตามรูปภาพที่ ๒-๑๗ การวัดจะเริ่มจาก Ramp เปรียบเทียบกับ Input Voltage เมื่อ Voltage เท่ากัน จะเกิด Pulse ทำหน้าที่เปิด Gate การวัดจะดำเนินต่อไปจน Ramp ถึงจุด ๐ Volt หรือ Ground ก็จะมี Pulse อีก เป็นตัวปิด Gate ช่วงเวลาที่ Gate เปิดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Input Voltage Gate จะยอมให้ Clock อ่านจำนวนของ Clock ที่ผ่านไปอ่านที่ Display จะเป็นค่าของ Input Voltage

๒.๓.๒.๓ Dual Slope Integrating Technique DMM



รูปภาพที่ ๒-๑๘ แสดง Dual Slope Integrating Technique DMM

Dual Slope Integrating Technique DMM เป็นอีกวิธีที่นิยมกันมากที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยน Voltage ให้เป็นเวลา แล้วเอาเวลาที่ได้ไปทำการวัด โดยวิธีวัด Time Interval

ที่เวลา T_1 ค่า Voltage Input (V_{in}) จะถูกป้อนให้กับ Integrator C_1 จะเริ่มประจุ (Charge) ตามอัตราที่กำหนดโดย V_{in} และ Counter จะเริ่ม Count แบบ Totalize จนกระทั่งถึงจำนวน Pulse ที่กำหนดให้คือ T_2

ถึงเวลา T_2 Control จะเปลี่ยน Input ของ Integrator จาก V_{in} เป็น V_{ref} ช่วงเวลา T_2 ถึง T_3 เป็นช่วงเวลาที่ C_1 คลายประจุ (Discharge) ในอัตราที่กำหนดโดย V_{ref} และ Counter จะเริ่มนับเวลาตั้งแต่ T_2 จนถึง T_3

จุด T_3 คือ เวลาที่ Output ของ Integrator ตกลง T_0 และ Counter จะหยุดนับและจำนวนนับที่คงอยู่ใน Counter จะแปรผันตรงกับ Input Voltage ทั้งนี้เพราะเวลาที่ทำให้ C_1 คลายประจุ (Discharge) นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ (Charge) ที่ได้มาจาก V_{in} ดังนั้น ค่าที่อ่านบน Display จึงแสดงค่า V_{in}

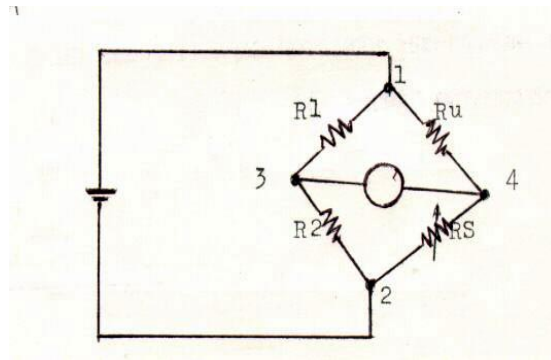
ข้อดี ของ Dual Slope Technique DMM ที่เหนือกว่า DMM แบบอื่น ๆ คือ มันสามารถหักล้างความผิดพลาดของ Resistor Capacitor และ Clock Rate ตลอดจนการทำงานของ Integrator ได้ด้วยตัวเอง

๒.๔ การวัดค่าความต้านทาน (Resistance)

๒.๔.๑ D.C. Resistance Bridge

โดยทั่วไปแล้ว การวัดความต้านทาน จะนิยมใช้ Ohmmeter เป็นเครื่องมือวัด ซึ่งการใช้ Ohmmeter จำเป็นต้องใช้กระแสจำนวนหนึ่งในวงจรวัด เพื่อให้วงจรทำงานไว้จะเป็นแบบ Analog หรือ Digital ซึ่งเราทราบกันในนามของความไว (Sensitivity) ของเครื่องมือวัด ซึ่งการดึงกระแสจำนวนหนึ่งนั้นเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงเป็นการจำกัดขีดความสามารถของความแม่นยำของเครื่องมือวัด

ดังนั้น เพื่อให้การวัดเป็นไปอย่างถูกต้อง แม่นยำและมีมาตรฐานสูง จึงใช้วิธีการวัดแบบ Null ในการวัดค่าความต้านทาน นิยมใช้ D.C. Resistance Bridge เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาพสมดุล จะทำให้ระดับความต่างศักย์ของกระแสสองกิ่งของวงจร Bridge เท่ากันอย่างสมบูรณ์ก็จะเป็นการดึงกระแสใด ๆ เข้ามาในวงจรวัด ทำให้การวัดได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจดูการสมดุลของวงจร Bridge นิยมใช้ Galvanometer



รูปภาพที่ ๒-๑๙ แสดง D.C. Resistance Bridge

เมื่อ Bridge อยู่ในสภาพสมดุล ความต่างศักย์ระหว่างจุด ๓, ๔ เป็นศูนย์ขณะนั้นแรงดันคร่อม R_1 จะเท่ากับแรงดันคร่อม R_u ดังนั้น

$$V_{12} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{12} \frac{R_u}{R_u + R_s}$$

$$\text{ทำให้ } R_1(R_u + R_s) = R_u(R_1 + R_2)$$

$$R_1 \times R_s = (R_u \times R_2)$$

เมื่อ R_1, R_2 = Ratio Resistance

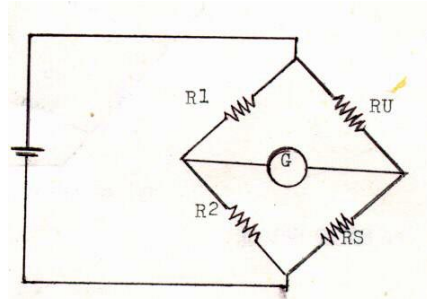
R_s = Variable Standard Resistance

R_u = Unknown Resistance

$$\text{เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาพสมดุล } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_u}{R_s}$$

๒.๔.๒ Wheatstone bridge

ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทาน ซึ่งมีค่าสูงกว่าหนึ่งโอห์มขึ้นไป จนถึง $10\text{ M}\Omega$ โดยมีข้อได้เปรียบของงานในลักษณะที่การสมดุลของบริดจ์จะไม่ถูกรบกวนกระทบกระเทือนโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันและจะสามารถรักษาสัญญาณขณะบริดจ์ไม่สมดุล ให้ความเป็นเชิงเส้นอย่างพอเพียงทำให้ง่ายและสะดวกในการวัด



รูปภาพที่ ๒-๒๐ แสดงวงจร Wheatstone bridge

R_1, R_2 = Ratio Resistance

R_U = Unknown Resistance

R_s = Standard Resistance

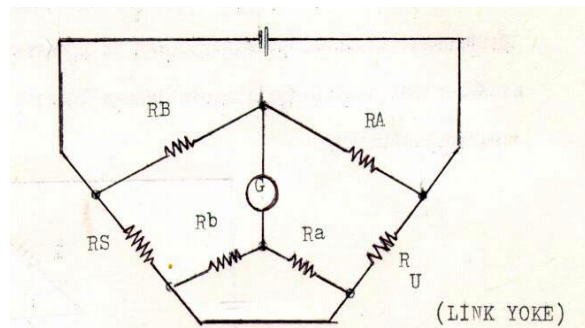
เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาพสมดุล

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_U}{R_s}$$

๒.๔.๓ Kelvin Bridge

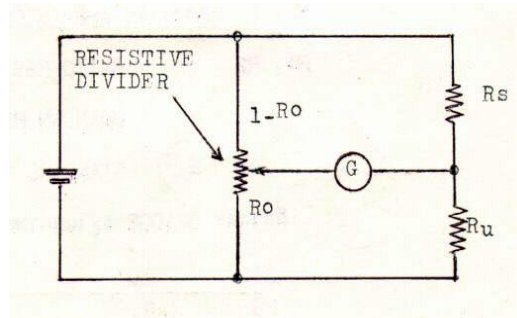
Kelvin Bridge หรือ Double Bridge ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำกว่าหนึ่งโอห์ม ความต้านทานที่ใช้เป็นมาตรฐาน (Standard Resistance) ซึ่งมีค่าหนึ่งโอห์มหรือต่ำกว่าจะมีการต่อ ๔ สาย การวัดแบบนี้จะต้องมีการชดเชย (Compensate) ค่าความต้านทานของสายและ Contact Resistance โดยการ Balance วงจร Bridge สองครั้ง ครั้งแรกโดยการต่อ Link หรือ Yoke ครั้งที่สองโดยการถอด Link ออก เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาพสมดุล

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_a}{R_b} = \frac{R_U}{R_s}$$



รูปภาพที่ ๒-๒๑ แสดงวงจร Kelvin Bridge

๒.๔.๔ Ratio Bridge



รูปภาพที่ ๒-๒๒ แสดงวงจร D.C. Ratio Bridge

Ratio Bridge ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทาน หลักการทำงานก็คล้ายกับ Wheatstone bridge โดยการใช้ Resistance Divider แทน Ratio Resistance (R_1, R_2)

R_o = ค่าความต้านทานที่อ่านได้ขณะ Null

R_s = Standard Resistance

R_u = Unknown Resistance

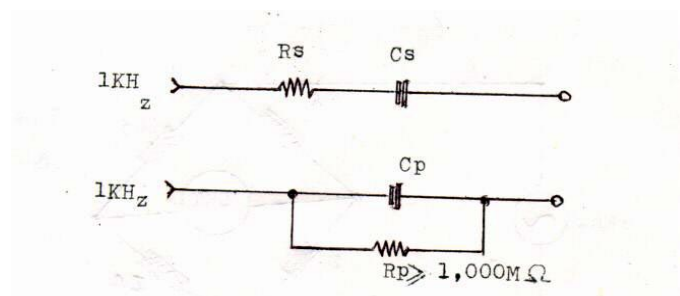
เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาพสมดุล

$$\frac{1 - R_o}{R_o} = \frac{R_s}{R_u}$$

๒.๕ การวัดค่า Capacitance

๒.๕.๑ Capacitor

โดยทั่วไป Capacitor นอกจากจะมีคุณสมบัติที่สามารถเก็บพลังงานที่ป้อนให้แก่มัน แล้วพลังงานส่วนหนึ่งที่จะสูญเสียไปใน Capacitor การสูญเสียนี้เกิดขึ้นในรูปของความร้อนซึ่งเราสามารถแทนค่าการสูญเสียนี้ได้ด้วยความต้านทานที่มีค่าต่ำต่ออนุกรม หรือความต้านทานที่มีค่าสูงต่อขนานกับค่าความจุของ Capacitor (ตามรูป) ตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียก็คือ การรั่วซึมของกระแส ความต้านทานของสาย การดูดซึมของฉนวนกัน และ Dielectric Hysteresis



รูปภาพที่ ๒-๒๓ แสดง Equivalent Circuit ของ Capacitor

๒.๕.๒ Dissipation Factor (D)

Dissipation Factor คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่สูญเสียไปต่อพลังงานที่สะสมไว้ได้ ถ้าค่าการสูญเสียแสดงในรูปของความต้านทานต่ำที่ต่ออนุกรมค่า Dissipation Factor จะหาได้จากสมการ

$$D = \frac{R_s}{X_{cs}} \quad (\text{X แทนค่าความต้านทานของ C})$$

ถ้าค่าการสูญเสียแสดงในรูปของความต้านทานสูงที่ต่อขนาน ค่า Dissipation Factor คือ

$$D = \frac{X_{cs}}{R_p}$$

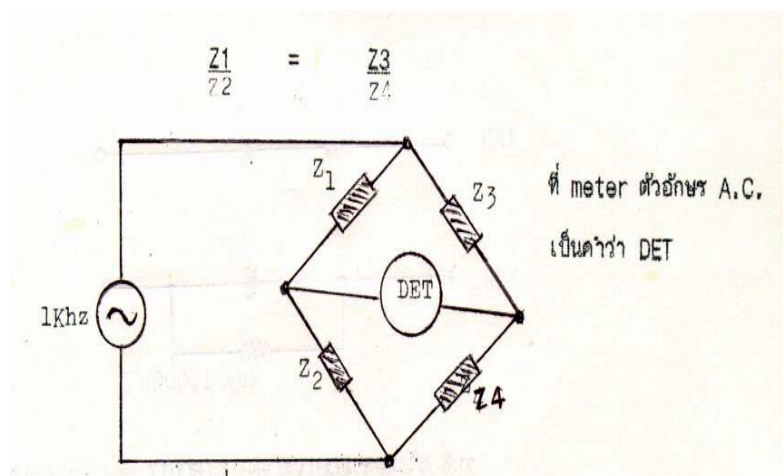
ค่า Dissipation Factor นี้จะมีค่าต่ำกว่าหนึ่งเสมอ และ เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่

๒.๕.๓ A.C. Bridge

การวัดค่า Capacitance สามารถกระทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของ Capacitor และความเที่ยงตรงของการวัด แต่วิธีต่าง ๆ ก็อาศัยหลักการเดียวกัน คือ การวัดโดยใช้ A.C. Bridge ซึ่งก็คล้ายคลึงกับ D.C. Bridge ต่างกันเพียงเล็กน้อย ในการทำให้วงจร Bridge Balance D.C. Bridge จะ Balance เฉพาะ Amplitude เท่ากัน ส่วน A.C. Bridge จะต้อง Balance ทั้ง Amplitude และ Phase

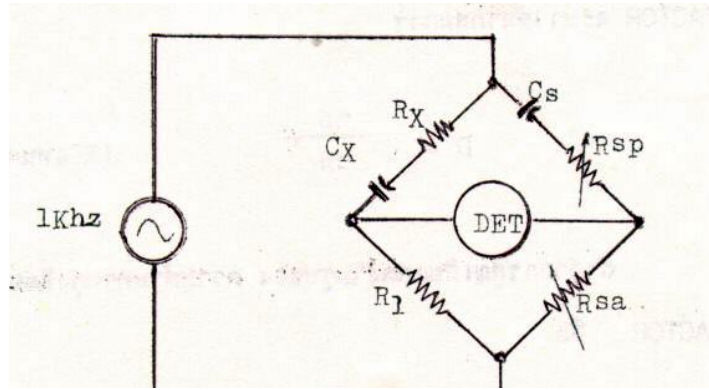
เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจการ Balance ของวงจรสามารถให้ หูฟัง VTVM Oscilloscope หรือหลอด MAGIC EYE อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ แรงไฟ A.C. ที่ป้อนให้กับ วงจร Bridge นิยมใช้ความถี่ ๑ KHz เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาพสมดุล

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$



รูปภาพที่ ๒-๒๔ แสดงวงจร A.C. Bridge

๒.๕.๔ Desauty Bridge หรือเรียกว่า Series Capacitance Bridge ใช้สำหรับวัดค่า Capacitance และ Dissipation Factor ของตัวเก็บประจุมีค่าต่ำ ($0.001 < D < 0.1$)



รูปภาพที่ ๒-๒๕ แสดง Desauty (Series Capacitance) Bridge เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาวะสมดุล ส่วนจินตภาพ

$$\frac{R_1}{R_{SA}} = \frac{C_S}{C_X}$$

$$C_X = \frac{R_{SA} C_S}{R_1}$$

และส่วนที่เป็นจริง

$$\frac{R_1}{R_{SA}} = \frac{R_X}{R_{SP}}$$

$$R_X = \frac{R_1 R_{SP}}{R_{SA}}$$

$$D = \frac{R_X}{X_{CX}} = \frac{R_{SP}}{X_{CS}}$$

เมื่อ C_x = Capacitance of the Unknown Capacitor

R_x = Series Resistance of the Unknown Capacitor

R_{sa} = Variable Standard Resistor (Amplitude Balance)

C_s = Standard Capacitor

R_{sp} = Variable Standard Resistor (Phase Balance)

D = Dissipation Factor

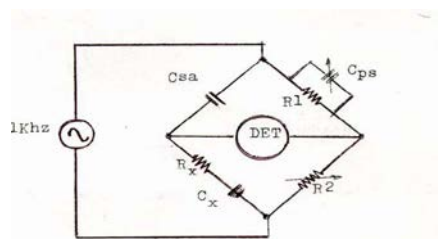
X_{CX} = Capacitive Reactance of Unknown Capacitor

X_{CS} = Capacitive Reactance of Standard Capacitor

๒.๕.๕ Schering Bridge

ใช้สำหรับวัดค่า Capacitance และ Dissipation Factor ที่ตัวเก็บประจุมีมุมเฟส

ใกล้ 90° มาก ๆ



รูปภาพที่ ๒-๒๖ แสดงส่วนประกอบของ Schering Bridge

เมื่อวงจร Bridge อยู่ในภาวะสมดุลส่วนจินตภาพ

$$\frac{C_x}{C_{sa}} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$C_x = \frac{R_1 C_{sa}}{R_2}$$

และส่วนที่เป็นจริง

$$\frac{R_x}{P_2} = \frac{C_{sp}}{C_{sa}}$$

$$R_x = \frac{R^2 C_{sp}}{C_{sa}}$$

$$D = \frac{R X}{X_{CX}}$$

เมื่อ C_x = Capacitance of Unknown Capacitor

C_{sa} = Variable Standard Capacitor (Amplitude Balance)

C_{sp} = Variable Standard Capacitor (Phase Balance)

R_x = Series Resistance of Unknown Capacitor

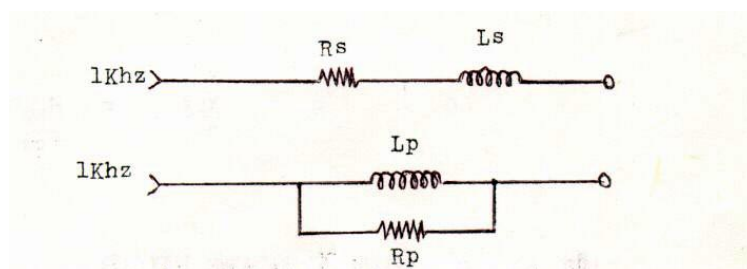
D = Dissipation Factor

X_{CX} = Capacitive Reactance of Unknown Capacitor

๒.๖ การวัดค่า Inductance

๒.๖.๑ Inductor

Inductor ก็เช่นเดียวกับ Capacitor นอกจากจะสามารถสะสมพลังงานที่ป้อนให้กับมันไว้ได้แล้ว จะมีพลังงานส่วนหนึ่ง สูญเสียไปในตัว Inductor ในรูปของความร้อน ซึ่งสามารถเขียนแทนค่าความสูญเสียได้ ด้วยค่าความต้านทาน ที่มีค่าต่ำต่ออนุกรม เมื่อ Q ของ Inductor ต่ำกว่า ๑๐ หรือ ความต้านทานสูง ต่อขนานเมื่อ Q ของ Inductor สูงกว่า ๑๐ ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้น มีผลมาจากความต้านทานของสาย Current และ Magnetic Hysteresis



รูปภาพที่ ๒-๒๗ แสดง Equivalent Circuit ของ Inductor

๒.๖.๒ Q ของ Inductor

Q คือ อัตราส่วนระหว่าง พลังงานที่สะสมไว้ ต่อพลังงานที่สูญเสีย

ถ้าค่าการสูญเสียของ Inductor แสดงในรูปของความต้านทานที่มีค่าต่ำต่ออนุกรม

($Q < 10$)

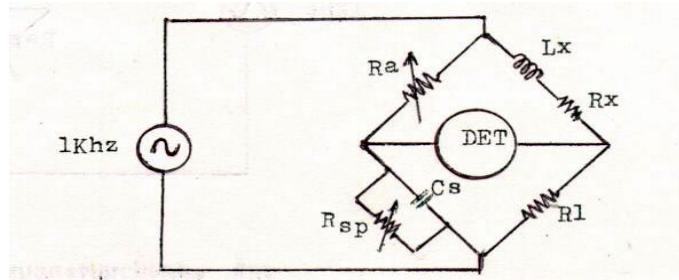
$$Q = \frac{X_{LS}}{R_s}$$

ถ้า ค่าการสูญเสียของ Inductor แสดงในรูปของ ความต้านทานที่มีค่าสูง ต่อขนาน (Q>๑๐)

$$Q = \frac{R_p}{X_{Ls}}$$

ค่าการสูญเสียใน Inductor นิยมเขียนในรูปของ Q ซึ่งตรงข้ามกับ Capacitor ซึ่งแสดงในรูปของ D ค่า Q นี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของแรงไฟ A.C. ที่ป้อนให้กับวงจร

๒.๖.๓ Maxwell Bridge หรือเรียกว่า Series Inductance Bridge ใช้สำหรับวัดค่า Inductance และ Q ของ Inductor ซึ่งมีค่า Q ระหว่าง ๑ ถึง ๑๐



รูปภาพที่ ๒-๒๘ แสดงส่วนประกอบของ Maxwell Bridge เมื่อวงจร Bridge อยู่ในสภาวะสมดุล

$$\frac{LX}{R_1} = R_a C_p$$

$$LX = R_1 P_a C_p$$

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_a}{P_{sp}}$$

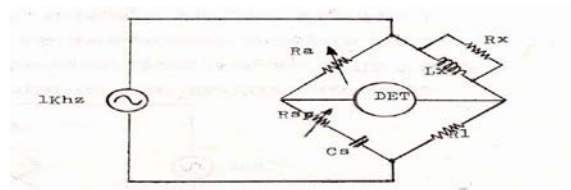
$$R_x = R_1 R_a$$

$$Q = \frac{XLX}{R_x} = \frac{R_{sp}}{X_{cx}}$$

- เมื่อ L_x = Value of Unknown Inductor
- R_a = Variable Resistor (Amplitude Balance)
- C_s = Standard Capacitor
- R_{sp} = Variable Resistor (Phase Balance)
- X_{lx} = Inductive Reactance of Unknown Inductor
- X_{cx} = Capacitive Reactance of Standard Capacitor

๒.๖.๔ Hay Bridge

ใช้สำหรับวัดค่า Inductance และ Q ของ Inductors เมื่อค่า Q สูงกว่า ๑๐



รูปภาพที่ ๒-๒๙ แสดงส่วนประกอบของ Hay Bridge

เมื่อบริเวณ Bridge อยู่ในสภาวะสมดุล

$$\frac{LX}{R_1} = Ra Cs$$

$$L_x = R_{\theta} R_a C_s$$

$$\frac{RX}{R1} = \frac{Ra}{Rsp}$$

$$Rx = \frac{P1 Ra}{Rsp}$$

$$Q = \frac{Rx}{X1X} \\ = \frac{Xcs}{Rsp}$$

เมื่อ L_x = Value of Unknown Inductor

R_a = Variable Resistor (Amplitude Balance)

C_s = Standard Capacitor

R_x = Parallel Resistance of the Unknown Inductor

R_{ep} = Variable Resistor (Phase Balance)

X_{ix} = Inductive Reactance of the Unknown Inductor

X_{cs} = Capacitive Reactance of the Standard Capacitor

จากวงจร Bridge สำหรับวัดค่า Capacitance และ Inductance ทั้งหมดที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่า Standard ที่ใช้คือ C_s แทนที่จะใช้ Capacitor ในวงจร Bridge เพื่อหาค่า Inductance ทั้งนี้เพราะว่า Capacitor มีแต่ Electric Field เท่านั้นไม่มี Magnetic Field เหมือน Inductor ทำให้ป้องกัน Field ที่รั่วไหลออกไปรบกวนวงจรอื่น ๆ ได้ง่ายกว่า อีกทั้ง Capacitor มีขนาดกะทัดรัด และน้ำหนักมากกว่าจึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็น Standard สำหรับเครื่องมือสำเร็จรูปในการวัดค่า Capacitance และ Inductance ซึ่งเรียกว่า Impedance Bridge

บทที่ ๓

Signal Generator

๓.๑ กล่าวโดยทั่วไป

Signal Generator เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ และสำคัญยิ่งในการผลิตพัฒนา และซ่อมบำรุงเครื่องรับคลื่นวิทยุ เพราะ Signal Generator ทำหน้าที่เหมือนเครื่องส่งคลื่นวิทยุนั่นเอง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ Signal Generator จะต้องมีความเชื่อถือได้ในด้านคุณภาพของสัญญาณ

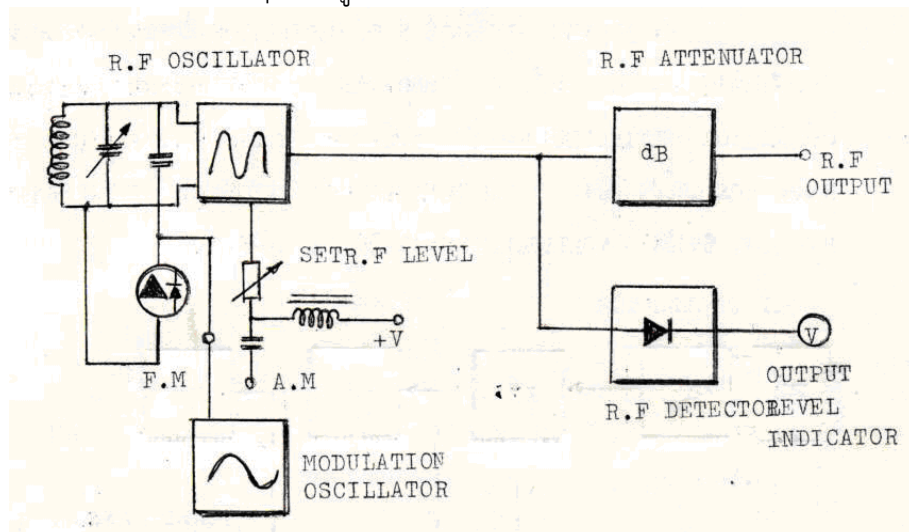
ในการเปรียบเทียบมาตรฐานหรือซ่อมบำรุงเครื่องมือสื่อสารโดยใช้ Signal Generator สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือคุณสมบัติของเครื่องและความรู้ความสามารถในการเลือกใช้ Signal Generator ของผู้ใช้งานว่าได้เหมาะสมกับงานที่ทำหรือไม่ เพราะบางกรณีผู้ใช้อาจเลือกชนิดของ Signal Generator ไม่เหมาะสมกับงาน เช่น ใช้ Signal Generator ที่มีค่าผิดพลาดมาก ๆ ไปปรับเทียบเครื่องรับที่มีความเที่ยงตรงสูง ดังจะพบเห็นมากในเรื่องของการปรับ Sensitivity ของเครื่องรับ หรือผู้ใช้ นำ Signal Generator ที่มีคุณภาพต่ำไปปรับเครื่องรับที่มี Sensitivity สูง ๆ เป็นต้น ในปัจจุบันนี้ Signal Generator ถูกผลิตออกมามากมายหลายแบบ ต่างกันทั้งรูปร่าง คุณสมบัติทางไฟฟ้า ตลอดจนคุณภาพฉะนั้นควรเลือกใช้ Signal Generator ให้ถูกกับงาน

โดยทั่วไปแล้ว Signal Generator จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ หลัก ๆ คือ Oscillator, Amplifier, Modulator และ Attenuator ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะหลักการที่สำคัญ ๆ บางอย่างของ Signal Generator เท่านั้น

๓.๒. หลักการทำงาน

๓.๒.๑ Fundamental Oscillator Signal Generator

หลักการพื้นฐานของ Signal Generator โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยสัญญาณที่ถูกผลิตออกมาโดย R.F. Oscillator จะถูกส่งไปยัง Output Level Indicator เพื่อแสดงค่า Amplitude และ Attenuator ของสัญญาณออกทาง Output ส่วนการ Modulator นั้น ถ้าเป็นแบบ A.M.(Amplitude Modulation) กระทำได้โดยการปรับ Supply Voltage ของ Oscillator ส่วน F.M.(Frequency Modulation) นั้นทำได้โดยการปรับ Voltage ที่ตกคร่อม Variable Capacitance Diode Oscillator และเครื่องแบบนี้ผู้ใช้ต้องปรับ R.F.Level ทุกครั้งเมื่อเปลี่ยนความถี่เพื่อที่จะได้ Output ที่ถูกต้อง

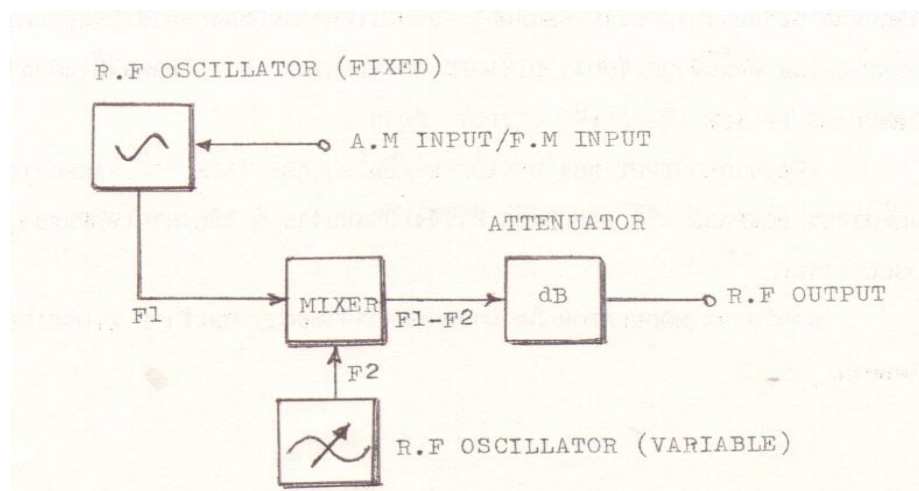


รูปที่ ๓-๑ Fundamental Oscillator Signal Generator

๓.๒.๒ Heterodyne Oscillator Signal Generator

เนื่องจาก Fundamental Oscillator ไม่สามารถผลิตความถี่ในย่านกว้าง ๆ ได้วงจรยุ่งยากมาก และราคาในการผลิตค่อนข้างแพง จึงได้มีการผลิต Heterodyne Oscillator ขึ้น โดยการใช้ Oscillator สองชุด ชุดหนึ่งเป็นแบบคงที่ (Fixed Oscillator) อีกชุดหนึ่งเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ (Variable Oscillator) และนำมารวมกันในภาค Mixer และเกิดความถี่ขึ้นมาอีกความถี่หนึ่ง ซึ่งจะสามารถทำให้ผลิตความถี่ได้ในย่านกว้างขึ้น

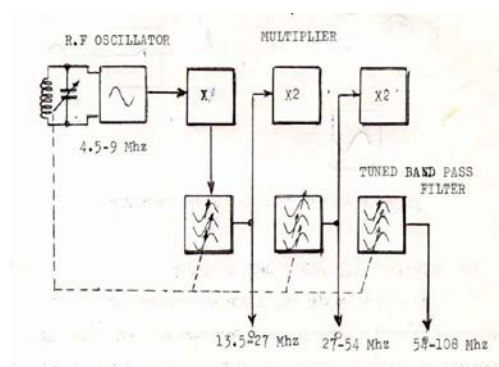
Oscillator แบบนี้มีข้อเสียที่สำคัญ คือ สัญญาณที่ออกมามีความถี่ไม่คงที่ โดยเฉพาะความถี่ต่ำ ๆ และปัญหาที่สำคัญอีกประการ คือไม่สามารถกำจัด Noise และสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจาก Output ของ Oscillator แบบนี้ได้ ฉะนั้นปัญหาสองอันนี้จึงเป็นข้อจำกัดของ Heterodyne Oscillator



รูปที่ ๓-๒ Heterodyne Oscillator Signal Generator

๓.๒.๓ Multiplied Oscillator Signal Generator

Oscillator แบบนี้จะใช้ R.F. Oscillator ที่มีคุณภาพสูงเพียงชุดเดียวและเพื่อให้ได้ความถี่ย่านกว้างขึ้น ทำได้โดยการต่อวงจร Multipliers อนุกรมกับ R.F. Oscillator Multipliers แต่ละตัว จะเป็นแบบ Non-Linear Amplifier เพื่อใช้ผลิต Harmonics และส่งไปยังวงจร Tuned Filter และ Frequency Output จะถูกเลือกโดย Band SW. ซึ่งได้จาก Multiplier ตัวใดตัวหนึ่งตามที่ต้องการ

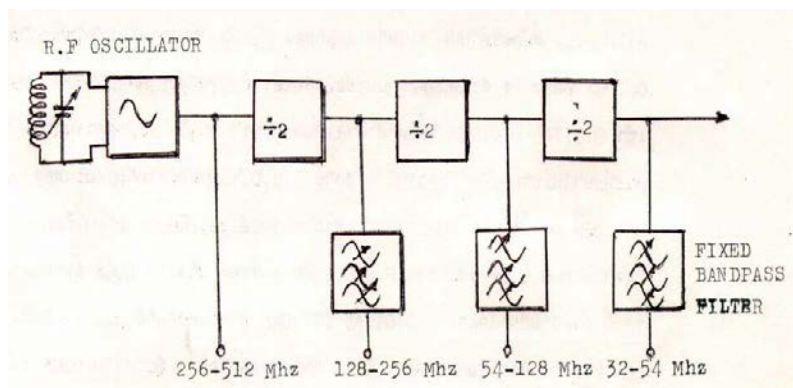


รูปที่ ๓-๓ Multiplied Oscillator Signal Generator

๓.๒.๔ Divided Oscillator Signal Generator

เนื่องจากในการสร้างวงจร Digital Divider มีราคาต่ำ และอุปกรณ์ Semiconductor ที่ใช้ในย่าน UHF มี Noise ปรกวนน้อย Multiplier Oscillator จึงถูกนำมาใช้ในทางตรงกันข้าม คือ แทนที่จะเป็นการเพิ่มความถี่ของกลับใช้เป็นตัวลดความถี่ของ Oscillator ดังนั้นจึงถูกเรียกว่า Divided Oscillator ความถี่ที่ลดลงนี้จะผ่านไปยังวงจร Bandpass Filter เพื่อออกเป็น Output ต่อไป

เนื่องจาก Output ของ Dividers เป็น Square Wave ซึ่งมี Harmonic น้อยมาก ฉะนั้นวงจร Lowpass หรือ Bandpass ที่ใช้จึงเป็นแบบง่าย ๆ ไม่ยุ่งยากเหมือนของ Multiplied Oscillator สำหรับการ Modulator ก็สามารถกระทำได้โดยการป้อนเข้า R.F. Oscillator โดยตรง

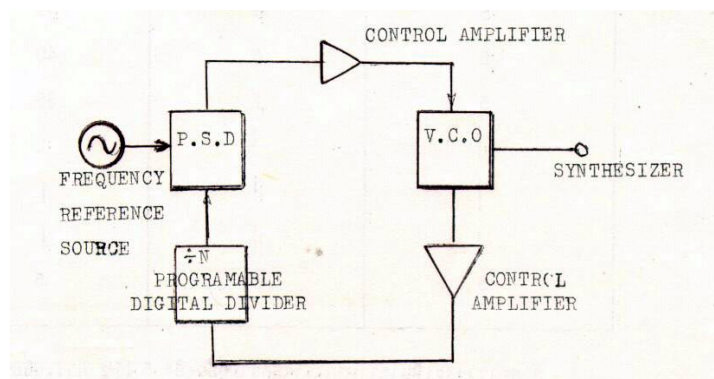


รูปที่ ๓-๔ Divider Oscillator Signal Generator

๓.๒.๔ Synthesized Oscillator

ความก้าวหน้าทางอิเล็กทรอนิกส์ประการหนึ่งก็คือ การประหยัดช่วงกว้างของความถี่ของช่องการสื่อสาร (Channel Bandwidth) เพื่อให้สามารถติดต่อสื่อสารได้มากช่องใน Bandwidth อันหนึ่ง ความต้องการอันนี้ ทำให้เราต้องการความเที่ยงตรงของความถี่สูงมากขึ้น และลดจำนวนก้อนแร่ในเครื่องสื่อสารชนิด Multi-Channel ลงให้เหลือเพียงก้อนเดียว จึงได้หันมาใช้ Synthesized Oscillator แทนวงจร Crystal Controlled Oscillator แบบเก่า

หลักการทำงานของ Synthesized Oscillator



รูปที่ ๓-๕ แสดงหลักการทำงานของ Synthesized Oscillator

เริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดของความถี่อ้างอิง (Frequency Reference Source) ส่วนใหญ่ได้แก่ Crystal Oscillator ซึ่งมีความเที่ยงตรงของความถี่สูงมาก สัญญาณความถี่อ้างอิงจะป้อนเข้า Phase Sensitive Detector (P.S.D.) ที่ทางออกของ P.S.D. จะเป็นไฟ DC ผ่าน Control Amplifier เพื่อปรับค่าให้เหมาะสมกับความต้องการของ Voltage Controlled Oscillator (V.C.O.) ซึ่งเป็นตัวทำความถี่ ความถี่ทางออกของ V.C.O. จะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับค่าไฟ D.C. ที่ป้อนให้กับมัน ความถี่ทางออกของ V.C.O. คือความถี่ Synthesizer Output ที่ต้องการ ส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งป้อนกลับเข้าไป Control Amplifier และต่อไปเข้า Digital Divider ที่ตั้งค่าตัวหารเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม เพื่อลดความถี่ของ V.C.O. ลงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความถี่อ้างอิงใน P.S.D. ในกรณีที่ความถี่ทางออกของ Digital Divider มีความถี่และ Amplitude เท่ากับความถี่อ้างอิง ผลการเปรียบเทียบใน P.S.D. จะทำให้ไฟ D.C. ทางออกของ P.S.D. เป็น ๐ โวลต์ เกิดการ Lock ขึ้นในวงจรตามวงรอบนี้ ถ้าความถี่ทางออกของ Digital Divider สูงกว่าความถี่อ้างอิง ไฟ D.C. ทางออกของ P.S.D. ก็จะเป็นลบบังคับ V.C.O. ให้มีความถี่ต่ำลง เพื่อกลับไป Lock ตามต้องการ และเป็นไปในทางกลับกันด้วย

ทุกครั้งที่เราเปลี่ยนแปลงตัวหาร N ความถี่ทางออกของ Digital Divider ก็จะไม่ตรงกับความถี่อ้างอิง ทำให้เกิดไฟ D.C. ที่ทางออกของ P.S.D. ไปควบคุม V.C.O. ให้เปลี่ยนความถี่ไปสู่สภาพ Lock ดังเดิม

| Frequency Reference Source | Divider | Synthesizer Output (MHz) |
|----------------------------|---------|--------------------------|
| ๕ | ๑๐ | ๕๐ |
| ๕ | ๙ | ๔๕ |
| ๕ | ๘ | ๔๐ |
| ๕ | ๗ | ๓๕ |
| | | |
| | | |
| | | |
| ๕ | ๑ | ๕ |

จากตารางจะเห็นได้ว่าหากเราใช้ความถี่อ้างอิง ๕ MHz การเปลี่ยนแปลงตัวหาร N แต่ละขั้น (Step) จะทำให้ Synthesizer Output เปลี่ยนไป ๕ MHz เราจึงเรียกว่า วงจรนี้มี Resolution เท่ากับ ๕ MHz Step ในกรณีที่เราต้องการ High Resolution เช่น ๑๐๐ Hz Step ความยุ่งยากซับซ้อนก็จะเกิดขึ้นตามมา วิธีการที่จะให้ได้ High Resolution ก็คือการใช้วงจร Synthesized Oscillator หลาย ๆ วงจรร่วมกัน หรือเรียกว่าใช้หลาย Loops และใช้ Mixer เข้ามาช่วยอีกด้วย

วงจร Synthesized Oscillator จะทำงานได้ดีความถี่เที่ยงตรงของความถี่สูงเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับขีดจำกัดของชิ้นส่วน ที่นำมาประกอบในวงจร ถ้าต้องการความถี่สูงมาก ก็ต้องใช้หลาย Loops และบังเกิดข้อจำกัดเกี่ยวกับ Digital Divider ที่ไม่อาจสามารถจะหารความถี่ที่สูงมากลงได้ หรือพูดอีกอย่างหนึ่งก็คือ ความเร็วต่ำนั่นเอง ลักษณะเช่นนี้ต้องใช้ Mixer หรือ Multiplier เข้าช่วยด้วย อย่างไรก็ตาม จุดสำคัญที่เป็นหัวใจก็คือ Frequency Reference Source จะต้องมีความเที่ยงตรงของความถี่สูงกว่า สำหรับ P.S.D. สามารถใช้ Double Balance Mixer ได้ ส่วน V.C.O. ก็

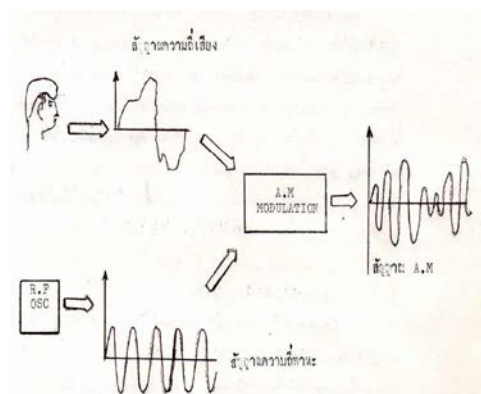
จะต้องมีความผิดพลาดน้อย ในกรณีที่ใช้กับความถี่ต่ำ ๆ ก็มี I.C. จำพวก Phase Lock Loop ซึ่งมีวงจร P.S.D. และ V.C.O อยู่ในตัว

๓.๒.๕ การผสมคลื่น Modulation

Modulation คือ การผสมคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่สูง กับคลื่นไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำ แล้วส่งสัญญาณออกไป Modulation ที่พบและนิยมใช้กันมากมีสองแบบ คือ แบบแรกเป็นการรวมคลื่นสัญญาณความถี่เสียงกับสัญญาณพาหะ เป็นผลทำให้เกิดสัญญาณใหม่ ที่มีความถี่เท่ากับความถี่พาหะ แต่ Amplitude ของสัญญาณใหม่นี้เปลี่ยนแปลงไปตาม Amplitude ของสัญญาณความถี่เสียง การ Modulate แบบนี้ เรียกว่า Amplitude Modulation (A.M.) อีกแบบหนึ่งโดยการรวมสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกัน และเกิดสัญญาณใหม่ที่มีความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปตาม Amplitude ของสัญญาณความถี่เสียง การ Modulate แบบนี้เรียกว่า Frequency Modulation (F.M.)

๓.๒.๕.๑ Amplitude Modulation (A.M.)

ในการ MOD. แบบ A.M. นั้น เริ่มต้นเมื่อมีคนพูดใส่ไมโครโฟน ไมโครโฟนจะเป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่ในย่านความถี่เสียง สัญญาณถี่เสียงนี้จะรวมกับสัญญาณความถี่พาหะ ในวงจร Modulation ได้สัญญาณ A.M. เมื่อสังเกตที่ขอบด้านบน และด้านล่าง ของสัญญาณ A.M. จะพบว่าที่ขอบทั้งสองด้านมีลักษณะสมมาตรกัน และเหมือนกับสัญญาณความถี่เสียง แต่เมื่อเพิ่ม Amplitude ของสัญญาณความถี่เสียง สัญญาณ A.M. จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตาม โดยส่วนต่ำสุดของขอบบน และ ส่วนสูงสุดของขอบล่างจะบีบเข้าหากัน ส่วนสูงของขอบบนและส่วนต่ำสุดของขอบล่างออกจากกันความสัมพันธ์ ของ Amplitude ของสัญญาณความถี่เสียงกับ Amplitude ของสัญญาณพาหะในขณะที่ยังไม่ได้ MOD. จะเป็นตัวบอกให้ทราบว่า ลักษณะของสัญญาณ A.M. ที่ได้มีรูปร่างลักษณะอย่างไร ค่าความสัมพันธ์นี้ เรียกว่า % Modulation



รูปที่ ๓-๖ แสดง Amplitude Modulation

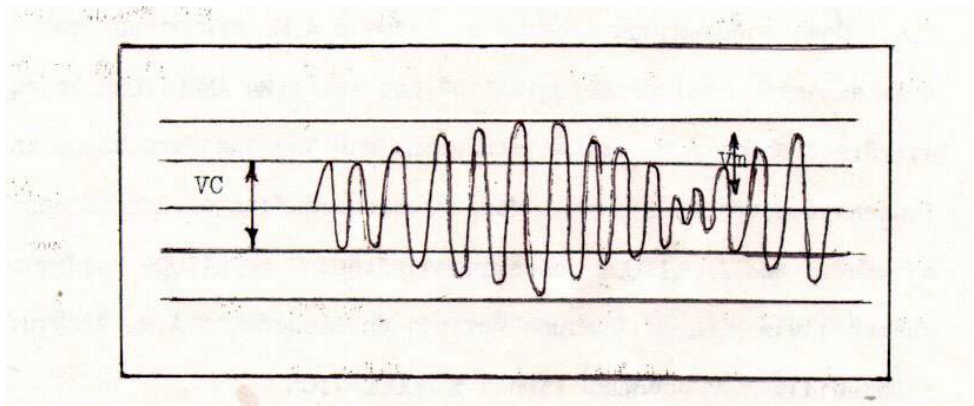
ค่าเปอร์เซ็นต์การ Modulation คืออัตราส่วนระหว่าง Amplitude ของสัญญาณความถี่เสียง กับ Amplitude ของสัญญาณความถี่พาหะ ถ้าค่าทั้งสองนี้เท่ากันก็หมายความว่า

$$\text{Modulation} = 100\%$$

$$\% \text{ Modulation} = \frac{V_m}{V_c} \times 100$$

เมื่อ V_m = Peak To Peak Amplitude ของสัญญาณความถี่เสียง

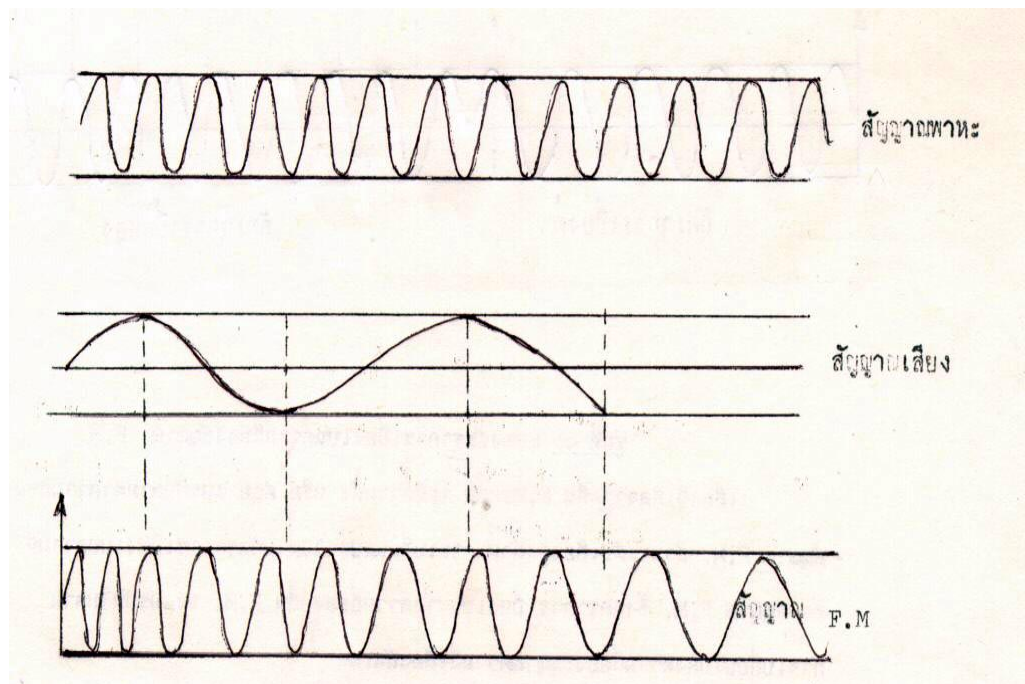
V_c = Peak To Peak Amplitude ของสัญญาณคลื่นพาหะ



รูปที่ ๓-๗ แสดงการ Modulation แบบ A.M.

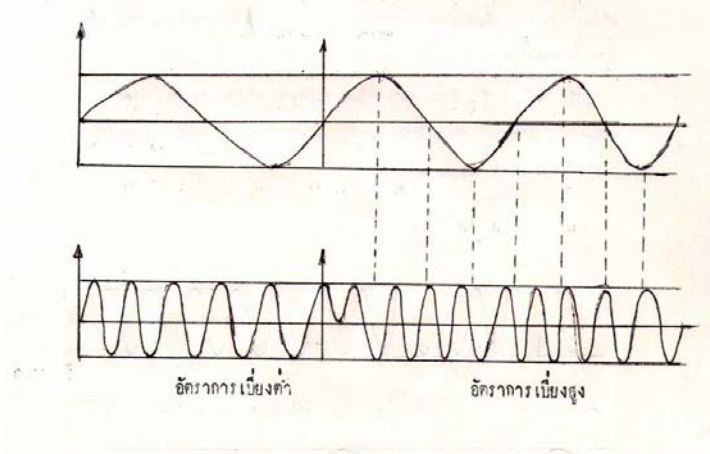
๓.๒.๕.๒ Frequency Modulation (F.M.)

ในการ Mod แบบ F.M. Amplitude ของคลื่นพาหะจะไม่มีผลหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่คลื่นพาหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยความถี่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตาม Amplitude ของสัญญาณความถี่เสียงที่เอามาผสม ความถี่ของคลื่นพาหะที่ยังไม่มีการผสมเรียกว่า ความถี่กึ่งกลาง (Center Frequency) ความถี่ของคลื่นสัญญาณ F.M. ที่แตกต่างจากความถี่กึ่งกลาง เรียกว่า ความถี่เบี่ยงเบน (Frequency Deviation) โดยจะปรากฏด้วยความถี่ที่เบี่ยงเบนไปจากความถี่กึ่งกลางลงไปทางน้อยกว่าหรือมากกว่า เช่น คลื่นสัญญาณเสียงที่ต้องการจะผสมคลื่นพาหะที่มีความถี่ 100 MHz เมื่อผสมคลื่นแล้วทำให้เกิดคลื่นสัญญาณ F.M. มีความถี่ทางต่ำสุด 99.99 MHz และมีความถี่ทางสูงสุด 100.01 MHz ดังนั้น ความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ 10 KHz จะเห็นได้ว่าความถี่เบี่ยงเบนจะเป็นตัวบอก . Amplitude ของสัญญาณที่นำมาผสม ถ้ามี . Amplitude มากจะทำให้ค่าความถี่เบี่ยงเบนมีค่ามากด้วย



รูปที่ ๓-๘ แสดงสัญญาณ F.M.

นอกจากนี้ยังมีสิ่งควรทำความเข้าใจ อีกประการหนึ่งคือ อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ (Rate Of Frequency Deviation) ซึ่งจะเป็น ตัวบอกให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของความถี่ครบหนึ่งรอบรวดเร็วเพียงใด เพราะเมื่อสัญญาณความถี่เสียงเปลี่ยน Amplitude ไปครบ ๑ รอบ สัญญาณ F.M. ก็เปลี่ยนตามไปครบ ๑ รอบด้วย ถ้าอัตราการเบี่ยงเบนสูงก็แสดงว่าความถี่ของสัญญาณเสียงสูง ดังนั้นอัตราการเบี่ยงเบน จึงขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณความถี่เสียง



รูปที่ ๓-๙ แสดงอัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ F.M.

เสียงที่เกิดจากคลื่น F.M. นั้น จะมีความดัง หรือ ค่อย แปรผันตามค่าความถี่ของสัญญาณ F.M. ส่วนระดับเสียงสูงต่ำนั้น จะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ F.M. ซึ่งอัตราการเบี่ยงเบนทางความถี่ของคลื่น F.M. จะแปรผันไปตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณความถี่เสียงนั่นเอง

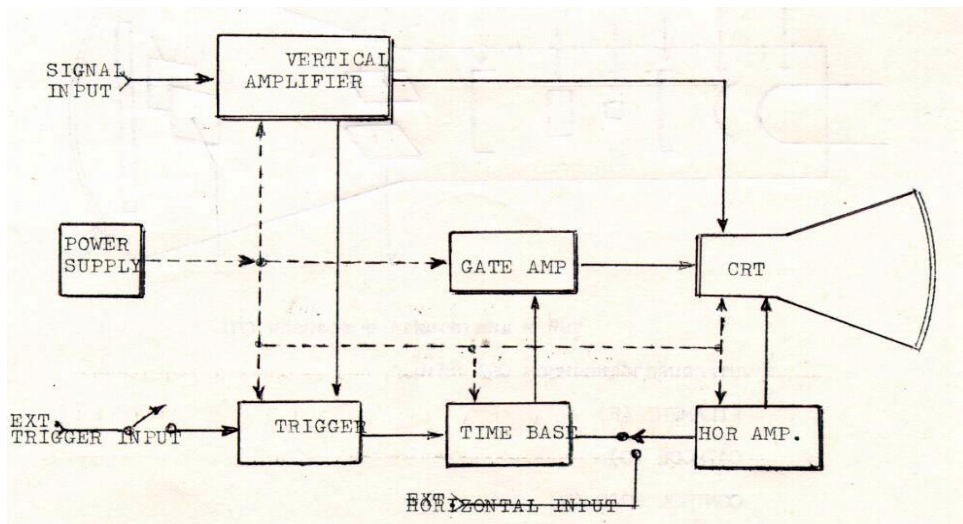
บทที่ ๔

ออสซิลโลสโคป

๔.๑ กล่าวทั่วไป

ในการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์ บางครั้งจำเป็นต้องทราบ ขนาด และรูปร่างของสัญญาณ การวัดด้วยมิเตอร์สามารถบอกได้เพียงขนาด หรือปริมาณทางไฟฟ้าเท่านั้น ไม่สามารถแสดงรูปร่างของสัญญาณได้ ดังนั้น ออสซิลโลสโคป จึงได้ถูกคิดสร้างขึ้นมาเพื่อแสดงผลได้ทั้งขนาดและรูปร่างของสัญญาณ ออสซิลโลสโคป สามารถแสดงผลได้ทั้งแกน X และ Y โดยสัญญาณไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะป้อนให้กับแกน X (Horizontal Deflection) และอีกสัญญาณหนึ่งจะป้อนให้กับแกน Y (Vertical Deflection) โดยความสว่างของแกน X และแกน Y จะถูกควบคุมโดยแกน Z ออสซิลโลสโคปจะแสดงผลทางจอภาพ โดยรูปร่างของสัญญาณจะปรากฏทางแกน Y (Vertical) โดยเทียบกับเวลาทางแกน X (Horizontal) ดังนั้น ออสซิลโลสโคป จึงเป็นเครื่องวัดประเภท Time Domain

๔.๒ หลักการทำงาน



รูปภาพที่ ๔-๑ แสดง Block Diagram ของออสซิลโลสโคป

จากรูปแสดงถึง Block Diagram ของออสซิลโลสโคป ซึ่งจะได้อธิบายถึงการทำงานภาคต่าง ๆ ดังนี้

๔.๒.๑ Vertical Amp. จะประกอบด้วย Attenuator เพื่อทำการลดทอนสัญญาณจาก Input ให้มีขนาดพอเหมาะที่จะแสดงที่จอภาพ สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยัง Pre Amp., Vertical Amp. เพื่อที่จะส่งไปยัง Vertical Plate ของหลอด CRT.

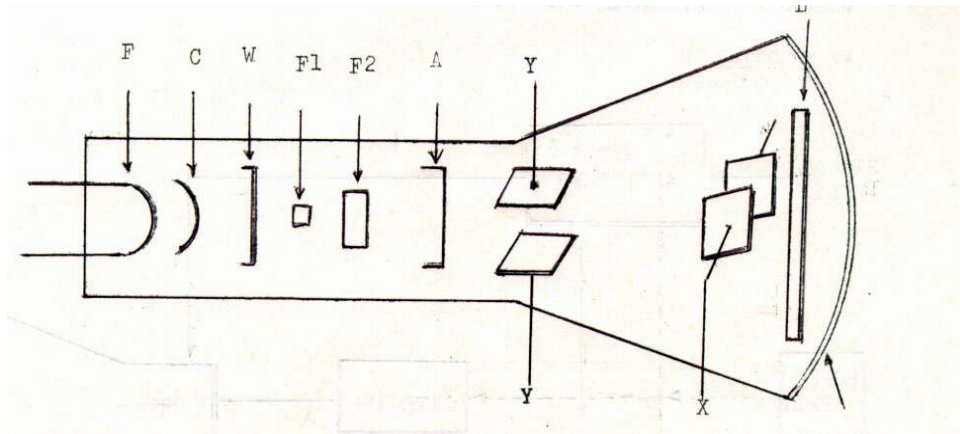
๔.๒.๒ Horizontal Amp. ทำการขยายสัญญาณทางด้าน Horizontal โดยมี Time Base เป็นตัวกำหนดอัตราการกวาดของ Horizontal เพื่อป้อนไปยัง Horizontal Plate ของหลอด CRT.

๔.๒.๓ Time Base กำหนดเวลาที่ใช้ในการกวาดของ Horizontal

๔.๒.๔ Gate Amp. เป็นชุดขยายสัญญาณควบคุม และความสว่าง (Intensity)

๔.๒.๕ Trigger นำสัญญาณส่วนหนึ่งจาก Vertical Amp. เพื่อให้ Time Base กำหนดฐานเวลาที่คงที่ เพื่อให้การแสดงผลบนจอภาพของ Vertical และ Horizontal สัมพันธ์กัน

๔.๒.๖ Cathode Ray Tube (CRT)



รูปภาพที่ ๔-๒ แสดงส่วนต่าง ๆ ของหลอด CRT

ส่วนประกอบที่สำคัญของหลอด CRT มีดังนี้-

- ๔.๒.๖.๑ Filament (F)
- ๔.๒.๖.๒ Cathode (C)
- ๔.๒.๖.๓ Control Grid (W)
- ๔.๒.๖.๔ Focusing Electrode (F๑, F๒)
- ๔.๒.๖.๕ Anode (A)
- ๔.๒.๖.๖ Vertical Deflection Plate (Y)
- ๔.๒.๖.๗ Horizontal Deflection Plate (X)
- ๔.๒.๖.๘ Button Anode (B)
- ๔.๒.๖.๙ จอภาพ (L)

หลักการทำงานโดยย่อของหลอด CRT คือ ชุด Electron Gun จะทำให้เกิด Electron ซึ่งถูกโฟกัสและถูกเร่งจนมีความเร็วสูง ลำ Electron นี้จะเข้าไปชนจอภาพและถ่ายเทพลังงานเป็นบริเวณเล็ก ๆ ที่ Electron พุ่งชน พลังงานนั้นจะสูงพอที่จะทำให้จุดที่ Electron พุ่งชนนั้นเรืองแสง ก่อนจะพุ่งชนจอภาพ ลำ Electron จะผ่านไประหว่างและ Horizontal Deflection Plate สองคู่ โดยคู่หนึ่งจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนในแนวนอน (ซ้าย-ขวา) และอีกคู่หนึ่งจะทำให้เกิดเบี่ยงเบนในแนวตั้ง (ขึ้น-ลง) การเบี่ยงเบนนี้จะเป็นอิสระต่อกันดังนั้นจะสามารถทำให้ลำ Electron อยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ ที่ต้องการ โดยใช้ค่าแนวนอน และแนวตั้งที่เหมาะสม

เมื่อให้ความร้อนแก่ Cathode แล้ว Electron จะถูกปล่อยออกมาและผ่านรูเล็ก ๆ ใน Control Grid จำนวน Electron ที่ถูกปล่อยจาก Cathode จะมีผลโดยตรงต่อความเข้มของลำ Electron และจะถูกควบคุมโดยการป้อน Bias แก่ Control Grid เช่นเดียวกับหลอดสุญญากาศทั่วไป เมื่อผ่าน Control Grid Electron จะถูกเร่งโดยผ่าน Accelerating-Anode ซึ่งมี Focusing Anode คั่นอยู่ Anode ทั้งสามมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีรูเล็ก ๆ อยู่ตรงกลางในแนวเดียวกัน ซึ่งรูนี้จะเป็นทางที่ลำ Electron ผ่านไปสู่ Vertical - Horizontal Deflection Plate และจอภาพตามลำดับ ซึ่งการเบี่ยงเบนของลำ Electron ในจอภาพของออสซิลโลสโคปเป็นการเบี่ยงเบนทางไฟฟ้า (Electrostatic Deflection) ซึ่งต่างกับการเบี่ยงเบนของจอภาพในเครื่องรับโทรทัศน์ ซึ่งเป็นการเบี่ยงเบนแบบใช้สนามแม่เหล็ก (Electro Magnetic Deflection)

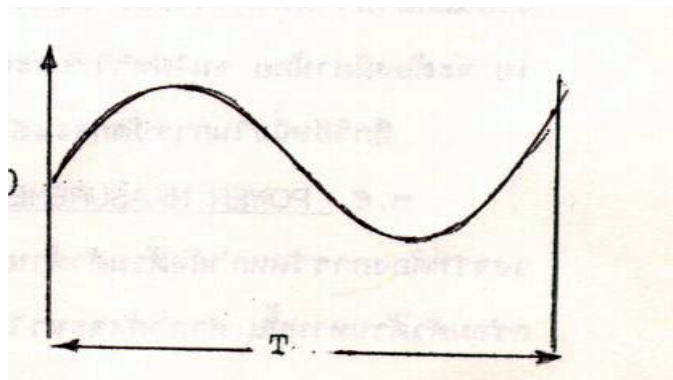
๔.๓ การนำไปใช้งาน (Application)

ในการใช้งานออสซิลโลสโคป ต้องคำนึงถึง Frequency Response ของเครื่อง Frequency Response คือความสามารถของ Oscilloscope ที่จะรับสัญญาณความถี่สูงได้โดยปราศจากการ Attenuate สัญญาณ ออสซิลโลสโคปแต่ละเครื่อง Frequency Response ไม่เท่ากัน เครื่องที่มี Frequency Response สูง ย่อมจะดีกว่า และมีราคาแพง ออสซิลโลสโคปส่วนใหญ่จะถูกจำกัดเรื่องนี้เป็นข้อเสียอย่างหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถที่จะ Response ความถี่สูง ๆ ได้ในงานที่เกี่ยวกับความถี่สูง ๆ นั้น จะใช้ Spectrum Analyzer แทน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า Frequency Response มีผลมากในการนำออสซิลโลสโคปไปใช้งาน Frequency Response สามารถหาได้ เมื่อทราบค่า Rise Time (ค่า ค่า Rise Time หาได้จาก SPEC. ของเครื่องในหนังสือคู่มือ)

$$\text{Frequency Response} = \frac{0.35}{\text{RISE TIME}}$$

ออสซิลโลสโคปส่วนใหญ่จะใช้คูรูปร่างของสัญญาณ แท้จริงแล้วยังมีเทคนิคการใช้งานอีกมาก ดังจะกล่าวต่อไปนี้.-

๔.๓.๑ Frequency Measurement ความถี่ของสัญญาณที่กำลังวัด จะหาได้โดยการวัดเวลาครบรอบ ๑ รอบ (Period) แล้วคำนวณหาความถี่



รูปภาพที่ ๔-๓ ความถี่ที่ต้องการวัดใน ๑ หน่วยเวลา

$$F = 1/T$$

$$F = \text{ความถี่ (Hz)}$$

$$T = \text{เวลาครบ ๑ รอบ (วินาที)}$$

๔.๓.๑.๑ วิธีการวัด

- (๑.) ป้อนสัญญาณที่ต้องการวัดความถี่เข้าที่ VERT.INPUT
- (๒.) ปรับ VOLTS/DIV และ TIME/DIV ให้ปรากฏภาพบนจอ 1-2 CYCLE
- (๓.) นับจำนวนช่องตามแนวนอนสำหรับ 1 Cycle และนำไปคูณกับ TIME/DIV ก็จะได้ เวลาใน 1 Cycle (Period)
- (๔.) คำนวณหาความถี่จากสูตร $F = 1/T$

๔.๓.๒ Amplitude Measurement ออสซิลโลสโคปใช้วัด Amplitude ของสัญญาณ ได้ไม่ว่าจะเป็น Sinusoidal หรือ Non-Sinusoidal โดยการตั้ง Vertical Input Coupling ไว้ที่ AC ป้อนสัญญาณเข้า Vertical Input ปรับ Volts/DIV ให้ปรากฏภาพบนจอตามความเหมาะสม นับช่องตามแนวตั้ง และนำไปคูณกับ Volts/DIV ก็จะได้ค่า Amplitude ตามต้องการค่าที่วัดได้นี้จะเป็น Peak To Peak

๔.๓.๓ DC Voltage Measurement การวัด D.C. Voltage ก็เป็นการวัด Amplitude แบบหนึ่ง โดยการตั้ง Vertical Input Coupling ไว้ที่ DC ปรับ Vertical Position ไว้ตำแหน่งใด ตำแหน่งหนึ่ง เพื่อเป็น Reference ตามปกติจะไว้ที่กึ่งกลางของจอป้อนสัญญาณที่ต้องการวัดเข้า Vertical Input สังเกตดูเส้น Sweep ถ้าเลื่อนขึ้น เป็นค่า +DC ถ้าเลื่อนเป็นค่า -DC สำหรับค่า DC Voltage อ่านได้จาก จำนวนช่องที่เลื่อนไปคูณกับ Volts/DIV

๔.๓.๔ Current Measurement ตามปกติแล้วไม่สามารถใช้ออสซิลโลสโคปวัด กระแสได้โดยตรง เนื่องจากมันมี Input Impedance สูงมาก แต่โดยการต่อต้านทานแบบคาร์บอนที่รู้ ค่าอนุกรมเข้าในวงจร และใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่า Voltage ที่ตกคร่อมตัวต้านทานนั้นจากนั้นก็สมารถหาค่ากระแสโดยใช้กฎของโอห์ม ข้อควรคำนึงก็คือ ค่าความต้านทานที่อนุกรมเข้าไป จะต้องมิต่ำน้อย จนไม่ทำให้กระแสที่ไหลในวงจรเปลี่ยนแปลง อีกวิธีหนึ่งในการวัดกระแสก็คือ โดยการใช้ Current Probe

๔.๓.๕ Power Measurement สามารถใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดกำลังโดยต่อ ปลายวงจรที่ต้องการวัดหาลำกำลังด้วยตัวต้านทานที่รู้ค่า RL และวัด Voltage (Peak To Peak) คร่อมตัวต้านทานนั้น ค่ากำลังจะหาได้จาก

$$P_o = \frac{(E_o(p-p) / 2.828)^2}{P_L}$$

ตัวอย่าง

เมื่อต่อตัวต้านทานค่า ๕๐ โอห์ม คร่อมที่เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ วัดค่า Output voltage ได้ 0.2 volt (peak to peak) output จากเครื่องกำเนิดสัญญาณนี้มีค่า

$$P_o = \frac{(0.2 / 2.828)^2}{50} = 0.1mv.$$

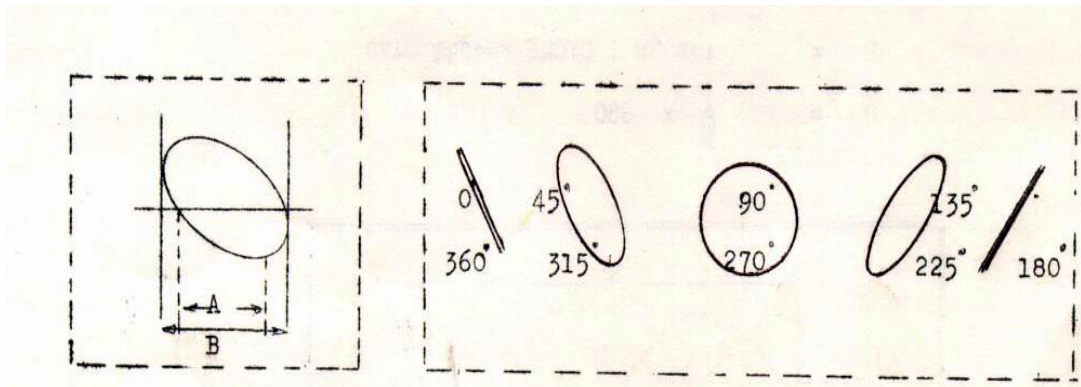
๔.๓.๖ การวัดเฟสของรูปคลื่นสัญญาณ (Phase Measurement)

การวัดเฟสของรูปคลื่นสัญญาณอาจทำได้หลายวิธี แต่จะนำมากล่าวเพียง ๒ วิธี เท่านั้น

๔.๓.๖.๑ วิธี X-Y

การวัดเฟสด้วยวิธี X-Y การวัดแบบนี้ใช้กับสัญญาณ Sine Wave สองสัญญาณ ที่มีความถี่เดียวกัน โดยสัญญาณอันหนึ่งจะต่อเข้า INPUT ทางแกน Y (Vertical) และอีกสัญญาณหนึ่ง ต่อเข้า Input ทางแกน X (Horizontal) มุมเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสองจะหาได้จากรูปบนจอ

ออสซิลโลสโคป หรือจากคำนวณ $\theta = \sin^{-1} \frac{A}{B}$



รูปภาพที่ ๔-๔ แสดงการวัดเฟสของสัญญาณสองสัญญาณ

วิธีการวัดกระทำดังนี้.-

- (๑.) หมุนปุ่ม Time/DIV ไปตำแหน่ง Ext.
- (๒.) ต่อสัญญาณทั้งสองเข้าออสซิลโลสโคป
- (๓.) ปรับ Volts/DIV จนได้รูปบนจอที่มีขนาดใหญ่พอสมควร ซึ่งอาจจะเป็นเส้นตรง วงรี หรือวงกลม
- (๔.) ปรับปุ่ม Position ทั้ง Vertical และ Horizontal ให้รูปอยู่ตรงกลางจอ วัดระยะ A และ B
- (๕.) ถ้า 0 เป็นเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสองจะได้

$$\theta = \text{arc SIN } \frac{A}{B}$$

๔.๓.๖.๒ วิธีใช้ Dual Trace

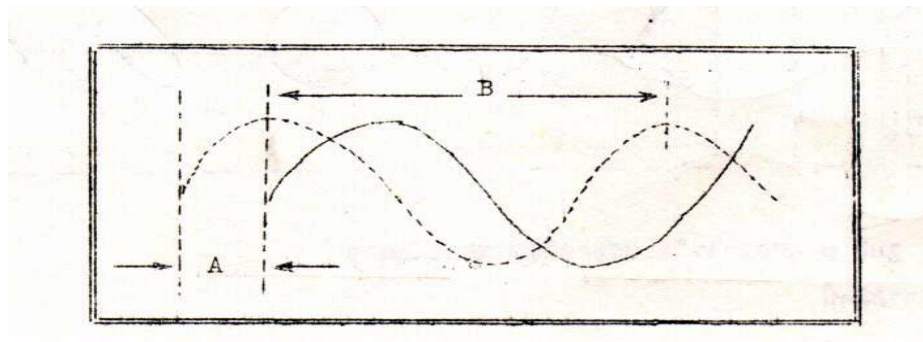
การวัดเฟสด้วย Dual Trace การวัดเฟสด้วยวิธีนี้ กระทำได้กับสัญญาณที่มีขนาดต่างกันความถี่หรือรูปคลื่นที่มีสัญญาณต่างกัน วิธีการวัดกระทำดังนี้.-

- (๑.) เลือก AC-DC-GND SW. ไปตำแหน่ง AC
- (๒.) เลือก Source SW. ไปตำแหน่ง Int.
- (๓.) เลือก Trig Level ไปตำแหน่ง Auto
- (๔.) หมุนปุ่ม Time Variable ไปตำแหน่ง Cal.
- (๕.) ต่อสัญญาณหนึ่งเข้า A Input และอีกสัญญาณเข้า B Input
- (๖.) ปรับ Volts/DIV ของทั้งสอง Channel จนรูปสัญญาณทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกัน
- (๗.) ปรับ Position ทั้ง Vertical และ Horizontal ให้ภาพอยู่กลางจอ
- (๘.) เลือกปุ่ม Vertical Mode ในตำแหน่ง CHOP
- (๙.) ปรับ Time/DIV จนสัญญาณทั้งสองบนจอสามารถมองเห็นได้ครบ Cycle วัดระยะ A และ B

เมื่อ A = เวลาที่แตกต่างกันระหว่างสัญญาณทั้งสอง

B = เวลาใน 1 Cycle ของสัญญาณแรก

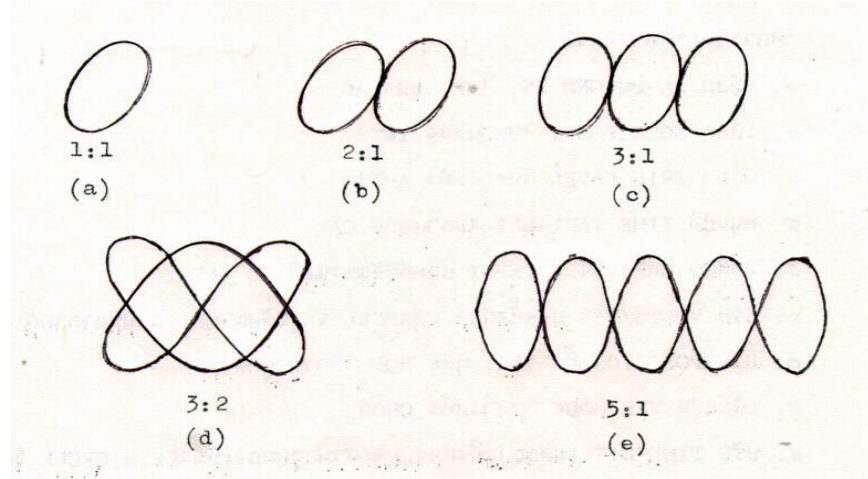
$$\theta = \frac{A}{B} \times 360^\circ$$



รูปภาพที่ ๔-๕ แสดงการวัดเฟสด้วยวิธีใช้ Dual Trace

๔.๓.๗ Frequency Ratio Measurement

การวัดความถี่อีกวิธีหนึ่ง โดยการใช้ออสซิลโลสโคปเป็นตัวเปรียบเทียบความถี่ ในการวัดจะป้อนความถี่ที่ต้องการทราบค่า เข้า Vertical Input และป้อนสัญญาณที่ทราบค่าความถี่แน่นอนแล้วเข้าที่ Horizontal Input โดยตัดวงจร Internal Sweep ออก ถ้าหาก Input ทั้งสองมีความถี่เดียวกัน จะปรากฏเป็นรูปวงกลมบนจอ ความถี่อื่นสามารถหาได้โดยอาศัยการเปรียบเทียบ Ratio ซึ่งดูได้จากภาพที่ปรากฏบนจอออสซิลโลสโคป



รูปภาพที่ ๔-๖ แสดงรูปภาพที่ปรากฏบนจอออสซิลโลสโคปแบบต่างๆ

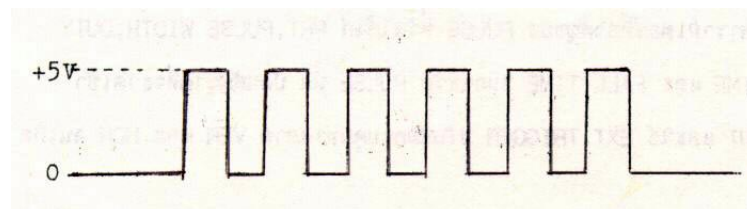
จากรูป ๔-๖ จะเห็นว่าความถี่ที่ต้องการทราบค่า จะเป็น ๕ เท่าของความถี่ที่ทราบค่าหรืออาจจะกล่าวได้ว่า ความถี่ของสัญญาณ Vertical Input ต่อความถี่ของสัญญาณ Horizontal Input เป็นอัตราส่วน ๕:๑

๔.๓.๘ การใช้ออสซิลโลสโคปเป็น Amplifier

สามารถใช้ออสซิลโลสโคปเป็น Amplifier เพื่อใช้ขยายสัญญาณที่มี Amplitude ต่ำ ๆ ได้ โดยการป้อนสัญญาณเข้าทาง Vertical Input นำสัญญาณออกทาง Vertical Output ซึ่งสัญญาณที่จะถูกขยายโดยทางภาค Vertical ของออสซิลโลสโคป ทำให้มี Amplitude สูงขึ้น เราสามารถปรับ Amplitude ได้ โดยใช้ Volts/DIV SW.

๔.๓.๙ การใช้ออสซิลโลสโคปเป็น Signal Generator

ออสซิลโลสโคปส่วนใหญ่จะมี Jack A-Gate หรือ B-Gate Jack นี้จะมีสัญญาณ Pulse ที่สามารถนำไปใช้งานด้าน Digital ได้ โดยใช้เป็น Clock Pulse สำหรับ IC จำพวก TTL ความถี่จะสามารถปรับได้ โดยใช้ Time/DIV SW. ลักษณะของ Output มีลักษณะตามรูป

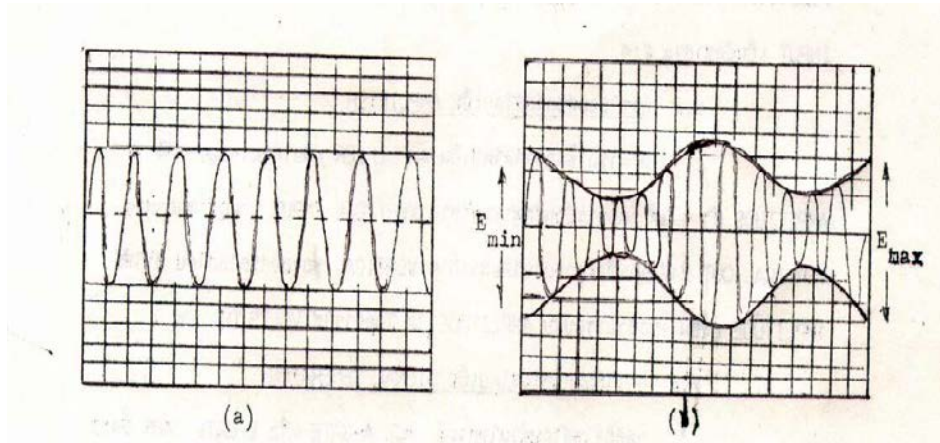


รูปภาพที่ ๔-๗ แสดงสัญญาณ Pulse ซึ่งใช้เป็น Signal Generator

๔.๓.๑๐ Modulation Measurement

การวัด % ของการ Mod จะใช้วัดเฉพาะ AM เท่านั้น ซึ่งวิธีการก็คือ ป้อนสัญญาณเข้า Vertical Input ปรับ Volts/DIV ให้ Amplitude แสดงบนจอ ๔ ช่อง (ตามรูปภาพที่ ๗ (a)) จากนั้นก็ทำการ Mod สังเกตดู AF. ที่ปรากฏบนจอ หาค่า E_{max} และ E_{min} แล้วทำการคำนวณหา % การ MOD จากสูตร

$$\% \text{ การ MOD} = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \times 100$$



รูปภาพที่ ๔-๘ แสดงรูปการ MOD แบบ AM.

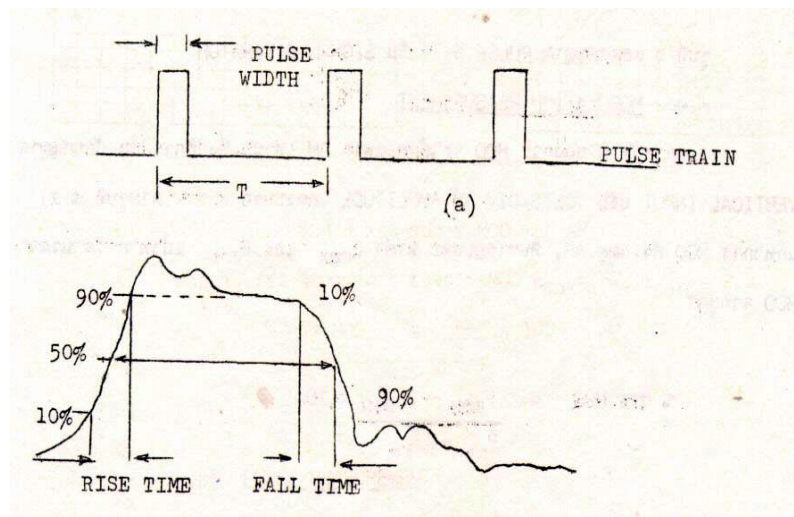
ตัวอย่าง

ในการวัด % ของการ MOD $E_{max} = 6 \text{ V.}, E_{min} = 2 \text{ V.}$

$$\begin{aligned} \% \text{ การ MOD} &= \frac{6 - 2}{6 + 2} \times 100 \\ &= 50 \% \end{aligned}$$

๔.๓.๑๑ Pulse Measurement

พารามิเตอร์ที่สำคัญของ Pulse ที่วัดได้แก่ PRT, Pulse Width, Duty Cycle, Rise Time และ Fall Time ในการวัด Pulse นั้น ป้อนสัญญาณที่จะวัดเข้า Vertical Input และใช้ Ext.Trigger ปรับปุ่มควบคุมทางภาค Vertical และ Horizontal จนเกิดภาพนิ่งบนจอ



รูปภาพที่ ๔-๙ แสดงลักษณะรูปร่างของ Pulse

$$PRF = \frac{1}{T}$$

$$\text{Duty Cycle} = \frac{\text{PULSE WIDTH}}{T} = \text{Pulse Width} \times PRF$$

Rise Time วัดที่ 10 % - 90 %

Fall Time วัดที่ 90 % - 10 %

Pulse Width วัดที่ 50 %

การใช้งานออสซิลโลสโคป ยังมีอีกหลายประการ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แล้วแต่ผู้ใช้นำไปใช้จะนำไปใช้ ซึ่งผู้ใช้ควรจะได้อีกหลายรายละเอียดยื่น ๆ อีก เพียงแค่ที่กล่าวมาเป็นเพียงตัวอย่างที่นิยมใช้งาน และเป็นเรื่องที่ใช้สมควรทราบ

๔.๓.๑๒ Probe

Probe คืออุปกรณ์ประกอบชุดของ ออสซิลโลสโคป มีหน้าที่รับสัญญาณจากจุดที่ต้องการวัดผ่านเข้าไปยัง Vertical Input ของ Oscilloscope ตัว probe มีค่าความต้านทานและค่าปาดชดเชยอยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งเหมาะสมกับความถี่หนึ่ง ดังนั้นการเลือกใช้ probe ให้เหมาะสมกับความถี่และความแรงของสัญญาณที่ต้องการวัด จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณที่ปรากฏบนจอภาพเป็นสัญญาณที่ถูกต้อง ไม่มีการผิดเพี้ยนทั้งรูปร่าง และความแรงของสัญญาณ

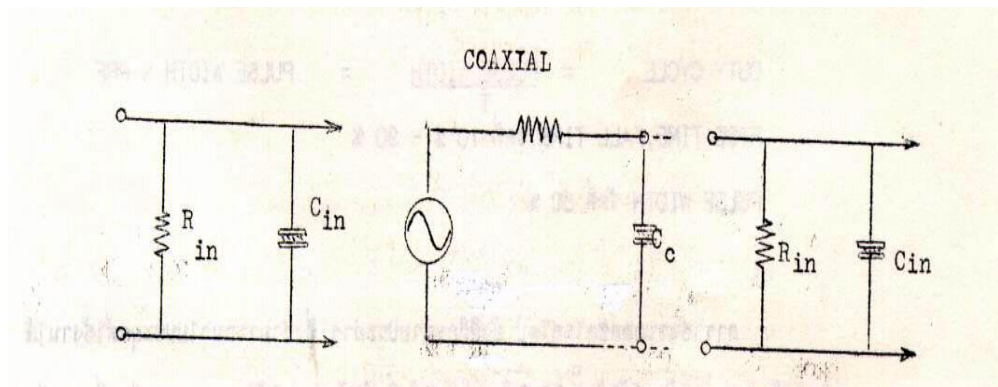
probe ที่ใช้มีหลายแบบ หลายชนิด เราพอจะแบ่งชนิดของ probe ได้ดังนี้

๔.๓.๑๒.๑ Active Probe

Probe ชนิดนี้ถูกออกแบบเพื่อสำหรับวัดสัญญาณที่มีความถี่สูง และ Rise Time เร็วมาก Probe ชนิดนี้จะมี Input Impedance สูง แต่มีการลดทอนสัญญาณต่ำ ต้องอาศัยกำลังไฟฟ้าป้อนให้มันทำงาน ซึ่งอาจมาจากส่วนจ่ายกำลังสำหรับ Probe หรือชุดจำหน่ายที่แยกต่างหาก เพื่อให้ Probe ชนิดนี้ มีขนาดเล็กและใช้ง่าย และมีวงจรมีขนาดเล็กใส่เข้าไปที่ปลาย ภาค Input จะปรากฏด้วย FET. เพื่อให้เกิด Impedance สูง และปรับให้มีอัตราขยายเท่ากับ ๑ พอดี

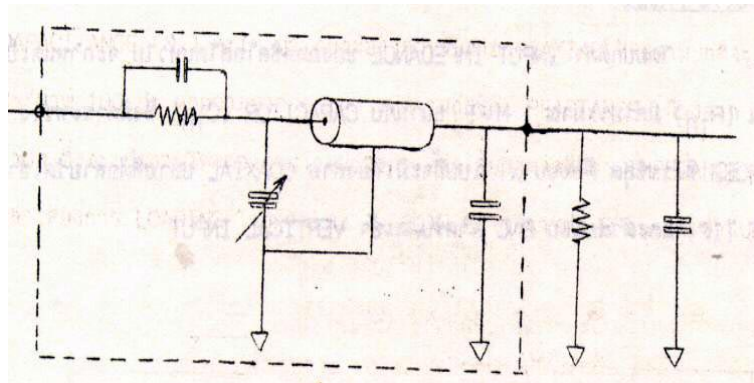
๔.๓.๑๒.๒ Passive Probe

โดยปกติค่า Input Impedance ของออสซิลโลสโคปทั่วไป จะกำหนดเป็นค่าความต้านทาน (R_{in}) มีค่าประมาณ 1 M Ω ขนานกับ Capacitor (C_{in}) ซึ่งมีค่าระหว่าง 10-30 pf สาย Probe ที่ง่ายที่สุด คือแบบ xl แบบนี้จะมีเพียงสาย Coaxial ปลายที่ต่อสายวัดเข้ากับ



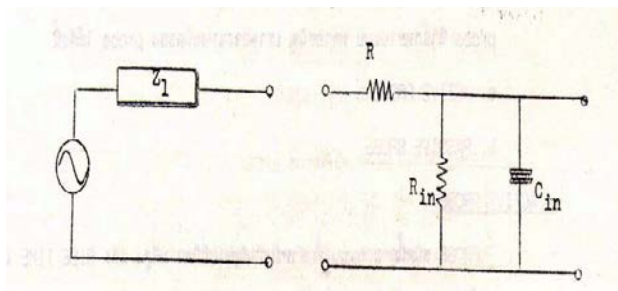
รูปภาพที่ ๔-๑๐ แสดงวงจรสมมูลของ Input ของออสซิลโลสโคป (a) เมื่อต่อร่วมกับวงจรภายนอก (b)

สำหรับการวัดไฟ DC จะไม่ค่อยมีปัญหาในการใช้ Probe แต่สำหรับไฟ AC ค่า Stray Capacitance (C_C) จะเข้ามาเกี่ยวข้อง สำหรับสาย Coaxial ที่ใช้ตามปกติจะมีค่า C_C ประมาณ 100 pf ต่อความยาว ๑ เมตร ที่ความถี่สูงค่า Reactance เนื่องจาก $C_{in} + C_C$ ยังมี ค่าต่ำ ซึ่ง จะเกิดการไหลตรงจรมากขึ้น จึงควรหลีกเลี่ยงจุดวัดที่มีค่า Impedance ต่ำ เราสามารถหลีกเลี่ยงการ Loading โดยการเพิ่ม Impedance โดยการต่อ R อนุกรมเข้าไปดังรูป



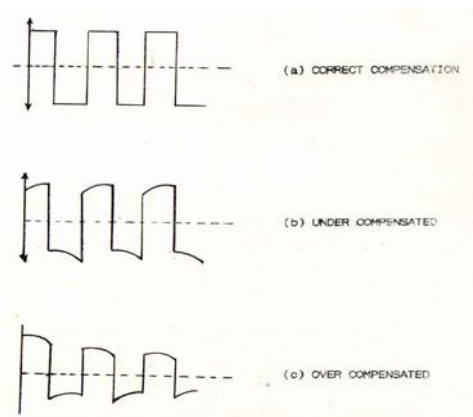
รูปภาพที่ ๔-๑๑ แสดงการต่อ R เข้าในวงจร เพื่อลดการ Loading

โดยทั่วไป Probe x 1 นิยมใช้วัดความถี่ในย่านต่าง ๆ เพราะความถี่สูงจะมีผลต่อค่า Reactance เนื่องจาก C_{in} และ C_C ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้น Probe x 1 ขึ้นมาเพื่อเพิ่มค่า Input Impedance และลดค่า Stray Capacitance



รูปภาพที่ ๔-๑๒ รูปแสดงภายใน Probe x ๑๐

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าค่า C_{10} จะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับออสซิลโลสโคป แต่ละเครื่องดังนั้นวิธีการที่ถูกต้อง เมื่อนำเอาสาย Probe ไปใช้ออสซิลโลสโคป จะต้องปรับ Probe ก่อนเพื่อว่าสัญญาณที่ผ่าน Probe จะได้ไม่ผิดเพี้ยน โดยใช้ Probe จับที่ Calibrator ซึ่งให้สัญญาณ Output เป็น Square Wave ความถี่ 1 KHz และปรับ C_{comp} จนกระทั่งได้ภาพตามรูป



รูปภาพที่ ๔-๑๓ รูปแสดงการปรับ C_{comp} ของ Probe

๔.๔ Digital Storage Oscilloscope

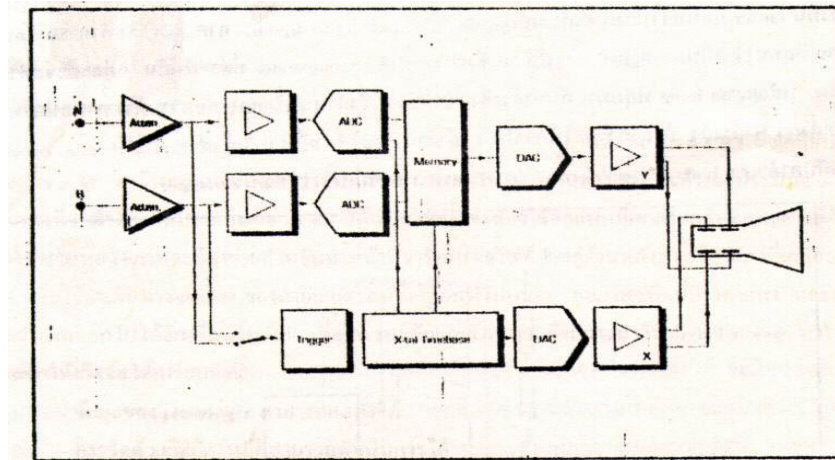
๔.๔.๑ Digital Storage

ภาพที่เกิดบนจอ CRT ซึ่งเคลือบด้วยการเรืองแสง P-31 จะค้างอยู่บนจอเพียงช่วงสั้น ๆ $๑/๑๐๐๐$ วินาที ส่วนสาร P-7 จะค้างอยู่ประมาณ 300 mS. ฉะนั้นการที่จะทำให้ภาพปรากฏบนจอ CRT ได้นานกว่านี้ จะต้องใช้จอแบบพิเศษเรียกว่า Storage Tube ซึ่งโครงสร้างภายในหลอดภาพจะมีตาข่ายสำหรับทำหน้าที่ชาร์จประจุไฟฟ้า อยู่ด้านหลังสารเรืองแสงที่เคลือบไว้บนจอภาพ เพื่อใช้จำเส้นทาง (Trace) ของลำอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปบนจอ จอภาพชนิดนี้มีราคาแพง และสามารถยืดเวลาจำภาพออกไปได้อีกเพียงเล็กน้อย เพื่อเอาชนะข้อเสียดังกล่าว จึงมีการนำวิธี Digital Storage มาใช้งานแทนซึ่งจะทำให้เกิดข้อได้เปรียบดังนี้

- ข้อมูลของ pre-Trigger สามารถแสดงได้
- การวัดด้วยวิธีอัตโนมัติสามารถดำเนินการได้
- รูปแบบสัญญาณสามารถเก็บได้ไม่มีกำหนด
- รูปแบบสัญญาณสามารถส่งผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป
- รูปแบบสัญญาณสามารถส่งไปพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ได้
- สามารถเปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณที่วัดกับสัญญาณอ้างอิงได้ด้วยตนเองหรือ

อัตโนมัติ

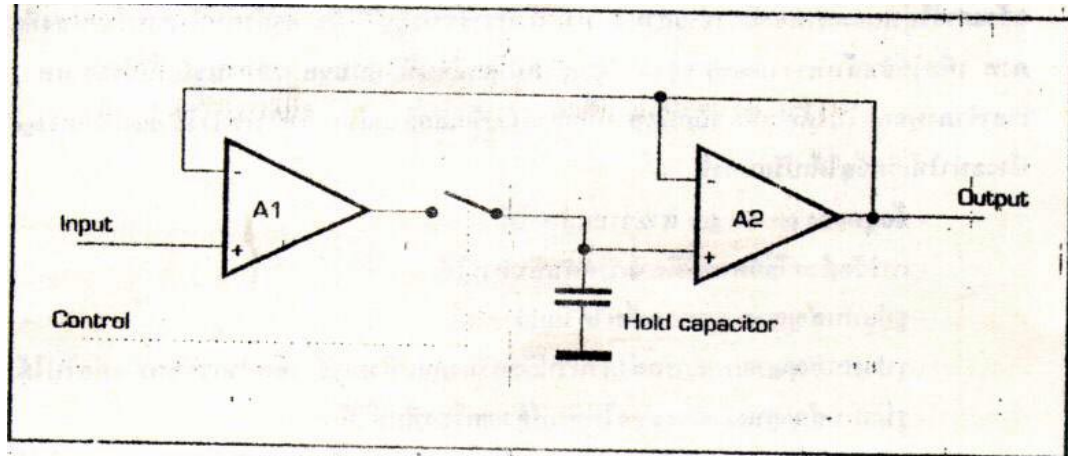
- สามารถกำหนดการทดสอบในแต่ละครั้งได้ว่าผ่านหรือไม่ (GO/NOGO TEST)
- ข้อมูลของสัญญาณสามารถนำไปทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้



รูปภาพที่ ๔-๑๔ Block diagram ของ digital storage oscilloscope

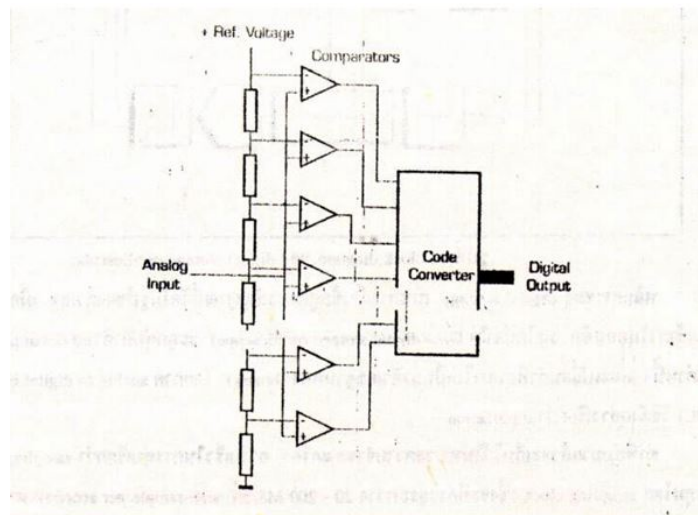
หลักการของ Digital Storage เป็นการเก็บข้อมูลของสัญญาณที่วัดในรูปของตัวเลข เมื่อสัญญาณถูกป้อนเข้าในออสซิลโลสโคปชนิด DSO (digital storage oscilloscope) จะถูกสุ่มค่าตัวอย่าง (sample) ในอัตราที่คงที่ค่าหนึ่ง และเปลี่ยนค่าที่สุ่มมาไปเป็นค่าตัวเลขฐานสอง (binary) โดยภาค Analog to Digital Converter (ADC) วิธีดังกล่าวเรียกว่า Digitization

ค่าที่สุ่มมาแล้วจะเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่อง ความเร็วในการสุ่มเรียกว่า Sampling Rate จะถูกควบคุมโดย Sampling Clock ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 20-200 MS/S (Mega-Sample per Second) และข้อมูลที่สุ่มจะถูกนำมาสร้างภาพใหม่บนจอภาพอีกครั้ง ดังนั้นในเครื่องออสซิลโลสโคปแบบ DSO เมื่อมีสัญญาณเข้ามา ก็จะมีค่า (Sample) เก็บไว้ในหน่วยความจำก่อน แล้วจึงนำค่าในหน่วยความจำไปสร้างเป็นภาพ



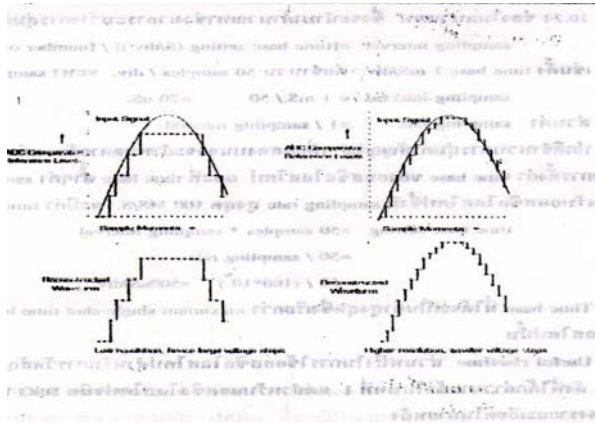
รูปภาพที่ ๔-๑๕ วงจร Sample and hold

Sampling and Digitization รูปภาพที่ ๒ เป็นวงจรใช้ในการ Sample และ hold สัญญาณที่วัด กล่าวคือสัญญาณ Input จะผ่านภาคขยาย A1 และชาร์จประจุเพื่อ hold สัญญาณ โดยผ่านสวิทช์ ที่ทำการสุ่มค่าสัญญาณ A2 จะเป็น buffer ก่อนส่งไปยังภาคแปลงสัญญาณ ADC (Analog-to Digital) ภาค ADC จะทำการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สุ่มมาไปเป็นค่า digital ดังรูป ๓ ซึ่ง ประกอบด้วย comparator ที่ต่อเรียงกัน แต่ละตัวจะทำการ เปรียบเทียบสัญญาณ Input ที่สุ่มมา กับค่าอ้างอิงแต่ละช่วง ซึ่งกำหนด โดยการต่อความต้านทานอนุกรมกัน ว่าสูงหรือต่ำกว่าค่าอ้างอิง ถ้าสูงกว่าจะให้ค่าเป็น ๑ ถ้าต่ำกว่าจะให้ค่าเป็น ๐ แล้วส่งต่อให้กับ Code Converter เพื่อแปลงเป็นค่าตัวเลข Binary 8 Bits วงจร ADC ชนิดที่กล่าวมานี้เรียกว่า Flash converter



รูปภาพที่ ๔-๑๖ วงจร Analog-to-digital

Analog-to-digital converter and vertical resolution ภาค ADC จะมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณ ซึ่งเรียกว่า Vertical resolution มากเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับจำนวน reference voltage ที่ใช้ โดยมี comparator เป็นตัวทำหน้าที่เปรียบเทียบตัวอย่างสัญญาณที่รับเข้ามา ถ้าจำนวน reference voltage และ comparator มีมาก ก็จะทำให้การแสดงรายละเอียดของภาพมีค่า resolution สูง



รูปภาพที่ ๔-๑๗ ผลของ Vertical resolution ต่อรูปของสัญญาณ

ค่า Vertical resolution สามารถอธิบายได้ด้วยจำนวน bit ของสัญญาณ digital output ซึ่งใช้ในการกำหนดจำนวนของระดับสัญญาณ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Number of levels} = 2^{\text{number of bits}}$$

โดยทั่วไปจะใช้ 8 bits เป็นหลัก นั่นคือจะมีการแบ่งระดับสัญญาณ Input ออกเป็น $2^8 = 256$ ค่า ซึ่งเพียงพอที่จะแสดงรายละเอียดของสัญญาณที่วัด และสัญญาณที่เล็กสุดที่จะแสดงได้ จะมีขนาดเพียงจุดบนจอภาพเท่านั้น สัญญาณ output ของ ADC ซึ่งประกอบด้วย 8 bit ซึ่งเท่ากับ 1 byte จะแทนค่าระดับสัญญาณที่สุ่มมาจากสัญญาณ Input ๑ ค่า ในทางปฏิบัติค่า resolution จะถูกจำกัดที่ราคาของภาค ADC เพราะแต่ละ bit ที่เพิ่มขึ้นนั้น จะต้องเพิ่มจำนวน comparator เป็นสองเท่า ทำให้วงจร ADC ต้องใช้พลังงานมากขึ้น มีขนาดใหญ่ขึ้น

Time base and horizontal resolution ในส่วนของภาคเบี่ยงเบนแนวนอนของ DSO นั้น จะต้องทำการแสดงภาพโดยการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณที่มากพอ กลุ่มของค่าที่สุ่มตัวอย่างสัญญาณมา ๑ ภาพนั้นเรียกว่า record ซึ่งจะนำมาใช้ในการสร้างภาพภายหลัง จำนวนตัวอย่างที่สุ่มมาได้ และเก็บค่าไว้ในหน่วยความจำจะเรียกว่า record length หรือ acquisition length มีหน่วยเป็น byte หรือ k-byte = (1k-byte = 1,024 samplings)

โดยทั่วไปออสซิลโลสโคป จะแสดงภาพของค่าที่สุ่มมา ๕๑๒ ค่า ตามแนวแกนอน และเพื่อให้ง่ายต่อการทำงาน จะแบ่งเป็น ๕๐ ค่าตัวอย่างที่สุ่มมาต่อ ๑ ช่องในแนวนอน นั่นคือ ในแนวนอน จะมีความยาวเท่ากับ $512/50 = 10.๒๔$ ช่องในแนวนอน ซึ่งจะนำมาคำนวณหาช่วงเวลาระหว่างการสุ่มตัวอย่างได้

Sampling interval = (time base setting (S/div.)) / (number of samples) เช่นตั้ง time base 1 inS/div. ต่อจำนวน 50 samples/div. จะหา sampling interval ได้ดังนี้

$$\text{Sampling interval} = 1 \text{ mS.}/50 = 20 \mu\text{s.}$$

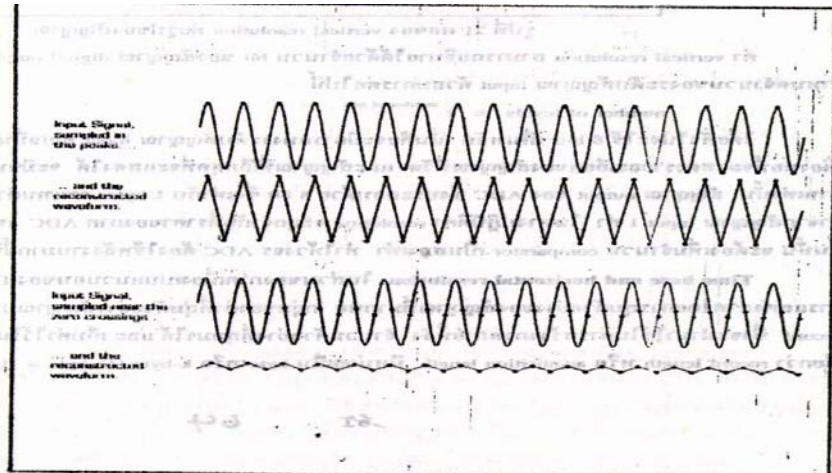
$$\text{ส่วนค่า Sampling rate} = 1 / \text{sampling interval}$$

ปกติจำนวนการสุ่มค่าสัญญาณ เพื่อแสดงบนจอจะกำหนดตายตัว แต่จะทำการเปลี่ยนค่า Sampling Rate ตามการตั้งค่า Time Base ของออสซิลโลสโคป และที่ Time Base ต่ำ ๆ ค่า Sampling Rate ที่ใช้จะต่ำตามไปด้วย สำหรับออสซิลโลสโคปซึ่งมี Sampling Rate สูงสุด 100 MS/S. จะมีค่า Time base สูงสุดดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Time base setting} &= 50 \text{ samples} * \text{ sampling interval} \\ &= 50 / \text{ sampling rate} \\ &= 50 / (100 * 10^6) = 500 \text{ nS/div.} \end{aligned}$$

Time base ที่ได้จะเป็นค่าสูงสุดซึ่งเรียกว่า maximum single-shot time base setting ของเครื่องออสซิลโลสโคปนั้น

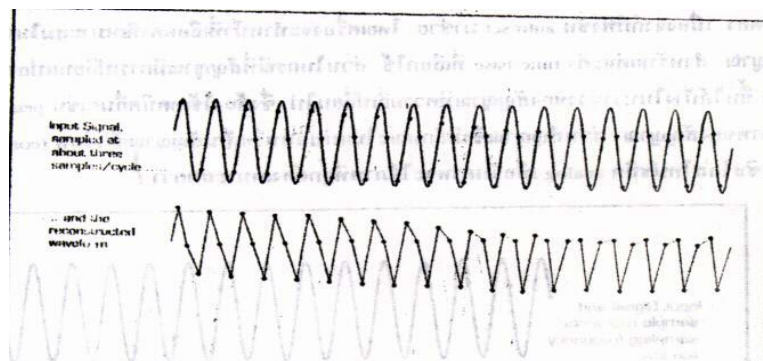
Useful rise time ส่วนหนึ่งในการใช้ออสซิลโลสโคปสำหรับการวัดสัญญาณ คือการหาค่า rise and fall time ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ ๑ แต่สำหรับออสซิลโลสโคปชนิด DSO นั้น จะเรียกว่า useful rise Time ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในภายหลัง



รูปภาพที่ ๔-๑๘ แสดง Sine wave ที่ถูกสุ่มด้วยอัตราความเร็ว ๒ เท่าของความถี่

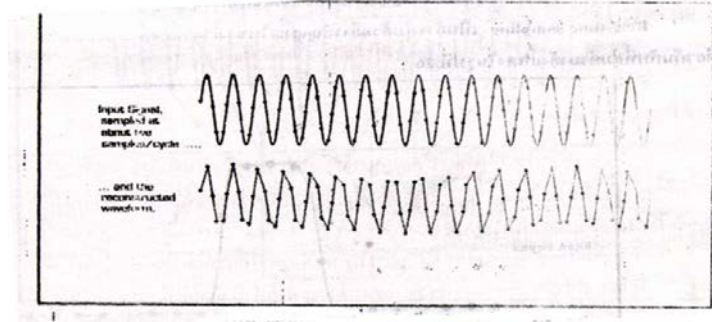
Maximum Captured Frequency, Shannon’s Sampling Criterion ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเพื่อเปลี่ยนเป็นค่า Digital นั้น ความถี่ของการสุ่มจะต้องไม่น้อยกว่า สองเท่าของความถี่สูงของสัญญาณที่จะทำการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Shannon’s Sampling Theory ดังจะทำการพิจารณาจากตัวอย่างต่อไปนี้

จากรูปภาพที่ ๕ แสดงสัญญาณ Sine ซึ่งถูกสุ่มตัวอย่างด้วย clock ที่มีความเร็วเป็น ๒ เท่าของสัญญาณ ที่จุด peak และจุดอื่น ๆ ที่ใกล้เคียงกับศูนย์ เมื่อนำมาสร้างสัญญาณขึ้นใหม่จะได้รูปแบบของสัญญาณที่ต่างกันอย่างมาก



รูปภาพที่ ๔-๑๙ สัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยอัตราเร็ว ๓ เท่า

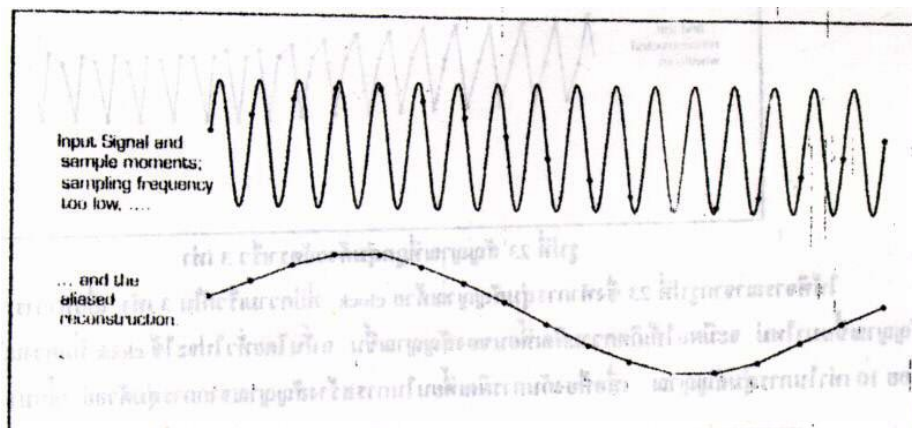
ให้พิจารณาจากรูปภาพที่ ๖ ซึ่งทำการสุ่มสัญญาณด้วย Clock ที่มีความเร็วเป็น ๓ เท่า เมื่อทำการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ จะมีผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณขึ้น ฉะนั้นโดยทั่วไปจะใช้ clock ที่มีความเร็วอย่างน้อย ๑๐ เท่า ในการสุ่มสัญญาณ เพื่อป้องกันการผิดเพี้ยนในการสร้างสัญญาณจากการสุ่มตัวอย่างขึ้นมา



รูปภาพที่ ๔-๒๐ สัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยอัตราเร็ว ๕ เท่า

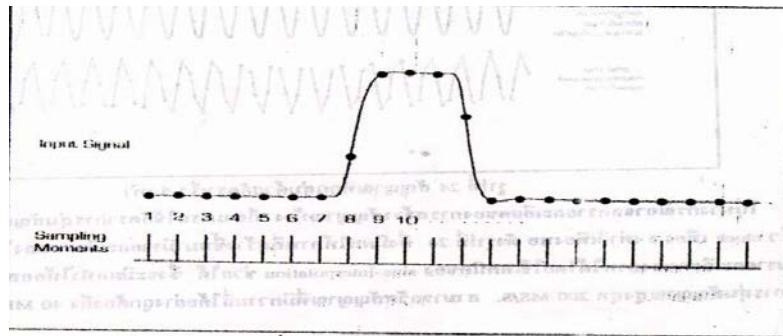
ในบางกรณีที่อาจลดรายละเอียดของการสร้างสัญญาณบ้าง ก็สามารถใช้อัตราการสุ่มสัญญาณด้วยความเร็ว Clock เพียง ๕ เท่าก็เพียงพอ ดังรูปภาพที่ ๗ ซึ่งมีผลให้ภาพที่สร้างขึ้นมามีรายละเอียดลดลงไปบ้าง และอาจเพิ่มรายละเอียดของภาพได้โดยใช้เทคนิคของ Sine-Interpolation ช่วยได้ ซึ่งจะมีผลทำให้ฮออสซิลโลสโคปที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณสูงสุด 200 MS/S. สามารถวัดสัญญาณที่มีความถี่ได้อย่างถูกต้องถึง ๔๙ MHz

Aliasing เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ ด้วยความถี่ต่ำกว่าสัญญาณที่วัดซึ่งจะได้ผลของภาพที่ไม่แน่นอนดังรูปภาพที่ ๘ ซึ่งเป็นผลจากการสร้างสัญญาณขึ้นมาจากการสุ่มตัวอย่างสัญญาณน้อยเกินไป ภาพสัญญาณนี้เรียกว่า Alias Signal หรือ Ghost Signal ซึ่งมีความถี่ผิดไปจากสัญญาณเดิม แต่จะมีขนาดของสัญญาณ (Amplitude) ที่คงเดิม อย่างไรก็ตามปัญหาในการเกิด Aliasing ในฮออสซิลโลสโคปรุ่นใหม่ๆ จะลดลง เนื่องจากมีฟังก์ชัน Auto-Set มาช่วย โดยเครื่องจะทำหน้าที่เลือกค่าที่เหมาะสมในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ สำหรับแต่ละค่า Line Base ที่เลือกใช้ ส่วนในกรณีที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงความถี่มาก ก็อาจเกิด Alias ขึ้นได้บ้างในบางช่วงของสัญญาณที่ความถี่เปลี่ยนไป ซึ่งจะต้องใช้เทคนิคอื่น ๆ เช่น Peak Detection ช่วยในการจับภาพของสัญญาณ ส่วนสัญญาณซึ่งมีลักษณะไม่แน่นอนหรือเป็นสัญญาณซับซ้อน (Complex Signal) ควรใช้ฮออสซิลโลสโคปชนิด Analog เพื่อจับภาพจะได้ภาพที่ถูกตัดต้องเหมาะสมกว่า



รูปภาพที่ ๔-๒๑ สัญญาณที่เกิดจากผลของการสุ่มสัญญาณช้าเกินไป

Real-time sampling เป็นการสุ่มตัวอย่างสัญญาณในช่วงเวลาที่คงที่ และแสดงผลบนจอภาพในลำดับเดียวกันกับที่สุ่มค่ามา



รูปภาพที่ ๔-๒๒ Real Time Sampling

ในบางกรณีความเร็วในการสุ่มสัญญาณช้า ทำให้ภาพมีรายละเอียดไม่พอ และบางกรณีสัญญาณจะมีรูปแบบซ้ำกัน ในกรณีนี้ฮอสซิลโคปสามารถสร้างรูปของสัญญาณ จากกลุ่มของการสุ่มตัวอย่างของ

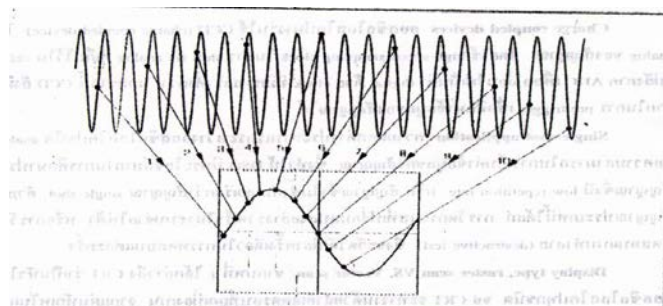
สัญญาณในคาบเวลาที่ซ้ำกันได้ ซึ่งเรียกว่า equivalent time sampling โดยมีวิธีดังนี้ ในการ Trigger ๑ ครั้ง จะได้ค่าที่สุ่มตัวอย่างมาได้จำนวนหนึ่ง เช่น ๕ ค่า และเก็บไว้ในหน่วยความจำ ในการ Trigger ครั้งต่อไปจะสุ่มที่ ตำแหน่งอื่นของสัญญาณอีก ๕ ค่า และเก็บไว้ในหน่วยความจำเพียงอย่างเดียวหลายครั้ง จนได้ค่าที่สุ่มมาในหน่วยความจำพอที่จะสร้างสัญญาณที่ สมบูรณ์ขึ้นมาได้บนจอภาพ โดยวิธีของ time equivalent sampling จะได้สัญญาณที่มีความละเอียดสูง เปรียบเสมือนฮอสซิลโคปมี Virtual Sampling Speed หรือ Equivalent Sampling Rate ที่สูงกว่าความสามารถของเครื่อง

Equivalent Time Sample Rate เป็นการเพิ่มความละเอียดของภาพสัญญาณ ด้วยการสร้างภาพจากการสุ่มตัวอย่างหลายคาบสัญญาณ พิจารณาจากฮอสซิลโคป DSO กำหนดให้ตั้ง Time Base ไว้ที่ 5 nS/div. ทำการแสดงผลภาพด้วยการสุ่มตัวอย่างมา ๕๐ จุดต่อ 1 div. จะหาอัตราการสุ่มตัวอย่างได้ดังนี้

$$\text{Equivalent sampling rate} = 50/5 \text{ nS} = 50/(5 \times 10^{-9}) \times 10,000 \text{ MS/S} = 10 \text{ GS/S}$$

ค่า Equivalent Sampling Rate เป็นค่าเสมือนในการแสดงความละเอียดของภาพที่ได้ และเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการสุ่มตัวอย่างที่ต้องใช้ เพื่อให้ได้ภาพดังกล่าวด้วยวิธี Real Time Sampling วิธี Equivalent Sampling Rate จะมีวิธีสร้างภาพอยู่ ๒ วิธีคือ Sequential Sampling และ Random Sampling

Sequential Sampling เป็นการสุ่มตัวอย่างสัญญาณตามลำดับ จากด้านซ้ายไปยังด้านขวาของจอภาพแต่ละค่าที่สุ่มมาจะได้จากการ Trigger และเก็บไว้ในหน่วยความจำ



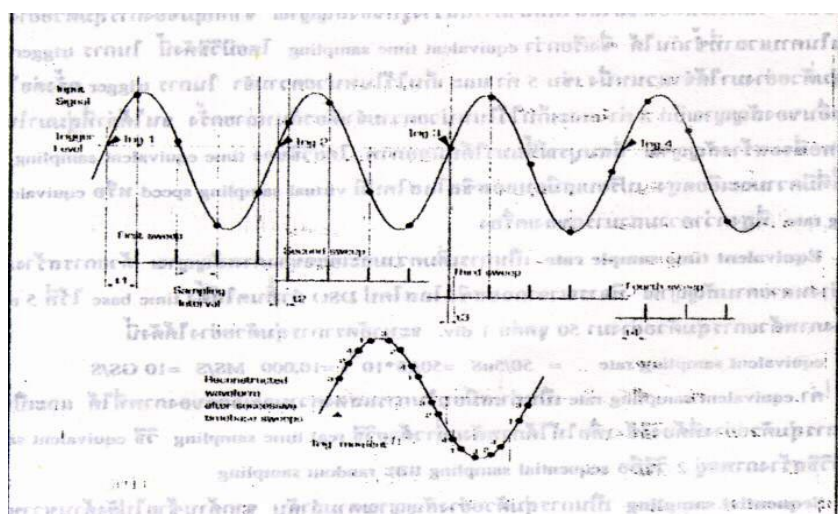
รูป ๔-๒๓ Sequential Sampling

ค่าที่สุ่มตัวอย่างค่าแรกเป็นค่าที่ได้จากการ Trigger และเก็บไว้ในหน่วยความจำ หลังจากนั้นการ Trigger ครั้งต่อไป จะมีการหน่วงเวลาออกไป $(n-1)\Delta t$ (n เป็นจำนวนตัวอย่างที่สุ่มค่ามา , Δt เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ น้อยกว่า 50 pS. ที่ใช้หน่วงในการ Trigger ครั้งต่อไป)

ค่าที่สุ่มได้จะเก็บไว้ในหน่วยความจำเดียวกัน โดยมีค่า Time resolution ของภาพในหน่วยความจำเท่ากับ Δt นอกจากนี้สามารถทำ Post Trigger Delay ได้

Random Sampling เป็นการสุ่มตัวอย่างสัญญาณตามช่วงเวลาที่กำหนด เมื่อผ่านจุด Trigger มาแล้วค่าที่สุ่มตัวอย่างมาได้ในแต่ละ Trigger จะเก็บไว้ในหน่วยความจำ ในตำแหน่งซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เกิดขึ้นหลังการ Trigger และจะใช้กำหนดตำแหน่งของแต่ละค่าที่สุ่มมาลงในรูปภาพที่จะสร้างขึ้นต่อไป

ข้อดีของ Random Sampling คือสามารถทำ Pre-Trigger และ Post-Trigger ได้



รูปภาพที่ ๔-๒๔ Random Sampling

Charge Coupled Devices ออสซิลโลสโคปบางรุ่นใช้ CCD (Charge Coupled Device) ในการเก็บค่า Analog ของสัญญาณ โดยใช้ High-Speed Sampling Clock ในการ Shift ค่า Analog ที่เก็บไว้ใน Cell ของ CCD ไปยังภาค ADC เพื่อเปลี่ยนไปเป็นค่า Digital ด้วย Clock ที่มีความเร็วต่ำกว่า นอกจากนี้ CCD ยังมีประโยชน์มากในการ Pre-Trigger เพื่อศึกษาข้อมูลของสัญญาณได้

Single-shot Application ความแตกต่างประการแรกระหว่างออสซิลโลสโคปชนิด Analog และ DSO คือความสามารถในการเก็บค่าข้อมูลของสัญญาณ ซึ่งทำให้ DSO มีประโยชน์มากในการศึกษาปรากฏการณ์ของสัญญาณซึ่งมี Low Repetition Rate หรือ สัญญาณซึ่งไม่ซ้ำกันเลยเรียกว่า สัญญาณ Single-shot ตัวอย่างของการวัดสัญญาณประเภทนี้ได้แก่ การวัดกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในระบบจ่ายไฟฟ้า หรือการวัดในขณะทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test) ซึ่งจะวัดได้เพียงครั้งเดียวในกาทดสอบแต่ละครั้ง

Display Type, Raster Scan VS. Vector Scan จากบทที่ ๑ ได้กล่าวถึง CRT ว่าเป็นหัวใจของออสซิลโลสโคป จอ CRT จะทำงานด้วยลำอิเล็กตรอนที่ถูกเบี่ยงเบน จากแผ่นหักเหในแนวตั้งและแนวนอนชนิด Electrostatic Deflection ซึ่งสามารถทำงานในย่านความถี่ที่กว้างมากจาก DC ขึ้นไป เป็นจอภาพที่มีใช้ในออสซิลโลสโคปชนิด Analog ซึ่งสัญญาณ Input จะถูกป้อนเข้าสู่จอภาพโดยผ่าน Attenuation หรือ amplification โดยตรง ฉะนั้นภาพที่ได้จึงเป็นภาพจริงที่มีความถูกต้องและ

เชื่อถือได้สูง เนื่องจากการเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยสัญญาณ Input และค่า Time Base ที่ใช้ จึงเรียกจอภาพชนิดนี้ว่าเป็น Vector Scan Display

ส่วนใน DSO ภาพที่แสดงบนจอภาพจะเป็นภาพที่สร้างขึ้นใหม่จากหน่วยความจำ จึงมีการใช้จอภาพ CRT สีในแบบอื่น ๆ เช่นที่ใช้ใน TV และ PC monitor ซึ่งใช้การเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กโดยมีจุดคอยล์แม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกาะอยู่ภายนอกหลอดภาพเป็นตัวควบคุม เรียกว่า Magnetic Deflection หลอด

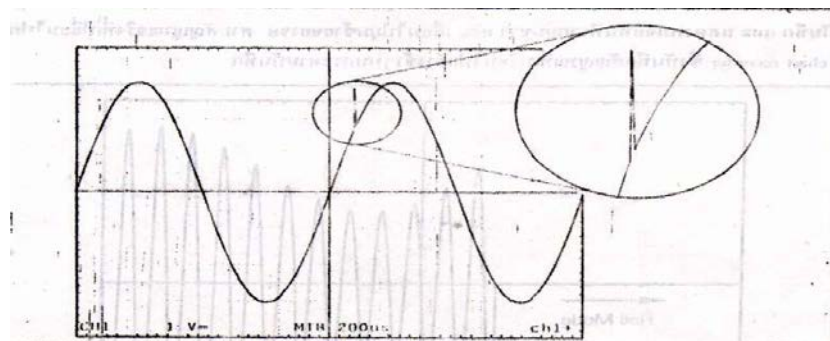
ภาพชนิดนี้มีขีดจำกัดของความเร็วในการเบี่ยงเบน ซึ่งมีการทำงานคล้ายหลอดภาพ TV คือจะมีเส้นกวาดในแนวนอนจากซ้ายไปขวา ด้วยความถี่ที่จำนวน ๕๐๐ เส้น หรือมากกว่าคงที่ตลอดเวลา และ DSO จะคำนวณว่าจุดใดบนจอจะเป็นภาพของสัญญาณที่วัด หลอดภาพ CRT ชนิดนี้เรียกว่า Raster Scan Display ซึ่งจะมีใช้งานเฉพาะใน DSO เท่านั้น ไม่สามารถใช้กับออสซิลโลสโคปแบบ Analog ได้ นอกจากนี้ใน DSO รุ่นใหม่ ๆ จะใช้แผงแสดงชนิด LCD (Liquid Crystal Display) ซึ่งใช้พลังงานน้อยกว่าจอ CRT มาก เหมาะสำหรับเครื่องชนิดพกพา ซึ่งสามารถจะทำงานด้วยแบตเตอรี่ภายในเครื่อง

๔.๔.๒ การควบคุมและส่วนประกอบของ DSO

การใช้งานของ DSO ทั่วไปจะคล้ายกับของ Analog แต่บางฟังก์ชันจะไม่มีใช้ในออสซิลโลสโคปแบบ Analog ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

Pre-Trigger, Pos-Trigger ในออสซิลโลสโคปชนิด Analog นั้น แต่ละ Time Base จะเริ่ม Sweep เมื่อถึงระดับ Trigger ของสัญญาณ Input แล้ว ฉะนั้นจึงเป็นการศึกษารูปแบบสัญญาณหลังจาก Trigger เกิดขึ้นแล้วเท่านั้น แต่ในงานบางอย่างรูปแบบสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงก่อน Trigger เช่น ในการปิด-เปิดวงจรของทรานซิสเตอร์ ในการที่จะศึกษาระดับสัญญาณ Input ที่จะไปกระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร ซึ่งมีระดับสัญญาณต่ำเกินที่จะ Trigger ให้เห็นรูปบนจอภาพได้อย่างคงที่ จึงต้องทำการ Pre-Trigger เพื่อดูภาพสัญญาณก่อนถึงจุด Trigger นั้น และในงานบางอย่างก็จำเป็นต้องศึกษารายละเอียดของสัญญาณหลัง Trigger เช่นหาจำนวนของ Jitter ของสัญญาณ Square Wave จำเป็นต้องใช้ออสซิลโลสโคปชนิด Post-Trigger Delay โดยเมื่อ Trigger สัญญาณแล้ว Time Base จะถูกตั้งเป็น High Speed เพื่อแสดง Jitter ที่เกิดขึ้นโดยการ Delay Time ซึ่งมีความเที่ยงตรงมาจาก Crystal Controlled Digital Clock

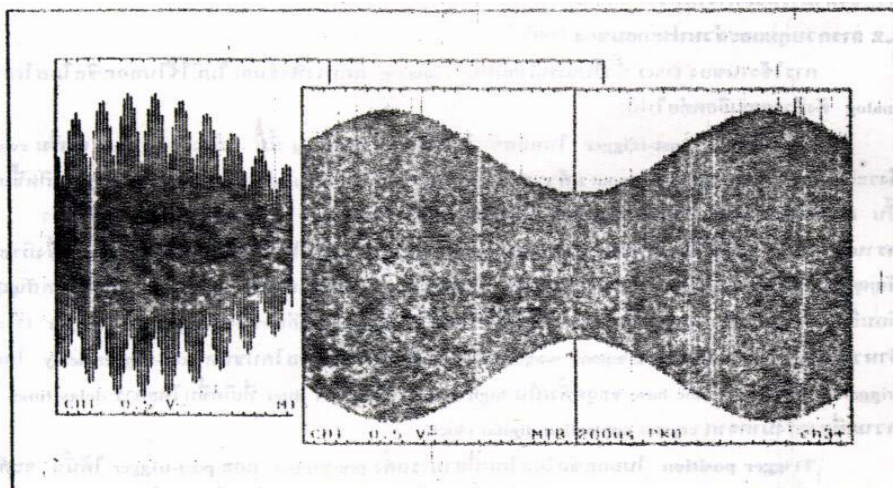
Trigger Position ในออสซิลโลสโคปที่สามารถตั้ง Pre-Trigger และ Post-Trigger ได้ นั้น จะต้องมีการกำหนดตำแหน่งของ Trigger เช่นกำหนดค่าโดยโปรแกรมไว้ล่วงหน้า ที่จุดเริ่มต้น กึ่งกลาง หรือ จุดสุดท้ายของสัญญาณ



รูปภาพที่ ๔-๒๕ แสดงรูป Sine Wave with Super-Imposed Glitch

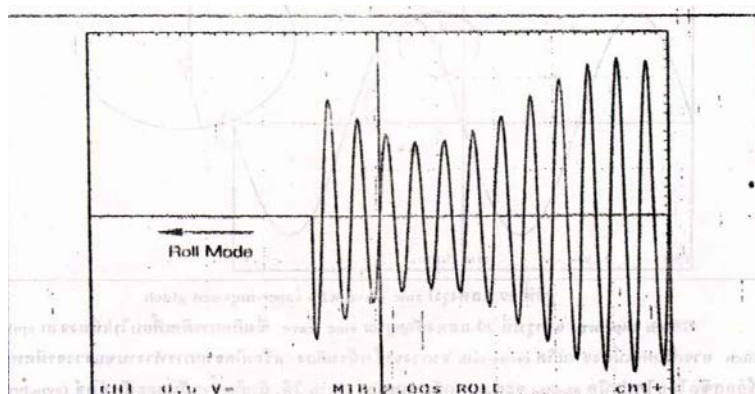
Glitch Capture จากรูปภาพที่ ๑๒ แสดงสัญญาณ Sine Wave ซึ่งเกิดการผิดเพี้ยนไปเนื่องจาก Spike หรือ Glitch อาจเป็นผลเนื่องจากเกิด Cross-Talk จากวงจรอื่นข้างเคียง หรือเกิดจากการทำงานของวงจรผิดพลาด การใช้ฮอสซิลโลสโคปชนิด Analog จะสามารถจับภาพของ Glitch ได้ ถ้าเกิดซ้ำ ๆ กัน และสัมพันธ์ (Synchronous) กับสัญญาณหลัก แต่โดยปกติจะตรวจจับไม่ได้ เนื่องจากมักจะไม่สัมพันธ์กับสัญญาณหลัก ฉะนั้นเราสามารถใช้ออสซิลโลสโคป

ชนิด DSO ในการตรวจจับได้โดยใช้วิธี Peak Detection ด้วยอัตราการสุมที่สูง นอกจากนี้ยังใช้วิธี Peak Detection กับการจับสัญญาณ A.M. (Amplitude Modulation) โดยใช้ Time Base ที่สัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณที่นำไป Modulate กับ Carrier



รูปภาพที่ ๔-๒๖ A.M. Signal

Roll Mode เป็นวิธีการแสดงภาพบนจอของสัญญาณความถี่ต่ำอย่างต่อเนื่อง โดยตัวอย่างที่สุมมาได้จะถูกบันทึก และแสดงบนจอภาพทันทีจากมุมมอง และเลื่อนไปมุมซ้ายของจอ ตามสัญญาณจริงที่เปลี่ยนแปลงไปคล้าย ๆ กับ Chart Recorder ซึ่งบันทึกสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ บนกระดาษบันทึก



รูปภาพที่ ๔-๒๗ Roll Mode

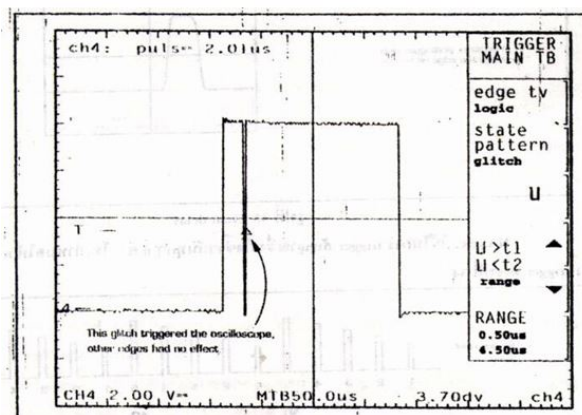
Display magnification ในออสซิลโลสโคปแบบ Analog จะสามารถขยาย Analog ได้ ๑๐ เท่า เพื่อชมภาพในช่วงเวลาแคบ ๆ ส่วนใน DSO นั้นสามารถขยายได้มากกว่าและในช่วงที่แคบกว่า ปกติการขยายภาพจะอยู่ในอัตราทวีคูณของ ๒ คือ ๒, ๔, ๘, ๑๖ เป็นต้น

Special Triggering เนื่องจาก DSO มีหน่วยความจำที่ใช้บันทึกรูปแบบสัญญาณ ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในการตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งเกิดเพียงครั้งเดียวหรือเกิดน้อยครั้งการจับสัญญาณเหล่านั้น ต้องการระบบ Trigger ที่เหมาะสม ซึ่งมีวิธีต่าง ๆ ดังนี้

Pattern Triggering ในวงจร Logic มักมีสัญญาณที่ส่งออกมาในลักษณะขนานกัน หลายเส้นสัญญาณและสถานะของสัญญาณที่ออกมานั้น จะมีค่าที่แสดงสถานะการทำงานของวงจร Logic นั้น ๆ ฉะนั้น การตรวจจับสัญญาณจึงต้องการ Pattern Triggering ทุกเส้นสัญญาณที่ตรวจวัด ตัวอย่างเช่นมี ๔ เส้นสัญญาณ อาจกำหนดรูปแบบของสัญญาณที่จะใช้ตรวจจับเพื่อ Triggering ได้เป็น “HHLH” โดยแต่ละเส้นสัญญาณสามารถกำหนดให้เป็น H,L หรือ X (don't care) ตามต้องการ

State Triggering เป็นการที่ใช้สถานะของ Input ที่วัดในลักษณะ Word เหมือน Pattern Triggering แต่มาจาก Input สัญญาณเดียวตามที่ได้โปรแกรมเครื่องวัดไว้

Glitch Triggering ในวงจรซึ่งออกแบบให้ทำงานในช่วงความถี่ DC ถึงความถี่ช่วงใด ๆ อาจถูกรบกวนด้วยสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า โดยการ Cross-Talk หรือ Transient ของสัญญาณที่มีกำลังสูง การจะตรวจจับสัญญาณดังกล่าวได้ต้อง Trigger ด้วย Pulse ที่เข้ามาแทรกนั้น ซึ่งอาจมีช่วงเวลาสั้นกว่าครึ่งรอบ (Cycle) ของความถี่สูงสุดของระบบดังกล่าว

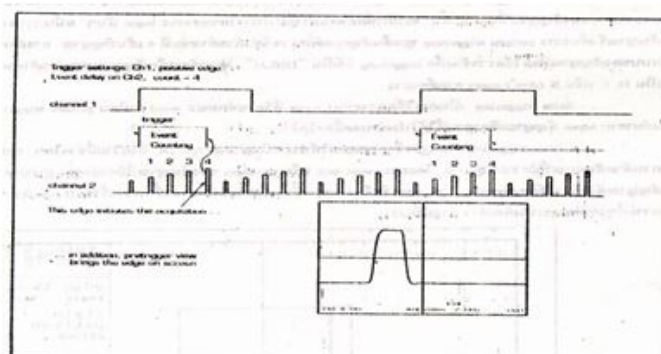


รูปภาพที่ ๔-๒๘ Glitch Triggering

นอกจากนี้ในงานด้าน Logic ซึ่งสัญญาณจะสัมพันธ์ (Synchronous) กับสัญญาณนาฬิกา แต่จะมีสัญญาณบางส่วนเกิดจากการรวมกันของสัญญาณอื่น ๆ ซึ่งมีช่วงเวลาต่างกัน ทำให้เกิดสัญญาณซึ่งมีช่วงเวลาที่ยาวกว่า ๑ รอบ (cycle) ของสัญญาณ Clock ขึ้น จึงต้องใช้การ Trigger ด้วย Glitch Triggering

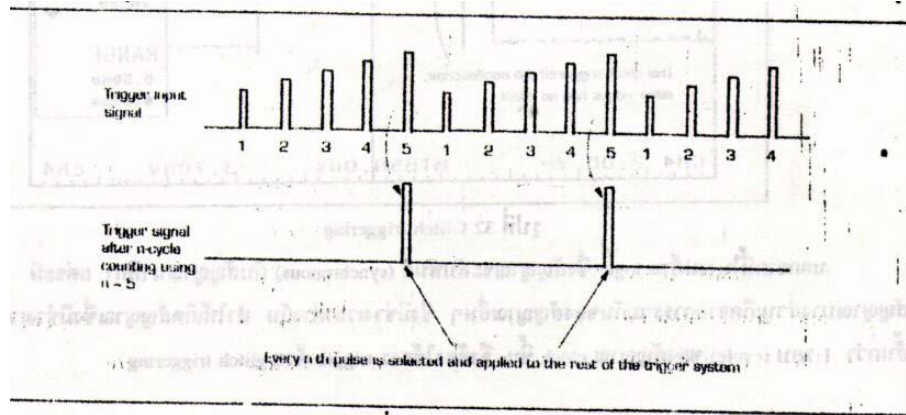
Time qualified Triggering เป็นการกำหนดเวลาในการ Trigger สัญญาณเป็นเวลาที่แน่นอน การ Trigger สัญญาณแบบนี้มีประโยชน์ในการหา interruption ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

Event Delay ใช้ในการ Trigger สัญญาณ Input หลายสัญญาณ สัญญาณที่ ๑ จะถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้น Trigger และหน่วงเวลาตามจำนวน cycle ของสัญญาณที่ ๒ เมื่อครบจำนวนจะเริ่มจับภาพของสัญญาณ



รูปภาพที่ ๔-๒๙ Event Delay

N-cycle ใช้ในการ Trigger สัญญาณซึ่งเกิดซ้ำ ๆ กันทุก ๆ n ค่า โดยกำหนดให้ n เป็นค่าที่ใช้นับในการ Trigger



รูปภาพที่ ๔-๓๐ N-cycle Triggering

Waveform Storage ภาพของสัญญาณที่แสดงบนจอ สามารถถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของเครื่อง (Register) ออสซิลโลสโคปแบบ DSO ได้ บางเครื่องจะมีความสามารถเก็บภาพบนจอ (Trace) ซึ่งประกอบด้วยหลายสัญญาณไว้แต่ละตำแหน่งของหน่วยความจำได้ถึง ๒๐๐ ภาพ บางรุ่นสามารถเก็บภาพของแต่ละสัญญาณ Input แยกจากกันได้ ช่วยทำให้การวิเคราะห์สัญญาณมีความสะดวกมาก รวมทั้งสามารถส่งข้อมูลไปยัง Computer เพื่อวิเคราะห์ในรายละเอียดต่อไปได้

Display Algorithm, Interpolation Dot Join ในการแสดงภาพของสัญญาณบนจอของออสซิลโลสโคปแบบ DSO นั้น จะเป็นการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่จากกลุ่มของค่าที่สุ่มตัวอย่างจากสัญญาณจริง และเก็บไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งวิธีการสร้างภาพดังกล่าวมีหลายวิธี วิธีที่ง่ายที่สุดคือการลากเส้นโยงระหว่างจุดต่าง ๆ ที่เป็นค่าที่สุ่มตัวอย่างมา เรียกว่า linear interpolation วิธีการสร้างภาพแบบนี้จะให้ภาพที่มีรายละเอียดเพียงพอเมื่อมีการสุ่มตัวอย่างมากพอ เช่น ๕๐ ตัวอย่างต่อ ๑ ช่องในแนวราบ แต่ถ้ามีการขยายภาพออกในแนวนอนจะทำให้จุดที่สุ่มมีระยะห่างมากขึ้น เป็นผลให้ภาพขาดความคม (Brightness) ฉะนั้นออสซิลโลสโคปจะทำการคำนวณค่าที่อยู่ระหว่างช่วงของค่าที่สุ่มตัวอย่างเพื่อแสดงภาพที่ต่อเนื่องของสัญญาณ แทนที่จะเป็นเส้นตรงระหว่างจุดที่สุ่มตัวอย่างทั้งสอง โดยใช้หลักการของ Sine Interpolation ซึ่งสามารถสร้างภาพของสัญญาณ Sine แม้ว่าจุดที่สุ่มตัวอย่างต่อช่องในแนวราบมา จะมีน้อยเกินไปก็ตาม ทั้งนี้สามารถที่จะตรวจสอบจุดของสัญญาณที่สุ่มค่ามาจริง ๆ ได้ โดยปิดการ interpolation ของเครื่อง ก็จะเป็นจุดสว่างที่แสดงระดับสัญญาณบนจอ

Windows Mode เป็นการแสดงภาพของสัญญาณที่วัดบนจอ เปรียบเทียบกับภาพที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ โดยแยกจอภาพที่แสดงภาพของสัญญาณออกจากกัน ใน Windows Mode นี้สามารถแยกจอภาพออกเป็น ๒ ส่วน หรือมากกว่าก็ได้ ขึ้นอยู่กับสัญญาณที่จะเปรียบเทียบ

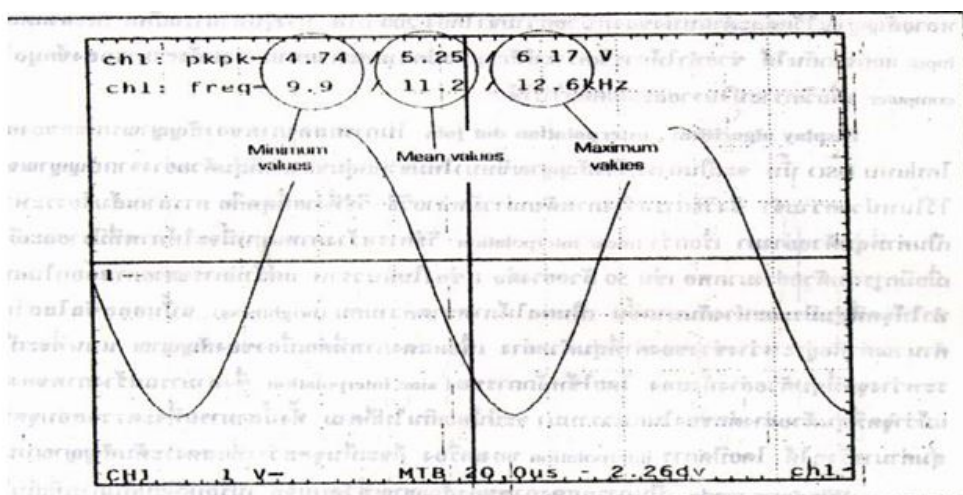
๔.๕ Automatic Measurements and Processing

Measurements ออสซิลโลสโคปถูกใช้ในการแสดงภาพสัญญาณ และวัดค่าต่าง ๆ ในสัญญาณนั้น เช่น ค่า peak-peak, ค่า RMS, ค่าความถี่, ค่าระดับ DC, Pulse width, rise time เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของค่าที่วัดสัญญาณต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถคำนวณได้จากวิธีทางคณิตศาสตร์ ดังจะได้อธิบายต่อไป

ในออสซิลโลสโคปชนิด Analog ผู้ใช้ต้องทำการวัดและบันทึกค่าด้วยตัวเอง (Manual) เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ต้องตรวจดูภาพสัญญาณซ้ำ ๆ กัน เพื่อนับช่องในแนวตั้งหาค่า Amplitude และนับช่องในแนวนอนเพื่อหาค่าช่วงเวลาของสัญญาณ และใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ช่วยให้ได้ผลการวัดตามที่ต้องการซึ่งการกระทำดังกล่าวจะใช้กับสัญญาณพื้นฐานเท่านั้น ส่วนสัญญาณที่มีความซับซ้อนมากขึ้น จะมีความลำบากในการหาค่าของสัญญาณมากขึ้น

ส่วนในออสซิลโลสโคปแบบ DSO จะแตกต่างกันไป กล่าวคือเมื่อทำการวัดสัญญาณ DSO ก็ จะทำการเก็บค่า และคำนวณผลให้โดยอัตโนมัติ .ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงได้ทันทีบนจอภาพ ออสซิลโลสโคป DSO ส่วนมากจะสามารถทำการวัดค่าต่าง ๆ ของสัญญาณได้มากกว่า ๒ ค่าในเวลาเดียวกัน ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบค่าของสัญญาณแต่ละช่องที่วัดได้ รวมทั้งกับสัญญาณมาตรฐานซึ่งเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องนอกจากนี้ยังมีการรวบรวมผลการวัดในรูปแบบสถิติ เช่น ค่าต่ำสุด, ค่าสูงสุด, ค่าเฉลี่ย เป็นต้น และแสดงผลของค่าเหล่านี้ได้ตามช่วงเวลาที่ต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องเฝ้าตรวจวัดค่าตลอดเวลา

เนื่องจากจากค่าที่ได้จากการวัดบน DSO จะเป็นค่าซึ่งได้จากหน่วยความจำ ซึ่งความละเอียดของผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับ การ setup เครื่อง เช่น ตั้งไว้ที่ time base ๕๐ nS/div. และวัดค่า rise time ซึ่งอยู่ในช่วง ๕๐-๑๐๐ nS. จะมีผลให้ค่าที่ได้มีความละเอียด และถูกต้องมากขึ้น



รูปภาพที่ ๔-๓๑ Statistical Format Measurement

Digital Processing ข้อมูลของสัญญาณที่ได้รับจากออสซิลโลสโคปแบบ DSO ทั่วไป จะเป็นค่า Voltage ในแนวตั้ง (Y) และ Time ในแนวนอน (X) เรียกว่า y-T mode ยังมีวิธีแสดงภาพในแบบอื่นอีกโดยใช้ค่าของสัญญาณหนึ่งในแนวตั้ง (Y) และอีกสัญญาณหนึ่งในแนวนอน (X) เรียกว่า X-Y Mode ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบดู Phase หรือ Frequency ของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งมีประโยชน์มากในงานทดสอบ Pulse Shifter และ Filter

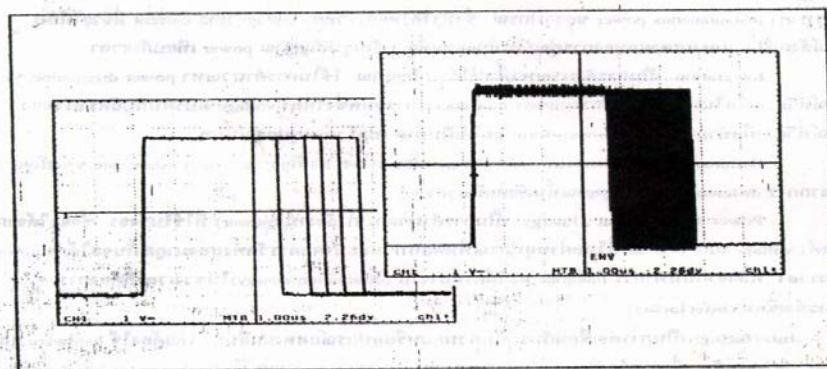
ข้อดีของ DSO ในการวัดแบบ X-Y mode ซึ่งดีกว่าแบบ Analog คือ จะสามารถใช้กับสัญญาณได้เต็ม Band Width ของเครื่อง แต่แบบ Analog จะมีขีดจำกัดด้านความถี่ ซึ่งในการคำนวณหาข้อมูลของสัญญาณทาง Digital นั้นมีหลายวิธีดังนี้

Averaging Increase The Resolution เป็นการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนรูปสัญญาณ โดยเฉลี่ยรวมค่าที่สุ่มตัวอย่างของสัญญาณที่จุดเดียวกันหลายครั้ง และคำนวณหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นค่าที่แสดงผลบนจอซึ่งจะทำให้รูปของสัญญาณที่แสดงมีความราบเรียบขึ้น แต่มีผลให้การแสดงผลของออสซิลโลสโคปช้าลงไปบ้าง ปกติ DSO ทั่วไป จะใช้ค่าความละเอียดในแนวตั้ง 8 bit ซึ่งจะแสดงได้ ๒๕๖ ค่า เพื่อเพิ่มความละเอียดของสัญญาณในแนวตั้ง จะต้องใช้วิธีการเฉลี่ยค่าที่สุ่มมาในแต่ละครั้ง ยิ่งมีค่าเฉลี่ยมากจะยิ่งเพิ่มความละเอียดยิ่งขึ้น

Envelope Mode สำหรับสัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น สัญญาณที่เกิด spike บนยอดรูปคลื่น การดูภาพโดย Envelope Mode จะทำการเก็บค่าต่ำสุดและสูงสุดของจุดที่สุ่มตัวอย่างมาในแต่ละ record และแสดงผลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาที่ตรวจจับดังรูปภาพที่ ๑๘

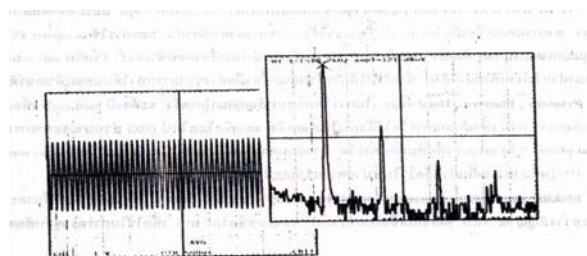
Digital Filtering เป็นการกรอง (Filter) สัญญาณรบกวนซึ่งเป็นผลให้ลด Bandwidth ของเครื่องด้วยวิธี Digital หรือเปรียบเทียบเสมือนมี low - Pass Filter ในวงจรของออสซิลโลสโคปแบบ Analog ซึ่งทำได้โดยการเฉลี่ยค่าที่สุ่มตัวอย่างกับค่าที่อยู่ข้างเคียงใน Record เดียวกัน ผลที่ได้จะทำให้สัญญาณรบกวนถูกลดลง

Waveform Comparison, Template Testing เป็นการนำสัญญาณที่บันทึกไว้เป็น Template มา แสดงเปรียบเทียบกับสัญญาณที่กำลังวัด เพื่อตรวจว่าสัญญาณที่กำลังวัดอยู่ผิดไปจากสัญญาณมาตรฐานที่บันทึกไว้หรือไม่ และแสดงผล Pass/Fail บนเครื่องออสซิลโลสโคปโดยอัตโนมัติ ซึ่งใช้ในการตรวจคุณภาพในการผลิต



รูปภาพที่ ๔-๓๒ Envelope Mode

FFT (Fast Fourier Transformation) เป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อแยกสัญญาณแต่ละความถี่ออกมาจากสัญญาณรวม และแสดงผลในรูป Amplitude ของแต่ละความถี่ของสัญญาณต่าง ๆ บนจอภาพดังรูปภาพที่ ๒๐ FFT ใช้สำหรับการหาความถี่ที่เกิดขึ้นและหาค่าความถี่ของสัญญาณต่าง ๆ ที่รวมอยู่ด้วยกันในสัญญาณรวม และการหา Cross - Talk ระหว่างสัญญาณต่าง ๆ ในระบบ



รูปภาพที่ ๔-๓๓ สัญญาณที่แสดงในรูป FFT

Multiplication of Waveforms สิ่งสำคัญในการแสดงผลของออสซิลโลสโคปแบบ DSO อีกอย่างหนึ่งคือ การนำผลของสัญญาณ ๒ สัญญาณที่วัดมาคูณกัน และได้ผลลัพธ์เป็นอีกสัญญาณหนึ่ง แสดงบนจอภาพเช่น การหาค่า Instantaneous Power ของอุปกรณ์ ซึ่งทำได้โดยการวัดค่า Voltage และ Current ที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ดังกล่าว และแสดงผลของการคูณของสัญญาณทั้ง ๒ เป็นรูปสัญญาณ Power เทียบกับเวลา

Integration เป็นการคำนวณหาพื้นที่ใต้รูปสัญญาณ ใช้ในการคำนวณหา Power Dissipation ของอุปกรณ์ที่วัด หรือในการทดสอบทางกลของ Transducer บางชนิดซึ่งให้ค่า Voltage แปรผันกับ อัตราเร่งของอุปกรณ์ที่วัด เมื่อทำการ Integrate Waveform จะได้เป็นค่าความเร็วของอุปกรณ์นั้น ๆ

Differentiation เป็นการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ เช่น ค่า Slew Rate ของสัญญาณ จะได้จากการ Differentiate รูปสัญญาณนั้นเทียบกับเวลา

Power Measurement, Energy เป็นการคำนวณหากำลังงาน (Power) ที่ใช้ในวงจร ซึ่งจะได้จากการวัดค่า Voltage และ Current ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่ทดสอบ และนำผลการวัดทั้งสองมาคูณกันจะได้ค่า Power ที่แต่ละเวลาหลังจากนั้นทำการ Integrate จะได้ค่าพลังงาน (Dissipation Energy) ในช่วงเวลาต้องการ

๔.๖ การต่อเชื่อม (Interfacing)

Interfacing เป็นการต่อเชื่อมกับระบบควบคุมหรืออุปกรณ์แสดงผลอื่น ๆ โดยต้องใช้ Hardware และ Software ประกอบกัน ซึ่งการต่อเชื่อมจะมีหลายแบบเช่น RS-232 และ GPIB (General purpose interface bus) หรือ IEEE-488 โดยทั่วไปออสซิลโลสโคปจะมีชุด interface ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ประกอบ (Option) ซึ่งแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

RS-232 เป็น Serial Interface ซึ่งมีใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ซีพียูอยู่แล้ว ฉะนั้นการที่ออสซิลโลสโคป มี RS-232 เป็นตัว Interface ก็จะทำให้สามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุม และแสดงผลได้ทันที โดยต้องมี Soft-Ware ช่วยในการทำงานดังกล่าวด้วย

CPIB หรือ IEEE-488 เป็น Parallel Bus ซึ่งออกแบบมาสำหรับระบบควบคุม และแสดงผล เครื่องมือวัดโดยตรง สามารถต่อเครื่องมือวัดบน Bus ดังกล่าวได้หลายชิ้นในเวลาเดียวกัน และการใช้ Computer PC ในการควบคุมแสดงผลบน Bus ดังกล่าว จะต้องมี GPIB Card เพิ่มเข้าในเครื่องคอมพิวเตอร์ ร่วมกับ Software ที่ ออกแบบมาสำหรับงานดังกล่าวด้วย ซึ่งจะทำให้การควบคุมเครื่องมือต่าง ๆ สามารถทำได้บนคอมพิวเตอร์ตัวเดียว

Printers, Plotters, Hard-Copy ในการวัดทดสอบสัญญาณบ่อยครั้ง จะต้องใช้ Hard Copy เพื่อแสดงผลการวัดดังกล่าว หรือ เพื่อเก็บผลการวัดไว้อ้างอิงในภายหลัง ออสซิลโลสโคป DSO ส่วนมากจะสามารถใช้กับ Digital Plotter หรือ Printer เพื่อพิมพ์ผลการวัด บางแบบสามารถพิมพ์ผลบนกระดาษเหมือน Chart Recorder โดยตรง บางรุ่นก็สามารถเก็บค่าที่วัดในหน่วยความจำและนำมาพิมพ์ผลในเวลาต่อมาภายหลัง

Making Single Shot Phenomena Repetitive นอกจากนี้ DSO ยังเหมาะที่จะใช้ร่วมกับเครื่องตรวจหัวใจ ซึ่งจะสร้างสัญญาณ ARB. ต่อเชื่อมเข้ากับภาค DAC ของออสซิลโลสโคป เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณดังกล่าว

๔.๗ ข้อควรระวังการบำรุงรักษา

ออสซิลโลสโคป เป็นเครื่องมือวัดที่มีประโยชน์ และมีราคาแพงมาก ก่อนที่จะนำไปใช้งาน ควรศึกษา หรือทำความเข้าใจถึงวิธีการใช้งาน จากคู่มือเสียก่อน เพื่อป้องกันความผิดพลาดซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ ข้อที่ควรระวังพอสรุปได้ดังนี้-

๔.๗.๑ LINE INPUT เมื่อใช้งานดูก่อนว่าออสซิลโลสโคปเครื่องนี้ใช้กับไฟ 0 หรือ 220 V.AC

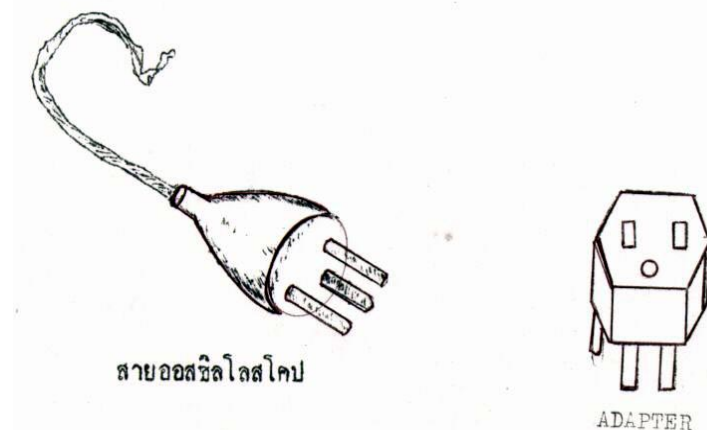
๔.๗.๒ ขนาดของ FUSE ควรใช้ให้ถูกต้องตามขนาดที่ได้กำหนดไว้ในตารางด้านหลังของเครื่องหรือในหนังสือคู่มือ

๔.๗.๓ INTENSITY ขณะใช้งานไม่ควรเพิ่ม INTENSITY มากเกินไป โดยเฉพาะในตำแหน่ง X-Y จะทำให้สารเรืองแสงที่เคลือบอยู่ภายในหลอด CRT. เสียหายได้

๔.๗.๔ INPUT CONNECTOR ห้ามป้อนสัญญาณที่มี AMPLITUDE สูงกว่าคู่มือกำหนด โดยเฉพาะ VERTICAL INPUT ในกรณีที่ไม่ทราบ AMPLITUDE ของสัญญาณที่จะวัด การตั้ง VOLT/DIV ไว้ในตำแหน่งสูงสุดก่อน

๔.๗.๕ ISOLATED GROUND โดยทั่วไปแล้ว ปลั๊กหรือสายเสียบของออสซิลโลสโคปจะมี ๓ ขา คือ HOT LINE, NEUTRAL และ GROUND เมื่อนำไปใช้กับไฟที่มี ๒ สาย (HOTLINE และ NEUTRAL) เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า จะต้อง ISOLATED GROUND เสียก่อน โดยการใช้ ADAPTER เพื่อป้องกันอันตรายอันเกิดจากความต่างศักย์ระหว่าง GROUND ของอุปกรณ์ไฟฟ้าและออสซิลโลสโคป

๔.๗.๖ เมื่อเลิกใช้งาน ควรทำความสะอาด ปิดฝาครอบให้เรียบร้อยและเก็บไว้ในสถานที่ที่เหมาะสม



รูปภาพที่ ๔-๓๔ รูปแสดง ADAPTER และสายออสซิลโลสโคป

บทที่ ๕

เครื่องนับความถี่

๕.๑ กล่าวทั่วไป

แม้ว่าในยุคนี้ จะมีวิธีการหลาย ๆ อย่างในการวัดความถี่ แต่มีเครื่องวัดชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า Electronic Counter ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายมาก ในการวัดความถี่ เพราะมีความรวดเร็ว และมีความเที่ยงตรงมาก เครื่องวัดความถี่ (Frequency Counter) หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็น Electronic Counter เพราะสามารถนับเหตุการณ์ทางไฟฟ้า เช่น Trigger, Pulses Electronic Counter นอกจากวัดความถี่ได้แล้ว ยังสามารถวัด Period, Ratio ระหว่างความถี่สัญญาณ ๒ สัญญาณ และวัด Time Interval ระหว่างเหตุการณ์ทางไฟฟ้า ๒ เหตุการณ์จุดมุ่งหมายของ Electronic counter ก็เพื่อที่จะนับจำนวนของเหตุการณ์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง

๕.๒ Time Base

ข้อพิจารณาอันดับแรกของอุปกรณ์เกี่ยวกับเครื่องวัด ก็คือตัวมาตรฐาน (Standard) ที่จะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งจะต้องมีความถูกต้อง และรักษาสภาพนี้ไว้ได้ตลอดช่วงเวลาที่ใช้งานในเมื่อเราต้องการจะวัดความถี่ เราก็จะต้องมีความถี่มาตรฐาน (Standard Frequency) เพื่อใช้สำหรับเป็นตัวเปรียบเทียบ ความถี่มาตรฐานที่ใช้ในเครื่องวัดความถี่ เราใช้ Crystal ที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ภายใน (Internal Temperature Controlled Crystal Oscillator) เครื่องวัดความถี่ส่วนมาก จะมีสัญญาณ External Oscillator เมื่อต้องการ Time-Base ที่มีความละเอียด ถูกต้องมากยิ่งขึ้นหรือถ้า Time Base ภายในเสีย

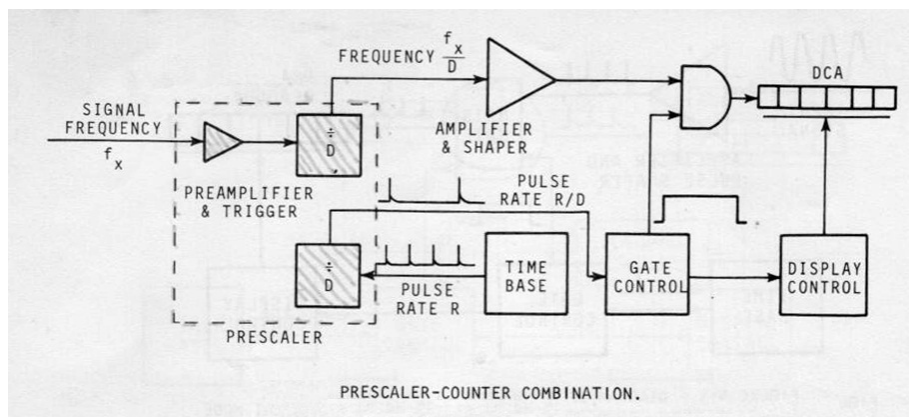
๕.๓ วิธีการวัดความถี่

การวัดความถี่แบ่งได้เป็น ๒ วิธี คือ

๕.๓.๑ การวัดความถี่แบบอ้อม (Indirect Method) การวัดความถี่แบบอ้อม (Indirect Method) ทำได้ ๓ วิธีคือ

การวัดแบบ Prescaling

การวัดแบบ Prescaling นี้ ความถี่ที่ต้องการวัดจะถูกหารให้ต่ำลง โดยตัวหารที่รู้ค่า แล้วส่งต่อไปยังชุด Counter และผลลัพธ์ที่แสดงออกมาไปคูณกับตัวหารที่รู้ค่า ก็จะได้รู้ความถี่ที่ต้องการวัด



รูปภาพที่ ๕-๑ การวัดความถี่แบบอ้อม

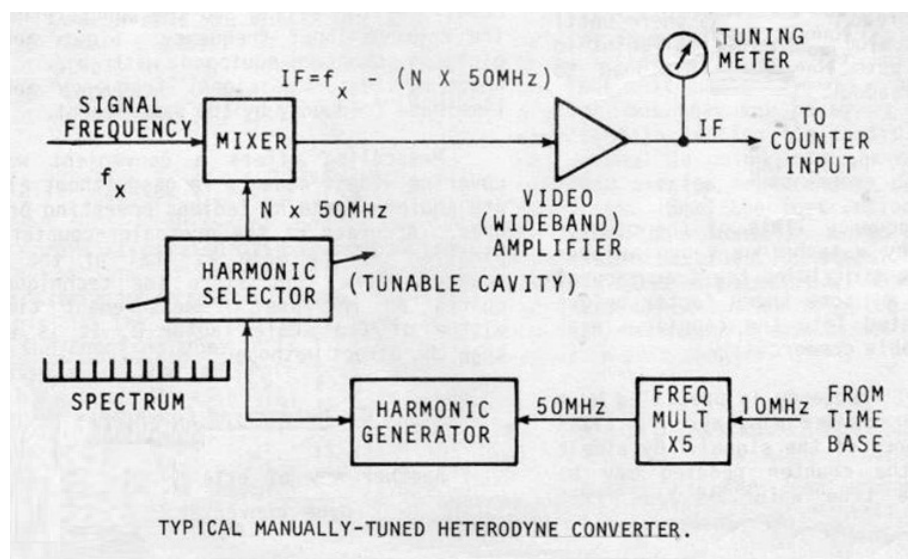
ตัวอย่างการวัด

สมมุติว่าต้องการวัดความถี่ซึ่งอยู่ในย่าน 200-300 MHz ด้วยเครื่องนับความถี่ (Frequency Counter) ที่สามารถวัดความถี่สูงสุดได้ 50 MHz ทำได้โดยการตั้งตัวหารไว้ที่ ๘ เพื่อที่จะลดความถี่ที่ต้องการวัดลงมาให้อยู่ในย่านความถี่ที่ Counter สามารถวัดได้ ถ้า Counter แสดงผลออกมา 35 MHz แสดงว่าความถี่ที่แท้จริงคือ $35 \times 8 = 280$ MHz

การวัดแบบเปลี่ยนความถี่ (Conversion Method)

จุดมุ่งหมายของการวัดแบบนี้ก็เหมือนกับแบบ Prescaling คือ เพื่อต้องการจะขยายย่านการวัดให้สูงขึ้น โดยใช้ Frequency Converter Plug-in ประกอบการวัด

วิธีการวัดแบบเปลี่ยนความถี่ก็คือ ลดสัญญาณที่ต้องการวัดลงโดยผสมสัญญาณที่รู้ค่าคือ สัญญาณ Time Base จะได้สัญญาณ IF ออกไป การทำงานเช่นเดียวกับเครื่องรับวิทยุ Super Heterodyne สัญญาณ IF. ที่ได้จากการผสมก็จะถูกส่งไปยังชุด Counter เพื่ออ่านค่าต่อไป



รูปภาพที่ ๕-๒ การวัดแบบเปลี่ยนความถี่

หลักการทำงาน เอาสัญญาณ 10 MHz จาก Time Base ไป Multiplied แล้วไปป้อนให้ชุด Heterodyne Generator ทำความถี่ออกมาหนึ่งชุดของ 50 MHz และ Tune Cavity เลือกเอา Harmonic เหล่านี้ไปใช้งาน โดยปกติจะเลือก Harmonic ที่ใกล้และต่ำกว่าสัญญาณที่ต้องการวัด

ตัวอย่างการวัด

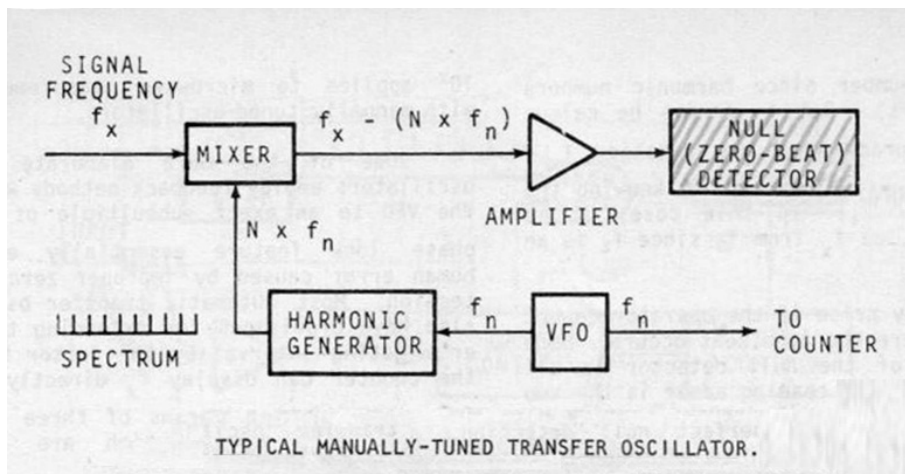
ป้อนความถี่ที่ต้องการวัด 225 MHz และ Tune Cavity ให้ใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการวัดและต่ำกว่า คือ Harmonic ที่ 5 ของ 50 MHz ซึ่งเท่ากับ 250 MHz จะทำให้ Meter อ่านค่า Maximum ของสัญญาณ IF. ได้เท่ากับ 5 MHz สัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปยังชุด Counter และแสดงผลออกมา 5 MHz เพราะฉะนั้นสัญญาณที่ต้องการเท่ากับ $(50 \times 5) + 5 = 255$ MHz

การวัดแบบเปรียบเทียบ (Comparison หรือ Transfer Oscillator)

การวัดแบบ Transfer Oscillator นี้สามารถวัดความถี่ได้สูงกว่าแบบ Prescaling Heterodyne Conversion โดยใช้ frequency converter plug-in หรือที่รู้จักกันว่า Transfer Oscillator

ส่วนประกอบของ Transfer Oscillator ประกอบด้วย V.F.O. (Variable Frequency Oscillator) Harmonic Generator, Mixer และ Null Detector การทำงานคล้ายกับ

Frequency Conversion หรือ Heterodyne Conversion คือสัญญาณความถี่ที่ต้องการวัดจะผสมกับสัญญาณเข้าที่พหุของ Heterodyne Generator โดยการปรับ V.F.O. เพื่อให้ Harmonic ใด Harmonic หนึ่งของ Harmonic Generator Match กับความถี่ที่ต้องการวัด ความถี่ที่ Match ก็จะไปแสดงผลที่ Null Detector ณ จุดที่ Null Detector, Counter ก็จะอ่านความถี่หนึ่งจาก V.F.O. ซึ่งกำหนดให้เป็น f_1 จากนั้นก็ปรับ V.F.O. ให้ Meter Null อีกครั้งหนึ่ง Counter ก็จะอ่านความถี่อีกความถี่หนึ่ง กำหนดให้เป็น f_2



รูปภาพที่ ๕-๓ การวัดแบบเปรียบเทียบ

เราสามารถหา Absolute Harmonic Number ได้ (ผลลัพธ์ไม่คิดเครื่องหมาย) จากสูตร

$$N = \frac{f_2}{|f_1 - f_2|}$$

เมื่อ N = Harmonic Number

f_1 = ความถี่ที่ Meter Null ครั้งแรก

f_2 = ความถี่ที่ Meter Null ครั้งที่สอง

เมื่อได้ Harmonic Number แล้วก็นำไปคูณกับ f_1 ก็จะได้ ความถี่ที่ต้องการวัด

ตัวอย่างการวัด

$f_1 = 88 \text{ MHz}$ และ $f_2 = 90 \text{ MHz}$ แทนค่าในสูตรได้

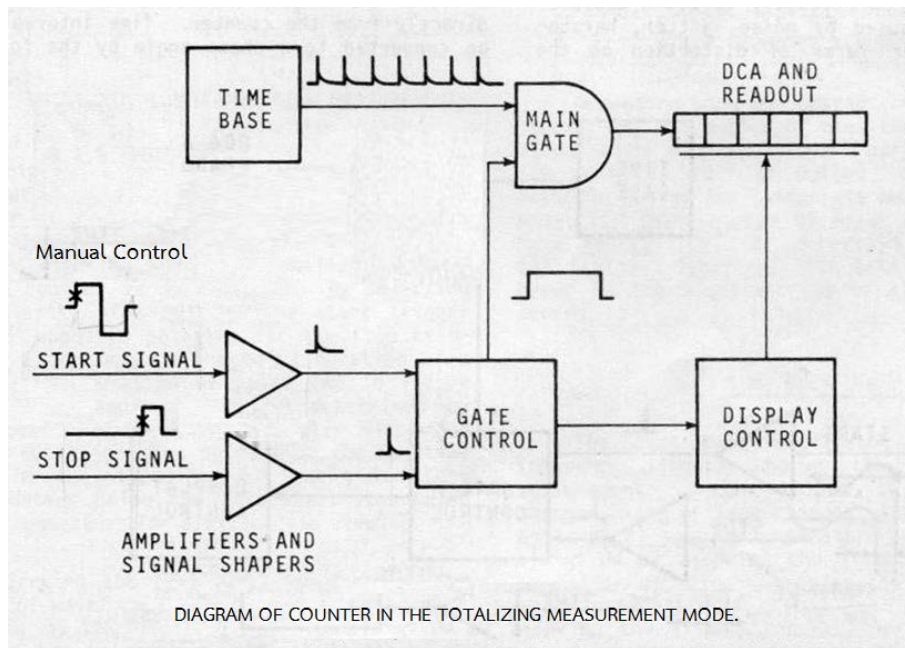
$$N = \frac{90}{|88 - 90|} = 45$$

ดังนั้น ความถี่ที่ต้องการวัด (f_x) คือ $45 \times 88 = 3,960 \text{ MHz}$

๕.๓.๒ วิธีการวัดความถี่โดยตรง (Direct Method) โดยการป้อนสัญญาณที่ไม่รู้ค่าเข้าไปในเครื่องวัดโดยวิธีการวัดโดยตรงนั้น สามารถจะนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น

๕.๓.๒.๑ Totalizing Function

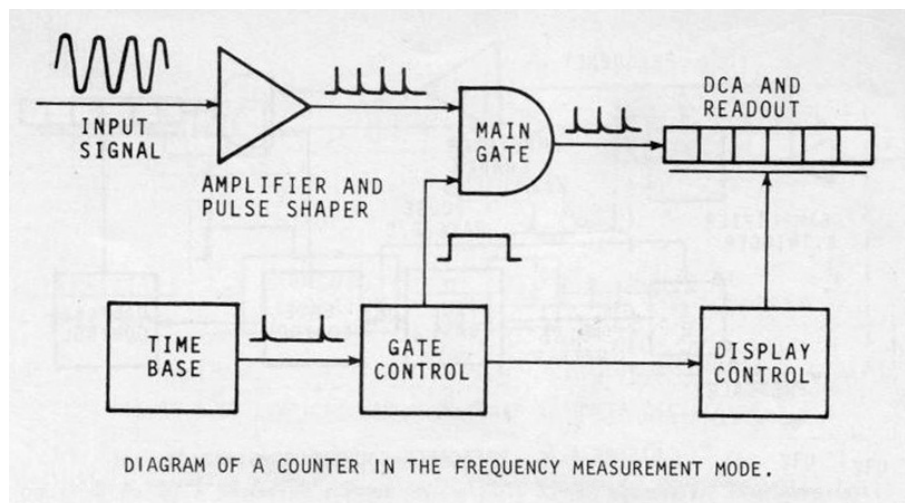
ในตำแหน่งนี้สัญญาณ Start จะป้อนเข้าที่ Input Control Gate ตามรูปซึ่งจะเป็นตัวคอยควบคุมสัญญาณที่จะนับ และปรากฏที่ Decimal Counter Assemblies (DCAS) เมื่อต้องการจะหยุดนับ ก็จะป้อนสัญญาณ Stop ซึ่งสัญญาณ Start-Stop นี้ ผู้ใช้งานจะเป็นผู้ควบคุมอยู่



รูปภาพที่ ๕-๔ Totalizing Function

๕.๓.๒.๒ Frequency Function

ตามรูปเป็น Block Diagram ของการวัดความถี่



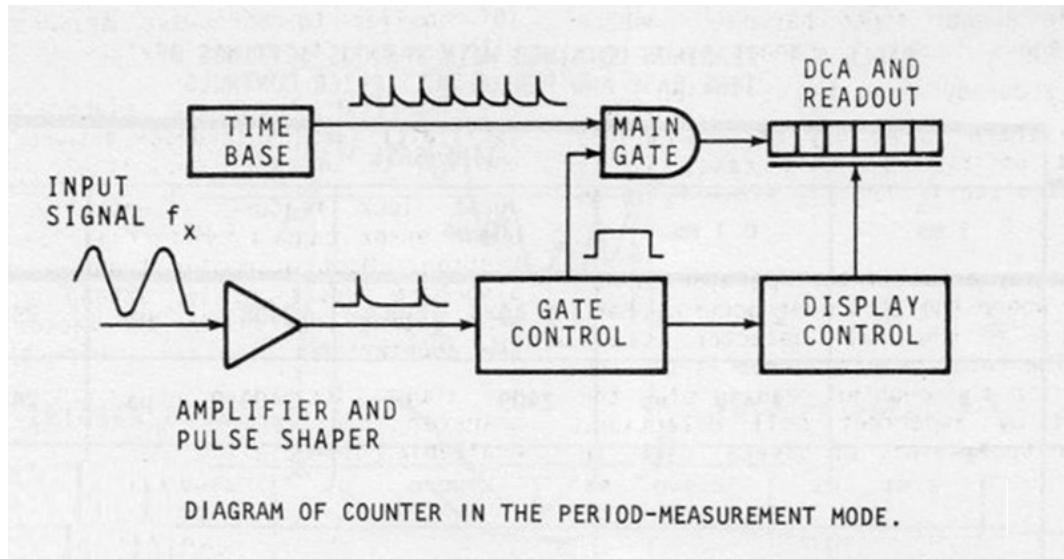
รูปภาพที่ ๕-๕ Frequency Function

ในตำแหน่งนี้ Internal Time Base เป็นตัวกำหนดค่า Time Interval ระหว่างสัญญาณ Start-Stop ช่วงเวลานี้จะมีค่าเท่ากับ 1 Period ของแต่ละสัญญาณ Time Base ซึ่งสัญญาณเลือกได้ โดยใช้สวิทช์ Time Base สัญญาณที่ต้องการจะวัดจะป้อนไปที่ Input โดยตรง

๕.๓.๒.๓ Period Function

เมื่อเราต้องการจะวัดความถี่ที่ต่ำ (น้อยกว่า 300 Hz) เราจะวัด Period แทนวัด Frequency เพื่อที่จะเพิ่มรายละเอียด (Resolution) ให้มากขึ้น

Period ของสัญญาณ ก็คือ เวลาของสัญญาณครบ ๑ วงรอบ (1 Cycle) ตามรูปการวัด Period กระทำได้โดย การควบคุม Counter Main Gate ด้วยสัญญาณ Input ที่จะวัด PERIOD FUNCTION

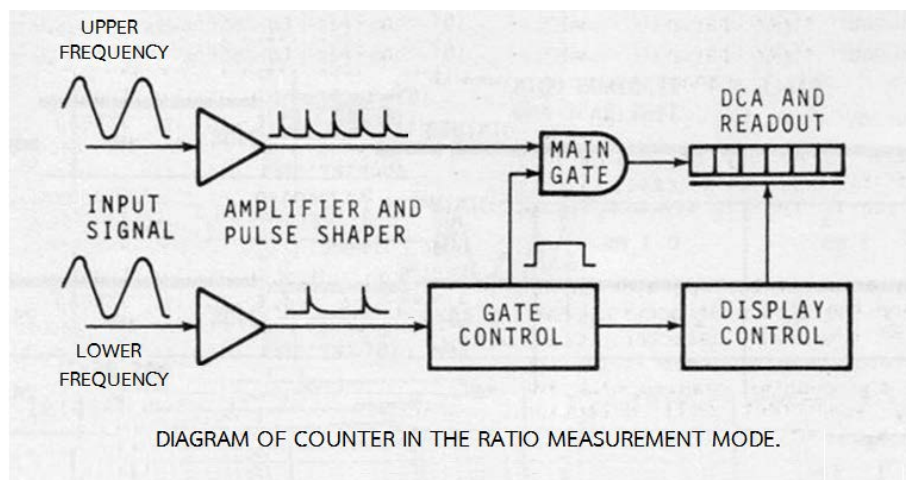


รูปภาพที่ ๕-๖ Period Function

การวัด Period จะเพิ่มรายละเอียด (Resolution) และจะลดเวลาใช้ในการวัดเมื่อเราต้องการจะวัดความถี่ที่มีค่าต่ำ ๆ

๕.๓.๒.๔ Ratio Function

คือการใช้พื้นฐานของการวัด Period นั้นเอง ในการวัดอัตราส่วน (Ratio) ของ Electronic Counter เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณ ที่มีความถี่ต่ำอันหนึ่งกับสัญญาณ ที่มีความถี่สูงอีกสัญญาณหนึ่ง และจะปรากฏอัตราส่วนที่หน้าปัด ของ counter



รูปภาพที่ ๕-๗ Ratio Function

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการวัด ratio ก็คือ ความถี่ที่ต่ำกว่า จะต้องต่อเข้ากับช่วงบน ดังรูปเพื่อควบคุม gate time counter จะอ่านออกมาเป็นอัตราส่วน และไม่มีหน่วย ถ้าเราสามารถทราบค่าความถี่อันหนึ่ง จะสามารถหาความถี่อีกอันหนึ่งได้ โดยใช้สูตร

$$\frac{f_1}{f_2} = C_i$$

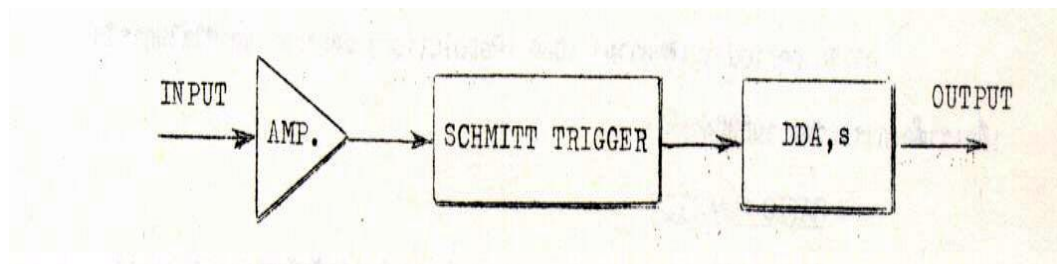
ซึ่ง f_1 = ความถี่ที่สูงกว่า..... Hz

f_2 = ความถี่ที่ต่ำกว่า..... Hz

C_i = Counter Indication...ไม่มีหน่วย

๕.๓.๒.๕ Scaler Function

ในตำแหน่งนี้ Input Freq. จะถูกแบ่งโดย Factor DF 10

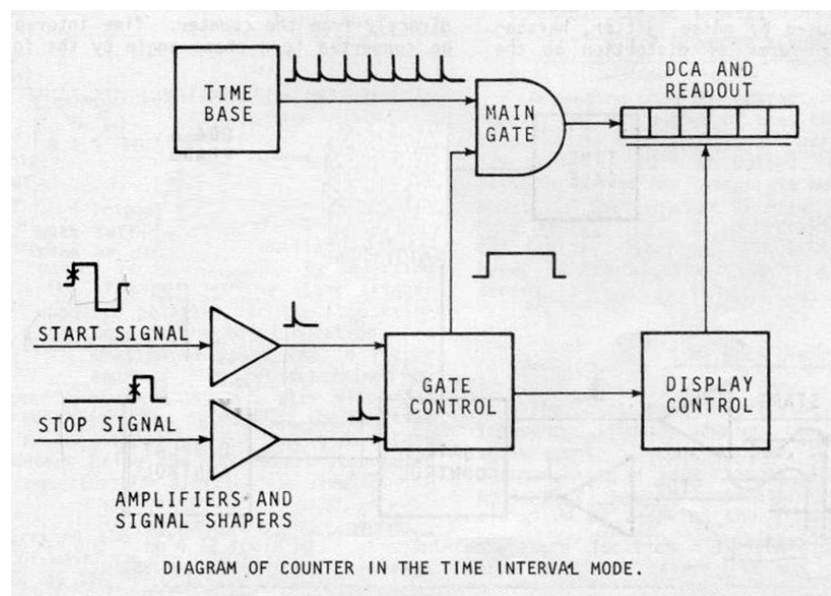


รูปภาพที่ ๕-๘ Scaler Function

Main Gate ของเครื่องจะเปิดในตำแหน่งนี้ และ Function Switch จะตั้งไว้ที่ตำแหน่ง "Manual Start" Mode Switch ที่ด้านหลังของเครื่องจะตั้งไว้ในตำแหน่ง Scaler Output จะออกมาจากด้านหลังของเครื่อง

๕.๓.๒.๖ Time Interval Function

การทำงานคล้ายกับตำแหน่ง Totalizing แต่ต่างกันตรงที่ Internal Time-Base จะถูกนับระหว่างช่วงเวลา ซึ่งจะกำหนดไว้จากสัญญาณที่ต่างกัน ๒ สัญญาณ สัญญาณหนึ่งจะใช้ start การนับ และอีกสัญญาณหนึ่งจะใช้ Stop การนับ



รูปภาพที่ ๕-๙ Time Interval Function

๕.๔ แหล่งที่มาของความผิดพลาดของเครื่องวัดความถี่

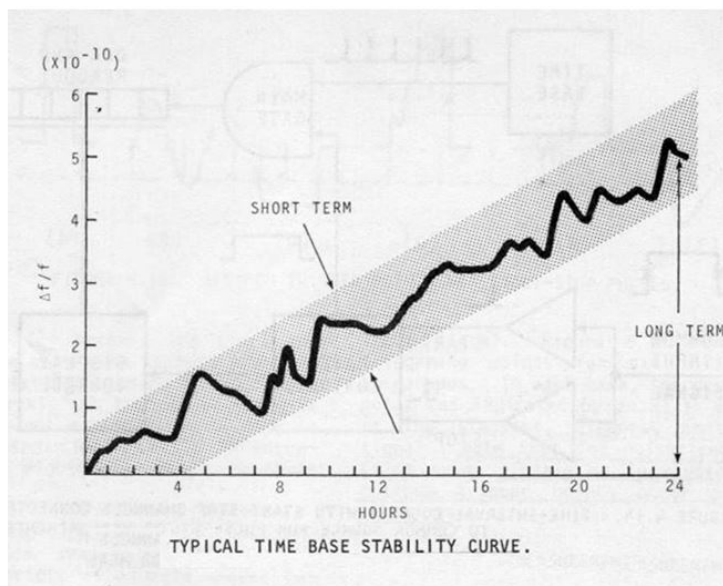
ความถูกต้องของเครื่องนับความถี่อยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องและวิธีการใช้งาน พิสัยหรือย่าน (Range) ค่าความถูกต้องจะอยู่ระหว่าง 1/100 ถึง 1/1010 หรือดีกว่านั้น แม้ว่าสาเหตุที่เป็นไปได้สำหรับการวัดที่ไม่ค่อยถูกต้องจะมาก แหล่งหลัก ๆ ของข้อผิดพลาด คือ ความไม่เสถียรของฐานเวลา ความไม่แน่นอนของเกท และความผิดพลาดในการกระตุ้นสัญญาณ ผลรวมของการวัดจะเกิดจากความผิดพลาดแต่ละชนิดรวมกัน ดังนี้

๕.๔.๑ Time Base Instability (Time Base Error)

แหล่งที่มาของความผิดพลาดของเครื่องนับความถี่มีความสัมพันธ์กับประเภท/ลักษณะการใช้งาน แหล่งของความผิดพลาดที่สำคัญที่สุดคือ ฐานเวลา (Time Base) ของเครื่องนับความถี่เอง ตัวออสซิลเลเตอร์ภายใน (Internal Crystal Controlled Oscillator) แบบคริสตัล ที่ควบคุมเวลาที่จะทำการนับสัญญาณหรือตัวมันเองที่ถูกนับและแสดงผล อาจจะ Drift หรืออายุการใช้งานมาก สำหรับผลการวัดที่ต้องการความถูกต้องสูง ตัวฐานเวลาที่ดีจะเป็นสิ่งจำเป็นและที่ขาดไม่ได้ บ่อยครั้งที่ความแตกต่างด้านราคาเครื่องนับความถี่ที่เหนือกว่าอีกตัวหนึ่งมักมาจากตัวออสซิลเลเตอร์ภายในนี้เอง เมื่อจ่ายมากย่อมได้ในสิ่งที่ดีกว่า ดังนั้น ศิษษารายละเอียดเฉพาะของฐานเวลาอย่างระมัดระวังเมื่อตัดสินใจซื้อ

ตัวออสซิลเลเตอร์ฐานเวลาจะเปลี่ยนค่าความถี่อย่างช้า ๆ ในช่วงการใช้งาน เนื่องผลจากการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า สัญญาณรบกวนภายใน และอายุการใช้งานของคริสตัล ผลจากอุณหภูมิสามารถทำให้ลดน้อยลงโดยการอบอุ่นเครื่อง (Warm Up) ก่อนใช้งาน และระหว่างใช้งานให้รักษาระดับอุณหภูมิสภาพแวดล้อมเครื่องนับความถี่ให้คงที่ ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางสายแวงไปมา ให้ต่อเครื่องนับความถี่กับแหล่งกำเนิดพลังงานจากตัวรักษาระดับแรงไฟฟ้า (Voltage Regulator)

สัญญาณรบกวนบางส่วนที่ถูกสร้างขึ้นภายในตัวออสซิลเลเตอร์ฐานเวลาจะผลิตค่าผิดพลาดทางเวลา (Jitter) ในความถี่ขาออกของมัน สิ่งนี้อาจจะเป็นสาเหตุการนับที่ผิดพลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการปฏิบัติในช่วงเวลาที่สั้น ๆ ในขณะที่การวัดเวลาใช้เวลานานขึ้น ค่าความผิดพลาดทางเวลาก็จะเป็นค่าเฉลี่ย ด้วยเหตุนี้ ค่าผิดพลาดทางเวลามักจะถูกเรียกว่า ความไม่เสถียรแบบ “ช่วงสั้น (Short-Term)” โดยทั่วไปกราฟของเสถียรภาพของฐานเวลาดังรูป เป็นที่น่าสังเกตว่า แกนตั้ง (Vertical Axis) ถูกกำหนดเป็น $\Delta f/f$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ F ซึ่งก็คือความถี่สัมพัทธ์ของฐานเวลา



เครื่องนับความถี่สมัยใหม่ ปริมาณของสัญญาณรบกวนจากออสซิลเลเตอร์ โดยทั่วไปแล้วจะน้อยมากจนกระทั่งค่าความไม่เสถียรช่วงสั้นจะถูกกำหนดเฉพาะกับเครื่องวัดที่ต้องการค่าความเที่ยงตรงเท่านั้น เมื่ออ่านรายละเอียดเฉพาะมันอาจจะเข้าใจว่าเวลาเฉลี่ยมีความสำคัญในการกำหนดให้เป็นความหมายที่แท้จริงของตัวเลขค่าความเสถียร เช่น เครื่องวิเคราะห์รูปรางคลื่นมี

ค่าความเสถียรที่กำหนดไว้เป็น 5×10^{-10} (Per Minute) จะให้ค่าสัญญาณรบกวนน้อยกว่า 1 ที่กำหนดไว้เป็น 5×10^{-9} (Per Second) ตัวเลขค่าความเสถียรจะมีความหมายอย่างสมบูรณ์แบบเมื่อค่าความเสถียรช่วงสั้นต้องถูกเปรียบเทียบสำหรับคาบเวลาเฉลี่ยเดียวกัน และในช่วงเวลา ๒-๓ วินาทีเท่านั้น

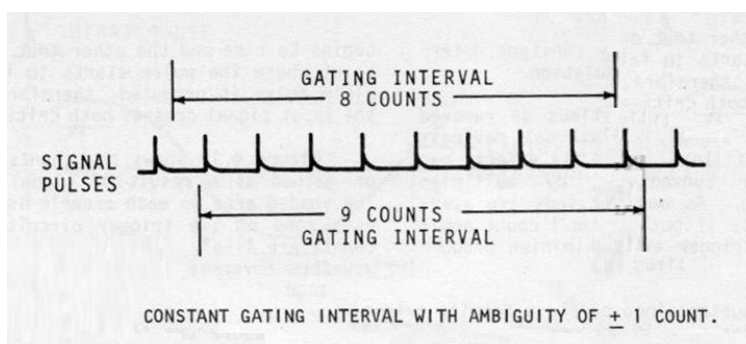
ค่าความเสถียร “ช่วงยาว (Long-Term)” หรืออีกนัยหนึ่งอ้างถึงความซ้ำสามารถทำนายได้เสมอถึงค่าแนวโน้มการออกนอกเส้นทาง (Drift) จากค่าความถี่เฉลี่ยของออสซิลเลเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงในคริสตอลอย่างสม่ำเสมอ การแสดงค่าแนวโน้มค่าอัตราการออกนอกเส้นทางโดยทั่วไปของ Quartz Crystal ที่ 10^{-10} ถึง 10^{-6} ต่อวัน เนื่องจากอายุการใช้งานของคริสตอล หลังจากอุ่นเครื่องช่วงเวลาสั้น ๆ เมื่อเริ่มต้นเปิดออสซิลเลเตอร์ครั้งแรกตัวคริสตอลคุณภาพสูงจะมีค่าอัตราการออกนอกเส้นทางความถี่ที่เป็นแนวตรง (Linear) ตามแนวความลาดเอียง (Slope) แสดงให้เห็นถึงอัตราการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานของคริสตอล

เนื่องจากอายุการใช้งานเป็นสิ่งสร้างค่าความผิดพลาดที่มากขึ้น ๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการสอบเทียบออสซิลเลเตอร์ซ้ำถ้าต้องการค่าความถูกต้องของฐานเวลา เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องสูงที่สุดต้องทำการการตรวจสอบค่าก่อนและหลังการวัดค่าคริสตอล อย่างไรก็ตามสำหรับเครื่องนับความถี่ที่มีราคาไม่สูงนัก เรื่องนี้อาจจะไม่มีประสิทธิภาพเมื่อนำมาใช้งานจริง

สำหรับการวัดที่ต้องการค่าความถูกต้องฐานเวลาที่ดีกว่าจากออสซิลเลเตอร์ภายในเครื่องนับความถี่เอง เราสามารถใช้แหล่งความถี่ที่มาจากภายนอกในการขับเคลื่อนตัวสร้างสัญญาณฐานเวลา ซึ่งเครื่องนับความถี่เองก็มีช่องต่อ (Connector) ที่สร้างเพิ่มเติมขึ้นมาเป็นส่วนถาวร (Built-in) และสวิทช์สำหรับใช้งานออสซิลเลเตอร์ภายนอก ออสซิลเลเตอร์ภายในจะถูกตัดออกจากวงจรโดยอัตโนมัติเมื่อสับสวิทช์ไปใช้แหล่งกำเนิดความถี่จากภายนอก

๕.๔.๒ Uncertain Gating (Gate Error)

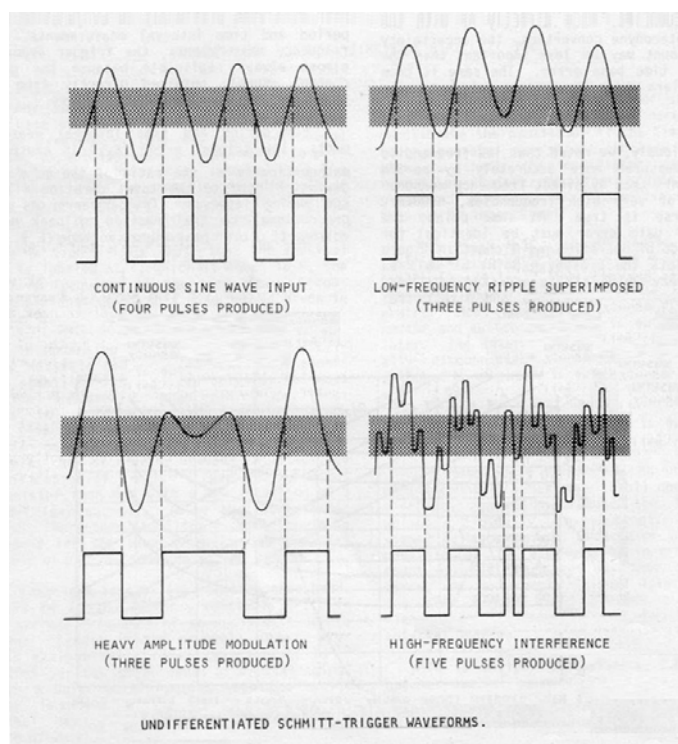
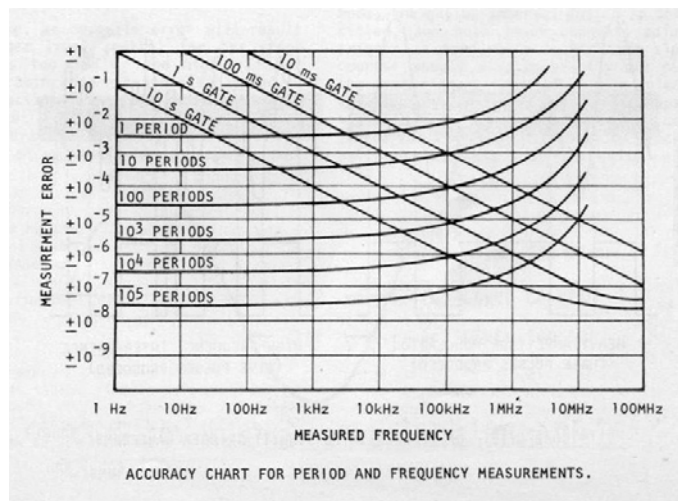
แหล่งความผิดพลาดที่ใหญ่ ๆ อีกแหล่งหนึ่งในเครื่องนับความถี่คือ ภาวะกำกวม ± 1 Count เมื่อตัวเกทหลัก (Main Gate) ทำหน้าที่เปิด-ปิดให้สัญญาณพัลส์ของความถี่เข้ามา ด้วยเหตุที่ตัวฐานเวลา (Time Base) ที่ขับเคลื่อนเกทหลักโดยไม่เกี่ยวข้องกับสัญญาณพัลส์ความถี่ขาเข้าเลย ไม่ว่าจะก่อนหรือหลังเวลาที่ตัวเกทหลักทำการเปิด-ปิดเกท ในขณะที่สัญญาณพัลส์ความถี่ขาเข้าได้ถูกส่งเข้ามาอย่างตลอดเวลาอยู่แล้ว ดังนั้น ถ้าเกทหลัก (Main Gate) ทำงานไม่ถูกต้อง ไม่เป็นจังหวะเดียวกัน (Synchronize) กับสัญญาณขาเข้า ไม่สอดคล้องกันหรือพร้อมกันระหว่างสัญญาณที่ถูกนับกับการเปิด-ปิดเกทหลักแล้ว จะบางครั้งอาจส่งผลให้เกิดการนับที่เพิ่มขึ้นหรือบางเวลาการนับจะน้อยลง 1 Count ค่าความผิดพลาดนี้จะเกิดที่ตัวเลขหลักสุดท้าย (LSD : Least Significant Digit) ส่งผลที่ภาคแสดงผลให้เกิดภาวะกำกวม ± 1 Count ถ้าคำตอบที่ถูกเป็น 100.8 อ่านจะเห็นผลที่ภาคแสดงผลเป็น 100 หรือ 101 ในบางเวลา



เทคนิคที่ใช้กับการแก้ปัญหาในคู่มือการใช้งานเครื่องนับความถี่ หรือในหมายเหตุเหตุการณ์ประยุกต์ใช้งานจากโรงงานผู้ผลิต แม้ว่าจะเกิดการนับที่เพิ่ม (Extra Count) ขึ้น 1 Count สำหรับสัญญาณขนาด ๑๐ ล้านลูกคลื่น (10^7) จะไม่มีนัยสำคัญ แต่ 1 Count เดียวกันนี้จะกลายเป็นเรื่องที่สำคัญที่ภาคแสดงผล ถ้าเป็นสัญญาณความถี่ขนาด ๑๐๐ ลูกคลื่น

๕.๔.๓ Faulty Triggering (Trigger Error)

แหล่งความผิดพลาดใหญ่อันดับ ๓ ในการใช้เครื่องนับความถี่แบบดิจิทัล ผลพวงจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มากับสัญญาณขาเข้าหรือจากการตั้งค่าการควบคุม มันง่ายต่อการแก้ไขให้หยุดนิ่งหรือหมดไปการระมัดระวังความถี่ให้เครื่องนับความถี่แสดงผลที่ชัดเจน ด้วยการใส่ใจกับการตั้งค่าการควบคุมที่เราป้อนสัญญาณลักษณะใดให้เครื่องนับความถี่ การวัดที่ต้องการความถูกต้องและเที่ยงตรงต้องใช้ความใส่ใจและตั้งใจ อ่านคู่มือการใช้งานอย่างระมัดระวังและรู้ว่ากำลังจะทำการวัดสิ่งใด บ่อยครั้งที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดให้ใช้เครื่องวิเคราะห์รูปร่างคลื่น (Oscilloscope) ไปพร้อม ๆ กับเครื่องนับความถี่ ซึ่งด้วยวิธีนี้จะทำให้รู้ว่ากำลังเกิดอะไรขึ้น



จะเห็นว่าในปัจจุบันนี้ เครื่องวัดความถี่ได้พัฒนาขึ้นมา สามารถวัดได้ สะดวก รวดเร็ว เพียงตรง และแน่นอน ซึ่งจะสามารถอ่านออกมาจากตัวเลขบนหน้าปัด โดยตรง ไม่เหมือนกับสมัยก่อนซึ่งสมัยนั้นยังต้องใช้ระบบ Super-Heterodyne คือ การนำความถี่ที่ต้องการจะวัดมา Beat กับความถี่ของเครื่องวัดความถี่ และฟังเสียง Zero-Base จากหูฟัง ซึ่งยุ่งยาก และเสียเวลามาก การใช้เครื่องวัดความถี่ จะวัดได้ถูกต้อง ก็ขึ้นอยู่กับสัญญาณ Gate Time ซึ่งได้มาจาก ชุด Oscillator ของ Time Base ฉะนั้นความถี่ Oscillator นี้ต้องมีความคงที่ และถูกต้องตั้งนั้นก่อน จะใช้งาน จะต้องใช้เวลา Warm Up เพื่อให้ความถี่ของ Oscillator คงที่และถูกต้องจะทำให้การวัดได้ถูกต้องแน่นอน

บทที่ ๖ เครื่องวัดความถี่ไมโครเวฟ

๖.๑ กล่าวทั่วไป

นับตั้งแต่หลังสงครามโลกครั้งที่ ๒ การใช้ความถี่วิทยุ เริ่มมีปัญหาเนื่องจาก เครื่องวิทยุ มีจำนวนมากขึ้น และผู้ใช้วิทยุก็มีจำนวนมากเช่นเดียวกัน ทำให้เกิดการรบกวนระหว่างช่อง Channel การแก้ปัญหานี้ได้โดยแบ่งย่านความถี่ใช้งานเฉพาะลงไป นับว่าได้ผลดี แต่ก็ยังมีปัญหา ตามมาเนื่องจากเครื่องวิทยุพัฒนามากขึ้น ทำงานได้ดีขึ้น และต้องการข้อมูล หรือรายละเอียดมากขึ้น นั่นคือ วิทยุต้องการ Band Width กว้างขึ้น ด้วยสาเหตุนี้เอง ความถี่ย่านไมโครเวฟ จึงถูกนำมา ตอบสนองกับความต้องการ เนื่องจากในความถี่ย่านไมโครเวฟสามารถบรรจุข่าวสารลงใน Band Width ได้มากกว่าความถี่ต่ำ ปัจจุบันนี้เราใช้ความถี่ไมโครเวฟกันอย่างกว้างขวาง เช่น การสื่อสาร ผ่านดาวเทียม, เครื่องช่วยการเดินอากาศ, เรดาร์, เตาอบไมโครเวฟ และอื่น ๆ อีกมากมาย

๖.๒ ช่วงความถี่ไมโครเวฟ

ความถี่ที่นับเป็นความถี่ไมโครเวฟ เริ่มต้นตั้งแต่ประมาณ 1,000 MHz ขึ้นไป และ สิ้นสุดลงที่ความยาวคลื่นของความถี่วิทยุเท่ากับความยาวคลื่นแสง

๖.๓ การวิเคราะห์สัญญาณความถี่ไมโครเวฟ

จากการที่เรามีวิทยุที่ใช้ความถี่ไมโครเวฟอยู่มากมาย ในเวลาที่วิทยุเหล่านั้นเสีย เรา จะต้องซ่อมปรับแต่งใหม่ เราจึงต้องมีเครื่องวัดประกอบการซ่อม หรือการปรับแต่ง ซึ่งในการ วิเคราะห์สัญญาณความถี่ไมโครเวฟนี้ เราจะต้องรู้ในเรื่องใหญ่ ๆ ๓ ประการ คือ

๖.๓.๑ ระดับพลังงาน (Power level)

๖.๓.๒ ความถี่ (Frequency)

๖.๓.๓ คุณลักษณะของสัญญาณ (Spectrum Analysis)

จาก ๓ หัวข้อดังกล่าว ถ้าเราสามารถวัดทุกข้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก็จะเป็น ประโยชน์อย่างยิ่งในการซ่อมบำรุง หรือปรับแต่งอุปกรณ์วิทยุย่านความถี่ไมโครเวฟ

๖.๔ เครื่องวัดพลังงานไมโครเวฟ (Power Meter)

Power Output ของเครื่องวิทยุ เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องรู้ Power Meter คืออุปกรณ์ที่ใช้ วัด Power Output ของเครื่องวิทยุย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งหน่วยของการวัดจะมีค่าเป็น Milliwatt หรือ dBm ขึ้นอยู่กับแบบของ Power Meter นั้น ๆ สำหรับพลังงานที่เราจะวัดนั้นจะมี อยู่ ๒ ชนิด คือ

๖.๔.๑ พลังงานเฉลี่ย (Average Power)

๖.๔.๒ พลังงานสูงสุด (Peak Power)

เนื่องจากทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกัน ดังนั้นเวลาที่จะทำการวัดจึงต้องเลือก Meter ให้ถูกจุดประสงค์ว่าเราต้องการจะวัด Peak Power หรือ Average Power

สำหรับ Peak Power Meter ที่มีใช้กันมากใน ทอ.ของเรา คือ MOD 8900B Power Meter รุ่นนี้มีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

- ความถี่ใช้งานอยู่ระหว่าง 50 MHz ถึง 2,000 MHz
- ย่านการวัด 10 mW ถึง 200 mW
- ความแม่นยำ ± 1.5 dB

แต่เนื่องจากตัว Power Meter MOD 8900B สามารถวัดได้สูงสุดเพียง 200 mW ดังนั้นถ้าเราต้องการจะวัดระดับพลังงานที่สูงกว่านี้ เราจะต้องต่อลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ตามค่าที่กำหนดให้จากตาราง

| Attenuation | F.S. Watts | F.S dBm |
|-------------|------------|---------|
| 0 dB | 200 (mW) | +23 |
| 10 dB | 2 | +33 |
| 20 dB | 20 | +43 |
| 30 dB | 200 | +53 |
| 40 dB | 2000 | +63 |

ตารางที่ ๖-๑ การลดทอนสัญญาณของ Attenuator

นอกจาก Peak Power Meter รุ่น 8900B แล้วยังมี Power Meter แบบวัดค่า Peak Power อีกสองรุ่น แต่มีใช้กันน้อย ได้แก่ รุ่น MOD 400 และ MOD 1018B

Average Power Meter ใน ทอ.มีหลายรุ่นด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดขณะนี้ คือแบบ MOD 432A ซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ ดังต่อไปนี้คือ

- ความถี่ใช้งาน 10 MHz ถึง 18 GHz
- ย่านการวัด 300 W ถึง 10 mW.
- ความแม่นยำ ± 2 %

นอกจาก Average Power Meter รุ่นนี้แล้ว ยังมีรุ่นอื่นอีกต่อไปนี้ MOD 430, MOD 431B, MOD 435A, MOD 436A ข้อควรระวังในการใช้ Average Power Meter ก็คือ ต้องไม่ป้อน Power เกินขนาดที่กำหนดให้แก่หัววัด เพราะจะทำให้หัววัด (Thermister Mount) ชำรุดได้

๖.๕ เครื่องวัดความถี่ (Frequency Meter)

ในหลาย ๆ ขั้นตอนของการ Calibrate อุปกรณ์ไมโครเวฟ เรามีวิธีการวัดความถี่เบื้องต้นอยู่ ๒ วิธีด้วยกัน คือ

๖.๕.๑ การวัดความถี่โดยตรง วิธีนี้จะให้ความแม่นยำสูงมาก เพราะเราวัดความถี่โดยตรง

๖.๕.๒ การวัดความถี่โดยอ้อม วัดความยาวคลื่นของความถี่แล้วมา คำนวณออกเป็นความถี่โดยสูตร

$$fo = \frac{Vo}{\lambda o}$$

วิธีที่สองนี้ เป็นการวัดความถี่โดยอ้อม ซึ่งความแม่นยำจะน้อยกว่าวิธีหนึ่ง เนื่องจากหลายเหตุผลคือเราไม่สามารถรู้อัตราเร่งของพลังงานในอากาศได้อย่างแน่นอน การวัดความยาวคลื่นต้องใช้อุปกรณ์ทางกลในการวัด ซึ่งให้รายละเอียดน้อยเกินไป, อัตราเร่งของพลังงานที่เดินทางเปลี่ยนแปลงไปตาม Dielectric Constants

ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่เราต้องการวัดความถี่อย่างละเอียด แม่นยำ เราจะต้องใช้วิธี Comparison Method ซึ่งวิธีนี้ คือการเปรียบเทียบความถี่ Unknown และความถี่ Standard

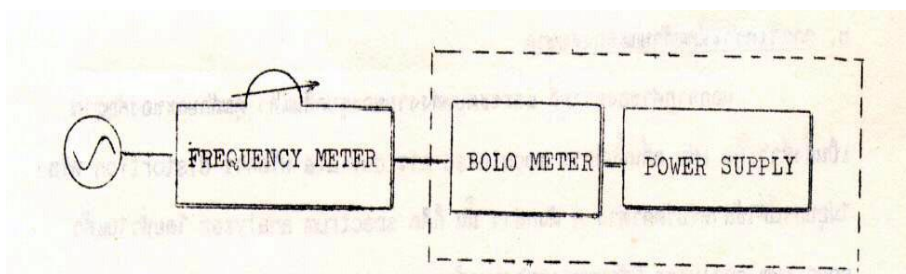
เมื่อความถี่ของ STD. อยู่ห่างจากความถี่ Unknown มาก เราก็จะใช้ Intermediate Comparison Oscillator เข้าช่วยในการทำให้เกิด Beat ของความถี่ขึ้น ทั้งนี้เราสามารถใส่สูตรคำนวณหาค่าความถี่ โดยใช้ Transfer Oscillator การใช้ Transfer Oscillator หาค่าความถี่เป็นวิธี Indirect Frequency Comparison ซึ่งต่างจาก Frequency Comparison ธรรมดา เพราะมันเป็นวิธี Direct Method

เมื่อใดที่เราต้องการวัดความถี่โดย ไม่ต้องการความแม่นยำสูง เราจะใช้ Passive Frequency Measurement Techniques วิธีนี้ก็คือการใช้ Wave Meter ทั้งแบบ Transmission และ Absorption Wave Meters ทั้งสองวิธีที่กล่าวมานี้ ก็คือการใช้ Wave Meter ที่มี Cylindrical Resonant Cavity เป็นอุปกรณ์กำหนดความถี่ ค่า "Q" ของ Cylindrical Cavity นี้ Q มีค่าสูงมาก ประมาณ ๑๐,๐๐๐ ซึ่งผลก็คือ จะมี High Resolution และ Selectivity ดีมาก

๖.๕.๓ CAVITY METHODS

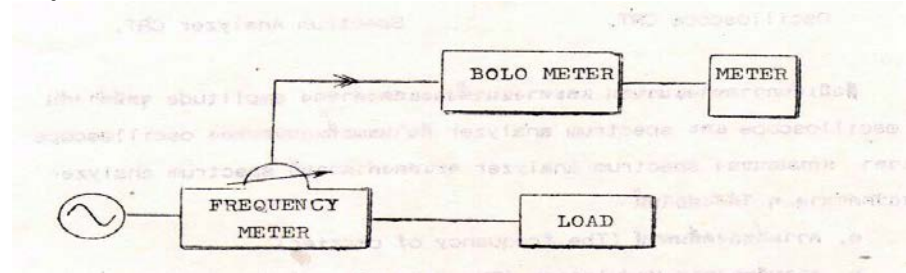
วิธีการใช้ Cavity Absorption วัดความถี่นี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด มีความแม่นยำดี ประมาณ 0.08% ถ้าหากเราใช้ Wave Meter, HP-X532A ซึ่งปัจจุบันเรามีใช้อยู่ใน PMEL

หลักการทำงานของ Cavity Methods แบบ Absorption Cavity ก็คือการต่อ Wave Meter Serie เข้ากับ Source และต่อ Power Meter เข้ากับปลายอีกด้านหนึ่งของ Wave Meter เมื่อเราป้อนความถี่ ที่จะวัดเข้าไปใน Wave Meter, Wave Meter จะแสดงค่าเป็นเหมือน Series Resonant ต่อ Line ซึ่งจะยอมให้พลังงานผ่านเข้าไปใน Cavity ได้ผล ก็คือ จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปบริเวณผนังของ Cavity เมื่อเรา Tune Absorption Cavity ไป Resonant กับ ความถี่ที่ป้อนเข้ามา จะทำให้เกิดการลดพลังงานที่ออกจาก Wave Meter เนื่องจากมีพลังงานย้อนกลับ มาจาก Cavity ซึ่ง Out of Phase กับสัญญาณที่ป้อนเข้ามา ทำการหักล้างกันเอง ณ จุดที่พลังงานต่ำสุด นี้เราจะอ่านค่าความถี่ตัว Wave Meter ได้เลย



รูปภาพที่ ๖-๑ Absorption cavity connection for frequency measurement

การวัดแบบ Transmission Method นี้ จะมีวิธีการตรงที่เอา Coupling Loop ใส่เข้าไปใน Cavity ส่วนการต่อทุกอย่างก็เหมือนเดิม ต่างกันตรงที่ Power Meter ต่ออยู่ที่ Coupling Loop และ Load ต่ออยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของ Wave Meter วิธีการอ่าน จะอ่านตรงที่ Power เริ่มสูงสุด เพราะที่ความถี่ Resonant Power จะผ่านเข้าไปใน Cavity ได้มากที่สุด



รูปภาพที่ ๖-๒ Transmission Type Wave Meter

๖.๕.๔ HP-X532A, Frequency Meter

Wave Meter รุ่นนี้ เป็นชนิด Absorption Cavity Type มีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 8.2 ถึง 12.4 GHz. ซึ่งจะให้ความแม่นยำ + 0.08 Percent เพราะ Q ของ Wave Meter มีค่าสูงมากถึง ๑๐,๐๐๐ ทำให้มี Resolution ดีตลอดช่วงความถี่

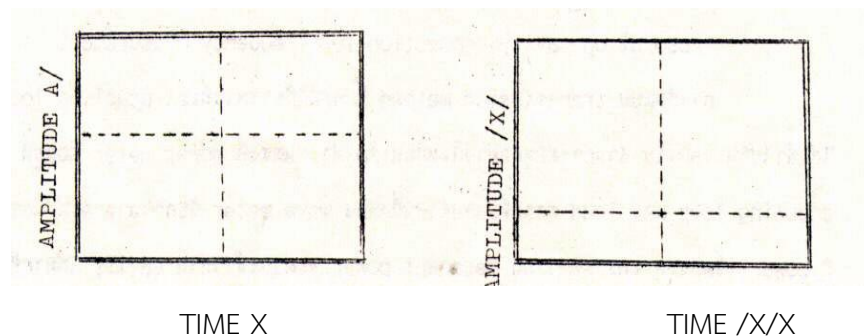
เมื่อจะใช้ HP-X532A ต้องระมัดระวังขณะ Tune เพราะว่ามันมี Q สูงกว่า โอกาสที่จะหมนเลยจุด Resonant ไปได้จึงมีมาก ดังนั้นเวลาหมน Wave Meter ต้องทำอย่างช้า ๆ และระมัดระวังมาก

๖.๕.๕ สิ่งที่จะทำให้เกิดการผิดพลาดของ Wave Meter

มีอยู่ ๒ ประการคือ อุณหภูมิขณะใช้งานและความชื้นของห้องที่ใช้งาน อุณหภูมิใช้งานถ้าผิดไปจากอุณหภูมิห้องที่ Calibrate จะทำให้อ่านผิดไป การที่มีความชื้นมาก ก็จะทำให้การอ่านต่ำกว่าปกติ การป้อน Power สูงเกินไป จะทำให้การอ่านผิดพลาดได้

๖.๖ การวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณ

นอกจากค่าของความถี่ และระดับพลังงานของรูปคลื่นแล้ว คุณลักษณะของสัญญาณ เป็นสิ่งที่จำเป็น เช่น คลื่นนั้นมีการ Modulated การ Deviate หรือการ Distortion หรือมีอุปกรณที่ใช้สำหรับวัดค่าต่าง ๆ ดังกล่าว นั้น ก็คือ Spectrum Analyzer โดยทั่วไปแล้ว Spectrum Analyzer มีลักษณะการทำงานคล้าย Oscilloscope



รูปภาพที่ ๖-๓ Oscilloscope CRT. Spectrum Analyzer CRT.

คือมีเส้นกวาดทางแนวนอน และทางแนวตั้งจะแสดงค่าของ Amplitude จุดที่ต่างกัน ระหว่าง Oscilloscope และ Spectrum Analyzer คือในขณะที่แกนของ Oscilloscope แสดงค่าเวลา แกนของ Spectrum Analyzer จะแสดงค่าความถี่ Spectrum Analyzer จะสามารถวัดค่าต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

ความถี่ของคลื่นพาห้ (The Frequency of Carrier)

ความถี่ของการ Modulation (The Frequency of Modulation)

Percentage of Modulation

Nonlinearity of modulation

การรบกวนที่เกิดขึ้นจาก Residual F.M. และ Spurious Signal

Spectrum Analyzer ที่มีใช้ในกองทัพอากาศ มีอยู่หลายแบบด้วยกัน เช่น MOD 491, MOD 492P, MOD 496P, MOD 141T, MOD 8552B, MOD 8550B และรุ่นที่นิยมใช้กันมากได้แก่ MOD 141T, MOD 8555A และ 8552B

๖.๖.๑ Bolometer Mounts

Bolometer Mounts เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบในการวัด Microwave Power Bolometer mounts นี้ มีทั้งที่สร้างขึ้นในรูปของ Wave Guide และ Coaxial ในการสร้าง Bolometer Mounts เราต้องการให้มี Absorb Power ให้มากที่สุด เราจึงคำนึงถึงข้อกำหนด ๔ ประการคือ

- มี Impedance Match กับ Transmission Line ตลอดย่านความถี่ใช้งาน
- ให้มี I^2R และ Dielectric Losses ในโครงสร้างตามฉนวน หรือใน Wave Guide น้อยที่สุด

- มีการป้องกันการสะท้อน และมี Thermal Isolation กับอากาศภายนอก
- ป้องกันการสูญหายของสัญญาณออกนอก Mount ตาม Shunt Path ของ Bolometer การ Shield ก็มีความสำคัญมาก เพราะสามารถป้องกันพลังงานนอก Mount เข้าไปใน Mount Bolometer โดยไม่ตั้งใจ Bolometer Mount จะต้องมี Case ซึ่งกันสะท้อน และป้องกันอุณหภูมิแวดล้อมได้ดี

Bolometer แบ่งออกเป็น ๒ ชนิดคือ

๖.๖.๑.๑ Coaxial Thermister Mount หรือ Barretter Mount

๖.๖.๑.๒ Wave Guide Mount

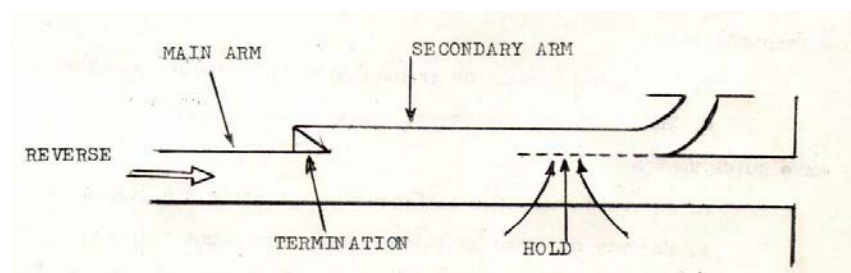
Coaxial Thermister Mount จะมี ๒ ส่วน ปกติจะได้รับพลังงานประมาณ ๓๐ mW. ซึ่งจะเป็น Bias ให้ Thermister สองตัวซึ่ง Series กันอยู่ ผลจากการได้รับพลังงานจะทำให้ความต้านทานของมันลดลง เป็น ๑๐๐ โอห์ม ต่อ Thermister แต่ละตัว

Untune Wave Guide จะได้รับการออกแบบ เพื่อให้ไม่มีการ Loss ในขณะวัดพลังงานจาก Wave Guide

Thermister ได้รับความนิยมในการใช้งานมากกว่า Barretters เพราะมันทนทานกว่าในขณะที่ Barretters มีย่าน Square Law ที่คำนวณได้ดีกว่า Thermister มี Negative Temperature Coefficient ขณะที่ Barretters มี Positive Temperature Coefficient

๖.๖.๒ Directional Couplers

Directional Couplers เป็นอุปกรณ์สามขา ซึ่งทำหน้าที่แบ่งพลังงานจาก Transmission Line หนึ่งไปยังอีก Transmission Line โดย Directional Coupler จะเป็นตัว Sample เอา Power จาก Source ที่มี Power สูง ๆ ไปยังเครื่องวัด เพราะปกติเครื่องวัดส่วนใหญ่จะวัด Power ได้ ไม่สูงมากนัก ดังนั้นการใช้ Directional Couplers เข้าช่วย จึงแก้ปัญหาหนีไปได้ เพราะว่าค่าที่ Sample ออกจาก Directional Couplers มีความแน่นอนสูงมาก เราจึงสามารถหาค่า Input Power ได้ ถ้าเราอ่าน Power ที่ Sample ได้



รูปภาพที่ ๖-๔ Directional Couplers

Wave Guide Directional Coupler ประกอบด้วย Wave Guide สองอันประกบติดกันอยู่ ด้านหนึ่งเราเรียกว่า Main ARM และอีกด้านหนึ่งเราเรียกว่า Secondary ARM หรือ Auxiliary ARM ภายในจะมี Tapered Load ใส่ไว้เป็นตัว Reverse Termination การ Coupling จาก Main ARM สู่ออก Secondary ARM ทำได้ โดยการเจาะรูให้ Main ARM และ Secondary ARM ต่อถึงกัน ดังรูป ด้วยวิธีนี้ Power จาก Main ARM จะผ่านไปสู่ Secondary ได้ สำหรับรูนี้จะมีระยะห่างระหว่างรูเท่ากับ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน จำนวนของพลังงานที่ถูก Coupler จะขึ้นอยู่กับขนาดของรู และจำนวนของรูที่เจาะไว้ภายใน Directional Coupler

๖.๖.๓ NARDA 3002-10 Coaxial Directional Coupler

อุปกรณ์ชิ้นนี้มีค่าการ Coupler เท่ากับ 10 dB และมี Directivity 30 dB Coupler ตัวนี้ Calibrate ความถี่ 225 MHz ถึง 460 MHz (๒๒๕, ๒๘๐, ๓๕๐, ๔๑๐ และ ๔๖๐ เมกะเฮิรตซ์) ค่า Coupling Factor ของแต่ละ ความถี่จะถูก Plot ลงบน Chart ซึ่งจะเกิดถาวรอยู่บนตัวของ Directional ตลอดไป อุปกรณ์ชิ้นนี้สามารถทนพลังงานได้ถึง 10 watts ของพลังงานในทาง Reverse Direction

หลักการทำงานเบื้องต้นของ Coaxial Directional Coupler แตกต่างจากหลักการทำงานของ Wave Guide Directional Coupler ตรงที่ว่ามันใช้ Coupling Loop และใช้ Capacitive Plate วางไว้ใกล้ ๆ กัน Center Conductor ของ Line ขนาดของการ Coupling จะกำหนดโดยระยะห่างระหว่าง Coupling Loop หรือ Plate ไปสู่ระยะของ Center Conductor

๖.๖.๔ Microwave Attenuators

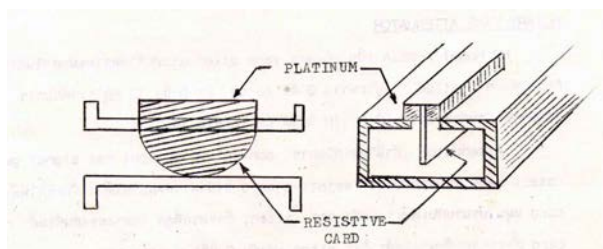
Attenuators มีใช้อยู่หลายแบบด้วยกัน และมีอยู่หลายวิธีในการลดพลังงานไมโครเวฟ การเลือกใช้ Attenuator ควรคำนึงถึงความต้องการต่าง ๆ เช่น Wave Guide หรือ Coaxial ความแม่นยำในการ Attenuator จำนวนของพลังงานที่จะป้อน

Attenuators เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในการปฏิบัติงานใน Lab Microwave Attenuators ใช้สำหรับลดพลังงานให้ต่ำลง โดยมีค่าที่แม่นยำ จึงเป็นประโยชน์มากในการวัดย่านความถี่ไมโครเวฟ Attenuators ที่ใช้กับความถี่ย่านไมโครเวฟนี้ ได้ถูกออกแบบมาอย่างดี ดังนั้นมันจึงจะให้ค่าความต้านทานเท่ากันตลอดช่วงความถี่ และที่สำคัญค่าของการ Attenuated จะต้องเท่ากันตลอดทุกช่วงความถี่ด้วย

การวัดค่า Attenuation จะได้รับการอธิบายในบทต่อไป ในบทนี้จะได้ทำการแนะนำการทำงานของ Attenuator เบื้องต้น และคุณสมบัติของ attenuator ในแต่ละประเภทดังนี้

๖.๖.๔.๑ Resistive Card Attenuator

Resistive Card Attenuator ประกอบด้วยแท่ง Wave Guide ซึ่งมีแผ่นความต้านทานสอดอยู่ภายใน ตำแหน่งของแผ่นความต้านทานจะไปขวางเส้นทางการวิ่งของสนามไฟฟ้าใน Wave Guide ทำให้เกิดการบั่นทอนสัญญาณลงมา เป็นค่าที่แน่นอน แผ่นความต้านทานนี้จะทำด้วยไม่ก้า เคลือบผิวด้วย PLATINUM



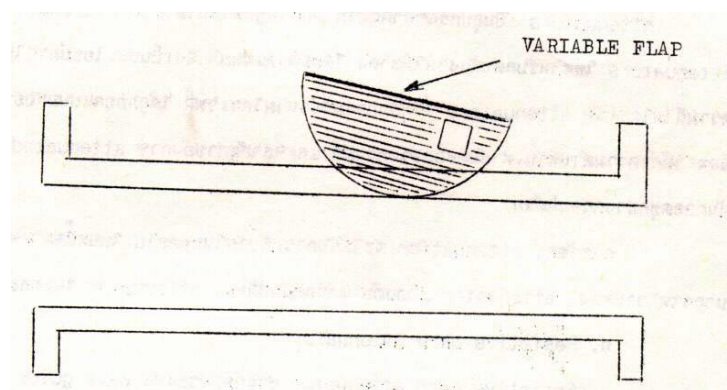
รูปภาพที่ ๖-๕ Resistive card attenuator

ขนาดของการ Attenuation จะขึ้นอยู่กับ

- (๑) ความหนาของ Platinum ที่เคลือบบนแผ่นไมก้า
- (๒) ความลึกของแผ่นความต้านทานที่เสียบเข้าไปใน Wave Guide
- (๓) พื้นที่ของแผ่นความต้านทานที่ถูก RF Field

๖.๖.๔.๒ Variable Flap Attenuator

Variable Flap Attenuator ทำงานเช่นเดียวกันแบบ Resistive Card สิ่งที่แตกต่างกันออกไป ก็คือ variable flap สามารถปรับตำแหน่งของแผ่นความต้านทานให้ตั้งลึกลงในด้านกว้างของ wave guide ได้ผลก็คือ เราสามารถปรับค่าความต้านทานได้ตามต้องการ



รูปภาพที่ ๖-๖ Variable flap Attenuator

HP Model X-375A Variable Flap Attenuator ให้ค่า Attenuation ระหว่าง 0 - 20 dB ความผิดพลาดอยู่ระหว่าง ± 1 dB จาก 0 - 10 dB และ ± 2 dB ในช่วง 10 - 20 dB ข้อจำกัดของ attenuation ตัวนี้ ก็คือ ถ้าป้อนพลังงานเข้ามามาก ๆ จะทำให้คุณสมบัติของ Resistive Card เปลี่ยนแปลงไป

๖.๖.๔.๓ Rotary Vane Attenuator

HP Model X-382A เป็น Rotary Vane Attenuator ที่ให้ความแม่นยำในการ Attenuator ดีมาก ช่วงการ Attenuation อยู่ระหว่าง 0 - 70 dB และค่า 0 - 50 dB จะได้รับการ Calibrate ไว้อย่างดี ส่วนค่าระหว่าง 50 - 70 dB ไม่ได้ Calibrate ไว้

Attenuator ตัวนี้ใช้มากในการ Control ค่า Output ของ Signal Generator Rotary Vane จะประกอบด้วย Resistive Card ซึ่งสามารถหมุนไปได้ในเส้นแรงไฟฟ้า ถ้าหากแผ่น Card หมุนไปขนานกับเส้นแรงไฟฟ้า การ Attenuation ก็จะมีมากที่สุด ในทางตรงกันข้าม ถ้า Resistive Card ตั้งฉากกับเส้นแรงไฟฟ้า ก็จะมี Attenuation เท่ากับ 0 ก็คือไม่ Attenuation เลย

Attenuator แบบนี้ควรหมุนไว้ในตำแหน่ง Max attenuation เสมอ

เมื่อ

- (๑) ความถี่ของ Signal Generator เปลี่ยนแปลงไป หรือไม่นิ่ง
- (๒) จะถอดหรือใส่อุปกรณ์เพิ่มใน Microwave Line ขณะปฏิบัติงาน
- (๓) ควรตั้ง Attenuation ไว้ Max ขณะไม่ใช้งาน

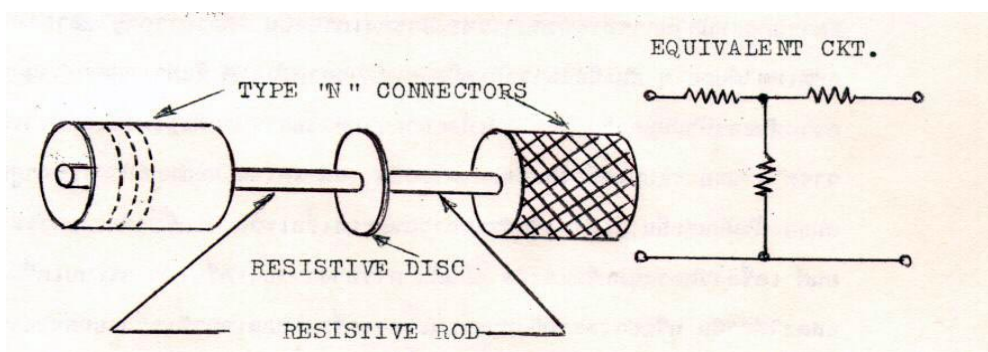
๖.๖.๔.๔ Resistive "T" Network Attenuators

Resistive "T" network สามารถใช้ Attenuation สัญญาณความถี่ 0 - 1 GHz ได้แบบที่ใช้เป็นแบบสาย Coaxial ตัว Resistors ที่อยู่ภายใน Attenuation. แบบนี้ จะ

ทำจาก Film โลหะเพราะมันจะให้ Frequency Response สูงสุด ในขณะที่ค่า Inductive และ Capacitive Reactance ต่ำสุด

ข้อดี ของ "T" network ก็คือเราสามารถนำ Attenuation. หลาย ๆ ตัวมาต่อ Serie กันไปได้โดยค่า Impedance เท่าเดิม トラบไตเราต่อด้วย Input และ Output ที่มีค่า Match กับ Impedance ของ Attenuation

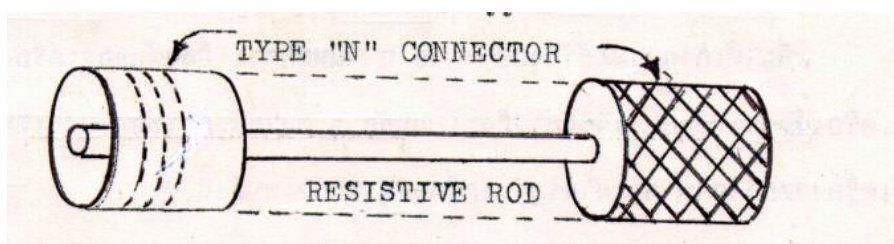
จากรูปจะแสดงถึงลักษณะของ Attenuation. แบบนี้ ซึ่งเราจะต้อง ทำการ Calibrate กันอยู่ บ่อย ๆ เพราะเป็น Attenuation ที่นิยมใช้กันมาก วิธีการ Calibrate Attenuation เราจะได้ศึกษากันต่อไป



รูปภาพที่ ๖-๗ Resistive "T" network Attenuators

Coaxial Resistive Attenuation ประกอบด้วยแท่งแก้วซึ่งเคลือบผิวด้วย Film โลหะใช้เป็น Center Conductor Attenuator แบบนี้ ทำงานคล้ายกับแบบ Coaxial Transmission Line ซึ่งมี Lossy Center Conductor.

The Lossy-Line Coaxial Attenuator ใช้ในย่านความถี่สูงประมาณ 3 GHz มันทำมาจากแท่งแก้วเคลือบ film โลหะซึ่งจะเป็นตัว attenuation สัญญาณลง



รูปภาพที่ ๖-๘ High-Frequency Attenuator with Film Coated Center Rod (AS-4 Attenuation Set)

AS-4 Attenuation Set ประกอบด้วย Coaxial Attenuator ชุดหนึ่งประกอบด้วยค่า Attenuation. หลายค่า ซึ่งเราสามารถนำมาต่อกัน เพื่อเพิ่มค่า Attenuation. ขึ้นอีกได้ ค่า Input Impedance ของ AS-4 มีค่า 50 Ohms. AS-4 นี้จะมีแผ่น Calibration Card ติดมาด้วย เพื่อบอกว่า Attenuation แต่ละตัวมีค่าเท่าไร

บทที่ ๗

เครื่องวัดทางกลไกไฟฟ้า และเครื่องวัดทางฟิสิกส์เบื้องต้น

๗.๑ กล่าวโดยทั่วไป

เครื่องวัดทางกลไกไฟฟ้า เป็นเครื่องวัดที่อาศัยหลักการทำงานร่วมกัน ระหว่างระบบแมคคานิกส์และระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องรายงานสภาพอากาศ เครื่องตรวจสอบสภาพการทำงาน ของแท่นทดลอง ของเครื่องยนต์ และเครื่องปรับแต่งเครื่องยนต์ ก่อนทำการขึ้นบิน เป็นต้น

เครื่องวัดทางฟิสิกส์ เป็นเครื่องวัดที่เกี่ยวข้องกับปริมาณทางกายภาพ อันได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความกดดัน ความสั่นสะเทือน มวล มิติ แรง แสง เสียง รังสี และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

ในการบินสมัยเริ่มแรก เครื่องบินยังไม่มีเครื่องวัด สำหรับช่วยในการบินมากนัก เพราะนักบินมีความตระหนักรู้ในการที่จะบังคับการทรงตัวของเครื่องบิน ให้สามารถอยู่ในอากาศได้ แต่ก็มักจะเกิดอุบัติเหตุได้บ่อย ๆ อันเนื่องมาจากเครื่องวัดที่ติดตั้งกลางอากาศ ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการสูญเสียความดันของน้ำมันหล่อลื่น จึงทำให้เกิดแนวความคิดในการประดิษฐ์เครื่องวัดที่จำเป็นขึ้น เพื่อแสดงการทำงานของระบบเครื่องยนต์ของเครื่องบิน เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิหัวกระบอกสูบ เครื่องวัดความดันของน้ำมันหล่อลื่น เครื่องวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง เครื่องวัดรอบการทำงาน ของเครื่องยนต์ เครื่องวัดแรงจุดหรือแรงบิด เป็นต้น การทำงานของเครื่องวัดในระบบเครื่องยนต์ จะเป็นตัวแสดงให้นักบิน หรือช่างทราบถึงสมรรถนะของเครื่องตลอดเวลาที่เครื่องยนต์ทำงาน

ปัจจุบันเครื่องวัดช่วยในการเดินอากาศและในทางการบินเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับนักบิน เช่น เครื่องวัดความสูง เครื่องวัดความเร็ว เครื่องวัดเซ การไหล ตลอดจนอัตราการไต่ของเครื่องบิน เป็นต้น เครื่องบินในอนาคตมีแนวโน้มที่จะมีรัศมีการบินได้ไกลขึ้น เพดานบินสูงกว่าเดิม และบินได้ทุกกาลอากาศ ซึ่งในสภาวะเหล่านี้ นักบินจำเป็นต้องอาศัยเครื่องวัดที่ถูกต้อง แม่นยำมากจึงกล่าวได้ว่า เครื่องวัดเป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับนักบิน ที่จะบังคับเครื่องบินให้บินได้ตามความต้องการอย่างปลอดภัย

เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างง่าย ๆ ในหลักการเบื้องต้นของเครื่องวัดทางกลไกไฟฟ้า และเครื่องวัดทางฟิสิกส์ จะได้กล่าวถึงระบบหลัก ๆ ซึ่งใช้ในการซ่อม-ปรับเทียบมาตรฐาน พอสังเขป ดังนี้

๗.๒ มิติ (Dimensional)

ปัจจุบัน การพัฒนาชิ้นส่วนอุปกรณ์ ตลอดจนการซ่อม สร้าง ดัดแปลงชิ้นส่วนต่าง ๆ ต้องอาศัยการวัดที่แม่นยำ และเป็นมาตรฐานเดียวกัน ความผิดพลาดเนื่องจากเครื่องวัดไม่ได้มาตรฐานเดียวกัน อาจนำมาซึ่งความสูญเสียอย่างมาก เพราะถ้าชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเข้าแทนชุดเดิมไม่สามารถประกอบใช้แทนกันได้ หรือได้ไม่สนิท ย่อมทำให้เสียทั้งเวลาและงบประมาณ หรือ ถ้าเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่สำคัญมาก ความผิดพลาดเรื่องขนาดอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการทำงานของอุปกรณ์ หรืออาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ วิชาการทางมิติจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดขนาดของวัตถุ ทั้งแบบธรรมดา จนถึงตัววัดที่ใช้เป็นมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ

๗.๒.๑ อุปกรณ์วัดชนิดรายละเอียดต่ำ ใช้สำหรับงานวัดที่ไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก เช่น การวัดความลึก ความสูง ความหนา ความเป็นเหลี่ยม เส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอก โดยทั่วไป จะใช้บรรทัดธรรมดาและคาลิปเปอร์ ในการวัด

๗.๒.๒ อุปกรณ์วัดชนิดรายละเอียดปานกลาง จะมีรายละเอียดของสเกลในการวัดมากกว่าแบบแรก คือ สามารถอ่านรายละเอียดได้ถึง ๐.๐๐๑ นิ้ว โดยเฉพาะอุปกรณ์บางชนิด เช่น Indicator จะอ่านได้ละเอียดถึง ๐.๐๐๐๑ นิ้ว ตัวอย่างเครื่องวัดประเภทนี้ได้แก่ Vernier Caliper, Vernier Height Gage, Micrometer และ Dial Indicator

๗.๒.๓ อุปกรณ์วัดชนิดรายละเอียดสูง เป็นเครื่องวัดที่อ่านได้รายละเอียดมากกว่า ๐.๐๐๐๑ นิ้วขึ้นไป ได้แก่ Clinometer, Electronic Height Gage, Supermicrometer, Master plug และ Ring Gage

๗.๒.๔ อุปกรณ์ที่เป็นมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ เป็นเครื่องวัด ที่ให้ความเป็นมาตรฐานสูงมาก เช่น Optical flat ซึ่งให้ความแม่นยำสูงถึง ๐.๐๐๐๐๐๕ นิ้ว หรือ Gage Block จะมีหลายระดับ แต่ Gage block ชนิดดี และมีความแม่นยำสูง คือแบบ AAA.Block ซึ่งให้ความแม่นยำสูงถึง ๐.๐๐๐๐๐๑ นิ้ว

๗.๓ แรง (Force)

จากกฎการเคลื่อนย้ายที่ข้อ ๒ ของนิวตัน แรงเป็นตัวแปรที่จะกำหนดการเคลื่อนที่ของวัตถุ ถ้าสามารถควบคุมแรงได้ ก็จะควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ เราสามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับความเร่งในการเคลื่อนที่ได้เป็น

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

เมื่อ F = แรงที่กระทำต่อวัตถุ

m = มวลของวัตถุ

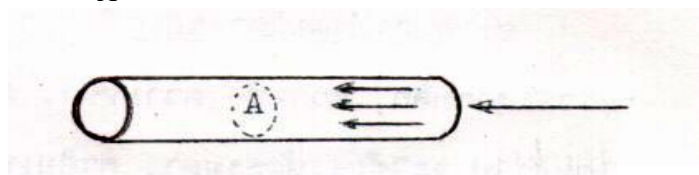
a = ความเร่งของวัตถุ

เมื่อมีแรงกระทำต่อวัตถุ อาจจะทำให้วัตถุนั้นมีรูปร่าง หรือขนาดเปลี่ยนไปจากเดิมมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่กระทำ และสมบัติของวัตถุที่มีความยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์จะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้หลังจากเลิกแรงกระทำ แต่วัตถุที่ไม่มีความยืดหยุ่นเลย จะเปลี่ยนสภาพไปจากเดิมโดยทั่วไปแล้ววัตถุหลายอย่างจะเป็นวัตถุยืดหยุ่นสมบูรณ์ภายในขอบเขตยืดหยุ่น (Elastic limit) ถ้าเกินจากขีดนี้ไปแล้ว จะไม่สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้

ขณะที่มีแรงกระทำต่อวัตถุนั้น แรงที่กระทำจะกระจายไปทั่วพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

อัตราส่วนของขนาดของแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด เรียกว่า ความเค้น (Stress) ซึ่งมีทั้งความเค้นในแนวตั้งฉาก และความเค้นสัมผัส กรณีที่แรงกระทำต่อวัตถุเป็นแรงอัด เราเรียกความเค้นอัด (Compressive stress) ถ้าให้ F แทนแรงที่กระทำต่อวัตถุ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ และ σ คือความเค้น จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\text{Stress} = \frac{F}{A}$$



รูปภาพที่ ๗-๑ แรงเค้นที่กระทำต่อวัตถุ

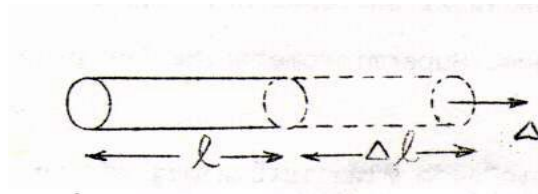
กรณีที่เมื่อมีแรงกระทำต่อวัตถุแล้ว ทำให้วัตถุมีรูปร่าง หรือขนาดเปลี่ยนไปจากเดิม เราเรียก อัตราส่วนระหว่างขนาด หรือรูปร่างที่เปลี่ยนไปกับขนาด หรือรูปร่างเดิม ความเครียด (Strain) ซึ่งเขียนในรูปของความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\Sigma = \frac{\Delta L}{L}$$

Σ = ความเครียด (Strain)

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป

L = ความยาวเดิม



รูปภาพที่ ๗-๒ แรงเครียดกระทำต่อวัตถุ

จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงจะถูกออกแบบให้ใช้กับการวัดแรงที่ระดับความเค้นต่ำกว่าขอบเขตยืดหยุ่น ในการใช้งานจึงจำเป็นต้องระวังเรื่องการป้อนโหลด (Load) ไม่ควรให้เกินอัตราที่กำหนดเพราะจะทำให้อุปกรณ์ในการวัดแรงเกิดการเสียหายได้ สำหรับวัตถุชนิดหนึ่ง ๆ ค่าอัตราส่วนของความเครียดกับความเค้น จะมีค่าคงที่ เรียกค่าคงที่นี้ว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น หรือยัง โมดูลัส (Young's modulus) ซึ่งเขียนได้เป็น

$$Y = \frac{F / A}{\Delta L / L}$$

$$\text{หรือ } Y = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L}$$

เมื่อ Y = ยังโมดูลัส

F = แรงที่กระทำ

A = พื้นที่หน้าตัด

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป

L = ความยาวเดิม

ค่าคงที่นี้มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากสมบัติเหล่านี้ ถ้าเราทราบค่าของโครงสร้างวัตถุแต่ละชนิด กับค่าของโหลดที่ป้อนให้กับวัตถุ จะทำให้เราสามารถหาค่าความยาวที่เบี่ยงเบนได้ และจากหลักการดังกล่าวแล้ว จึงเป็นที่มาของอุปกรณ์สำคัญของเครื่องวัดแรง แบบต่าง ๆ เช่น

๗.๓.๑ สปริง (Spring) อาศัยการยืด หรือหดตัวของสปริง สัมพันธ์กับแรงกดหรือแรงดึงที่ป้อนให้กับสปริง

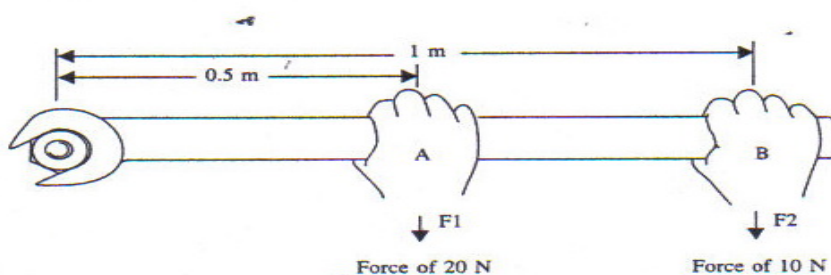
๗.๓.๒ วงแหวน (Ring) เป็นตัววัดที่ใช้หลักการของแรงที่กระทำต่อตัววงแหวน ทำให้ตัววงแหวนเปลี่ยนรูปร่างไป ซึ่งเราจะวัดค่าที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยไมโครมิเตอร์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตารางตรวจสอบแรงมาตรฐาน

๗.๓.๓ สเตรอนเกจ (Strain Gage) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นด้วยกรรมวิธี photographic คล้ายกับการทำงานของแผ่นฟิล์มของวงจรรีโกลิโทรอนิกส์ โดยการฉาบสารที่มีความต้านทานสูง เช่น Nicron ผนึกเข้ากับฉนวน ทำให้สเตรอนเกจมีลักษณะเหมือนตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ตามการเปลี่ยนแปลงของความยาว เราจึงสามารถนำเอาสเตรอนเกจไปติดเข้ากับชิ้นงานที่เราต้องการทราบที่กระทำบนชิ้นวัตถุเช่น แรงบิด, แรงจุด ในการอ่านค่าแรงสามารถทำได้โดยนำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปนี้ ไปวัดด้วยวงจรวัดจิบาลานซ์ (Bridge Balance) และด้วยหลักการนี้สามารถนำไป

ประกอบเป็น load cell เพื่อใช้วัดน้ำหนักมาก ๆ ตลอดจนเครื่องขันน็อต ให้สามารถรับแรงได้ตามกำหนด เช่น torque wrench เป็นต้น

๗.๔ แรงบิด (Torque)

กล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่ทุกแบบที่มีลักษณะของการหมุน จะต้องมีความบิดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ ไม่ว่าจะเป็นการเปิดประตู การเปิดฝาขวด การหมุนปิด-เปิดวาล์ว ตลอดจนการขับเคลื่อนเพื่อให้เกิดการหมุน เป็นต้น เรื่องเหล่านี้มักจะถูกมองข้ามความสำคัญไป แต่จริง ๆ แล้ว เรื่องที่คิดว่าไม่สำคัญนี้อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุถึงชีวิตได้ โดยเฉพาะในเทคโนโลยีสมัยใหม่ ระบบยุทธโธปกรณ์ต่าง ๆ จะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้เป็นอย่างมาก การขันน็อตตัวหนึ่งสำหรับเครื่องบินปีกหมุน ถ้าขันแน่นเกินไปจะทำให้แรงที่กระทำต่อตัวน็อตมากเกินไปจนขอบเขตยืดหยุ่น อาจทำให้น็อตแตกกร้าว หรือหักได้ แต่ถ้าขันน็อตหลวมไป เมื่อเกิดการหมุน อาจจะทำให้น็อตค่อย ๆ คลายตัวจากเกลียวจนหลุดไป ถ้าเครื่องบินกำลังบินอยู่แล้วปีกหลุด อะไรจะเกิดขึ้น ดังนั้นยิ่งเทคโนโลยีทันสมัยมากเพียงใด ความละเอียดเที่ยงตรงที่ต้องการก็ยิ่งมากเท่านั้น เครื่องมือสำหรับวัดค่าปริมาณที่เกี่ยวข้องจึงต้องเชื่อถือได้ และแม่นยำพอ อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าแรงบิด เช่น Torque Wrench ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ มีขนาดตั้งแต่ ๐ ถึง ๖๐๐๐ ปอนด์-นิ้ว (Pound-In.) ขึ้นไป



รูปภาพที่ ๗-๓ แรงบิดที่กระทำต่อวัตถุ

จากสมการ $T = F \times L$

เมื่อกำหนด $T =$ แรงบิด (Torque) หน่วยคือ Newton-Meter (N·M)

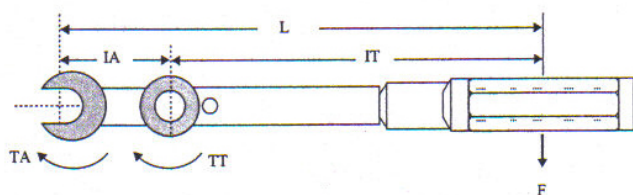
$F =$ แรงที่กระทำ (Force) หน่วยคือ Newton (N)

$L =$ ระยะตั้งฉากจากจุดหมุนไปยังแนวแรง หน่วยคือ Meter (M)

ดังนั้น $T_1 = 20 \text{ N} \times 0.5 \text{ m} = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$

$T_1 = 10 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$

$T_1 = T_2$



รูปภาพที่ ๗-๔ เครื่องมือใช้วัดแรงบิด

ในกรณีที่ใช้ Adapter ซึ่งทำให้จุดหมุนไม่ได้อยู่ที่บริเวณปลายของประแจวัดแรงบิด (TT) จำเป็นที่จะต้องคำนวณค่าชดเชยค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความยาว (IA) ที่เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อกำหนดให้

F = แรงที่กระทำ (Force) หน่วยคือ Newton (N)

IT = ความยาวของประแจวัดแรงบิด หน่วยคือ Meter (m)

IA = ความยาวส่วนที่เพิ่มขึ้น หน่วยคือ Meter (m)

$L = IT + IA$

TA = แรงบิดซึ่งเกิดที่ส่วนที่ยาวเพิ่มขึ้น หน่วยคือ Newton-Meter (N·m)

TT = แรงบิดซึ่งเกิดจากประแจวัดแรงบิด หน่วยคือ Newton-Meter (N·m)

คำนวณได้จาก

$TA = F \times L$ และ $TT = F \times IT$

$$F = \frac{TA}{L} = \frac{TT}{IT}$$

$$TA = \frac{TT \times L}{IT}$$

อุปกรณ์วัดแรงบิดแบ่งออกเป็น ๒ ชนิด

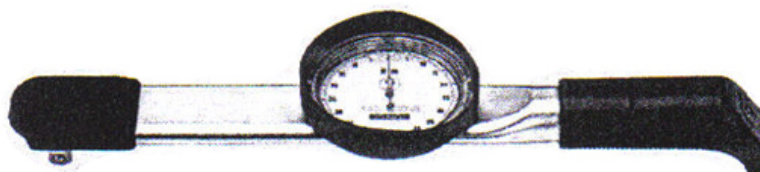
๗.๔.๑ อุปกรณ์วัดแรงบิดชนิดอ่านค่า (Indication Torque Tools)

๗.๔.๑.๑ Torsion or Fixion Bar Torque Wrench ลักษณะภายนอกเป็นแบบคานหรือเป็นแบบ T แสดงผลโดยเข็มชี้ที่ค่าแรงบิดที่วัดได้



รูปที่ ๗-๕ Torsion or Fixion Bar Torque Wrench

๗.๔.๑.๒ Dial Type Torque Wrench ลักษณะภายนอกเป็นแบบคานแสดงผลบนหน้าปัดโดยเข็มชี้ที่ค่าแรงบิดที่วัดได้



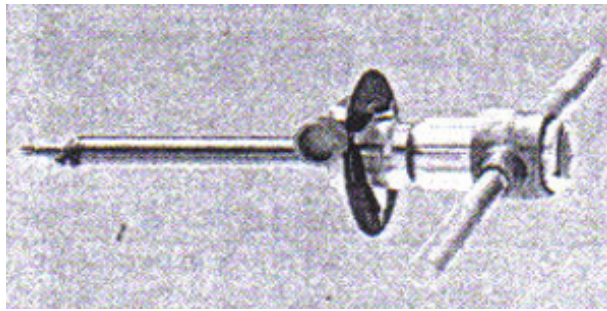
รูปภาพที่ ๗-๖ Dial Type Torque Wrench

๗.๔.๑.๓ Digital Type Torque Wrench แสดงค่าแรงบิดเป็นตัวเลขดิจิทัล



รูปภาพที่ ๗-๗ Digital Type Torque Wrench

๗.๔.๑.๔ Dial Type Torque Screwdriver แสดงผลโดยเข็มชี้ที่ค่าแรงบิดที่วัดได้



รูปภาพที่ ๗-๘ Dial Type Torque Screwdriver

๗.๔.๑.๕ Digital Type Torque Screwdriver แสดงค่าแรงบิดเป็นตัวเลขดิจิทัล



รูปภาพที่ ๗-๙ Digital Type Torque Screwdriver

๗.๔.๒ อุปกรณ์วัดแรงบิดชนิดตั้งค่า (SETTING TORQUE TOOLS)

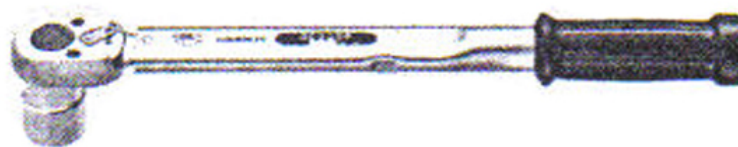
๗.๔.๒.๑ Graduated Torque Wrench สามารถเลือกตั้งค่าแรงบิดที่ต้องการได้ตามความต้องการของผู้ใช้



รูปภาพที่ ๗-๑๐ Graduated Torque Wrench

๗.๔.๒.๒ Non-Graduated Torque Wrench ค่าแรงบิดกำหนดแน่นอนมา

จากผู้ผลิต



รูปภาพที่ ๗-๑๑ Non-Graduated Torque Wrench

๗.๔.๒.๓ Graduated Torque Screwdriver สามารถเลือกตั้งค่าแรงบิดที่
ต้องการได้ตามความต้องการของผู้ใช้



รูปภาพที่ ๗-๑๒ Graduated Torque Screwdriver

๗.๔.๒.๔ Non-Graduated Torque Screwdriver ค่าแรงบิดกำหนดแน่นอน
มาจากผู้ผลิต



รูปภาพที่ ๗-๑๓ Non-Graduated Torque Screwdriver

ตารางที่ ๗-๑ แสดงขอบเขตที่ยอมรับให้อุปกรณ์วัดแรงบิดผิดพลาดได้

| ชนิด | มาตรฐาน | Permissible | จุดสอบเทียบ | จำนวนครั้งที่วัด |
|--------------|---------|-----------------------|---------------------|------------------|
| Dial | ASME | 4% | 20%, 60%, 100% | ๓ ครั้ง |
| | ISO | 4% | 20%, 60%, 100% | ๕ ครั้ง |
| | JIS | 3% | Min., 1/3, 2/3.max. | - |
| Graduate | ASME | Wrench 4% | 20%, 60%, 100% | ๓ ครั้ง |
| | | Driver 6% | | |
| | ISO | Wrench 4% | 20%, 60%, 100% | ๕ ครั้ง |
| Driver 6% | | | | |
| JIS | 3% | Min., 1/3, 2/3.max. | ๓ ครั้ง | |
| Non-graduate | ASME | Wrench 4% | Setting Torque | ๓ ครั้ง |
| | | Driver 6% | | |
| | ISO | Wrench 4% | Setting Torque | ๑๐ ครั้ง |
| Driver 6% | | | | |
| JIS | 3% | Setting Torque | ๓ ครั้ง | |
| Digital | ASME | Clockwise 1% | 20%, 60%, 100% | ๓ ครั้ง |
| | | Counterclockwise 1.5% | | |
| ISO | 4% | 20%, 60%, 100% | ๕ ครั้ง | |

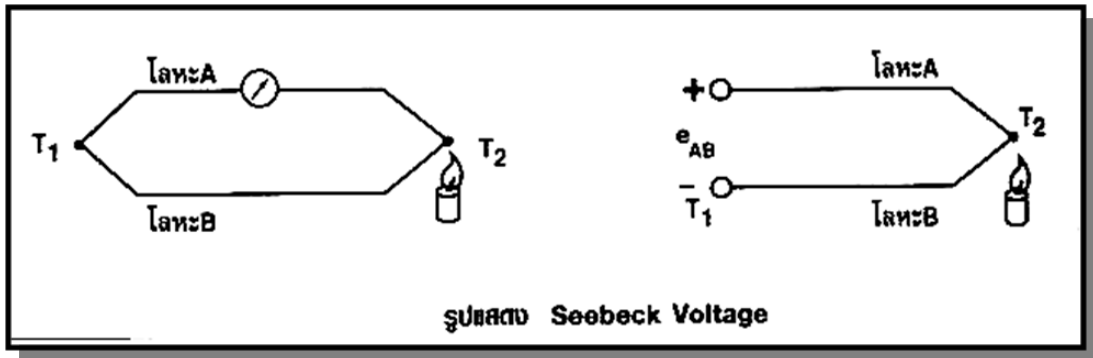
๗.๕ อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิ นับว่าเป็นหน่วยของปริมาณมูลฐาน ที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่งในเรื่องของระบบควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของ สารส่วนใหญ่จะแปรเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือระดับของพลังงานความร้อน ดังนั้นอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องวัดต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบควบคุมจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ทางบริษัทผู้ผลิตกำหนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมาตรฐาน จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามมาตรฐานสากลที่กำหนด เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิมีหลายชนิด แต่ละชนิดอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะของสาร สำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิที่พบใช้งานทั่ว ๆ ไปได้แก่

เทอร์โมมิเตอร์แบบของเหลวในหลอดแก้วปิด (Thermometer) ใช้หลักการขยายตัวและหดตัวของ ของเหลว เมื่อของเหลวได้รับความร้อนจะขยายตัว และหดตัวเมื่อได้รับความเย็น เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้มักจะทำเป็นหลอดแก้วแคปพิลลารี ปลายข้างหนึ่งปิด อีกข้างหนึ่งเป็นกระเปาะบรรจุของเหลว ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเหลวที่นิยมใช้ ได้แก่ โปรท และ แอลกอฮอล์ ข้อจำกัดของเทอร์โมมิเตอร์แบบนี้ คือ ใช้ได้ผลช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ถ้าใช้กับการวัดอุณหภูมิสูง ๆ จะทำให้หลอดแก้วแตก ที่พบเห็นได้ทั่วไป ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดคนไข้ตามโรงพยาบาลเทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น

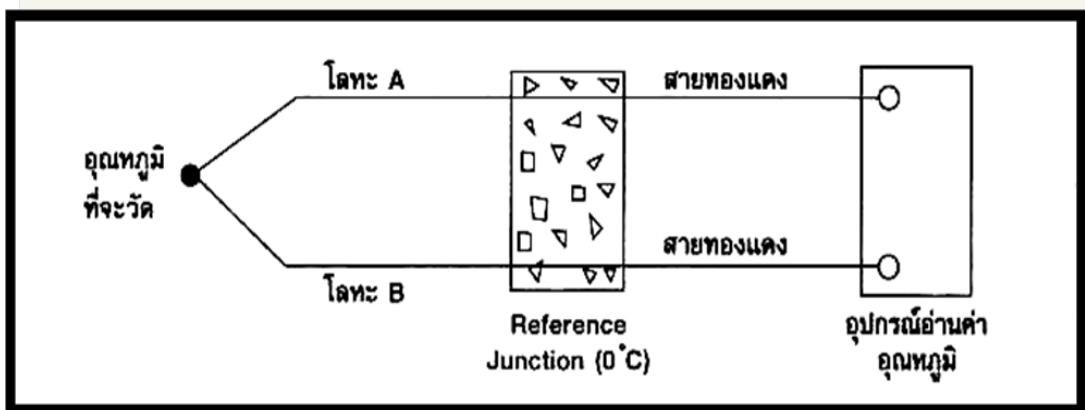
๗.๕.๑ เทอร์โมมิเตอร์แบบความต้านทาน (Platinum Resistance) หรือที่เรียกว่า RTD (Resistance Temperature Detector) ใช้หลักการที่ว่าความต้านทานของลวดโลหะจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเลือกสรรเพื่อใช้ทำเทอร์โมมิเตอร์แบบนี้ มักเลือกสารที่มีความไวต่อความร้อนที่ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนสูง และจากการวิจัยพบว่า เส้นลวดแพลตินัมสามารถใช้เป็นตัวกลางวัดอุณหภูมิได้ ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่แพร่หลาย และใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานสากลในการวัดอุณหภูมิ ตั้งแต่จุดแข็งตัวของออกซิเจน คือ -182.96°C ถึง $1,500^{\circ}\text{C}$

๗.๕.๒ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการที่ว่า เมื่อนำลวดโลหะ ๒ เส้น ที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสอง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อ และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายเปิด ซึ่งวัดออกมาได้เป็นมิลลิโวลต์ และสามารถแปลงออกมาเป็นองศาได้ เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานที่ใช้กันอยู่มีหลายชนิดด้วยกัน เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในลักษณะต่าง ๆ เช่น เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K) ซึ่งเป็นโลหะแบบ Chromel-Alumel โดยที่สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่างนิเกิล-โครเมียมและสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิเกิล-อะลูมิเนียม แมงกานีส และซิลิกอน ใช้กับการวัดอุณหภูมิสูงมาก ๆ เช่น อุณหภูมิท่อท้ายของเครื่องยนต์ เครื่องบินซึ่งมีความร้อนสูง 530°F ถึง $2,300^{\circ}\text{F}$ เทอร์โมคัปเปิลแบบ J (Type J) Iron-Constantan สายบวกทำด้วยเหล็ก และสายลบทำด้วย constantan ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดง-นิเกิล ใช้กับการวัดอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก ตั้งแต่ 530°F ถึง $1,400^{\circ}\text{F}$ เป็นต้น

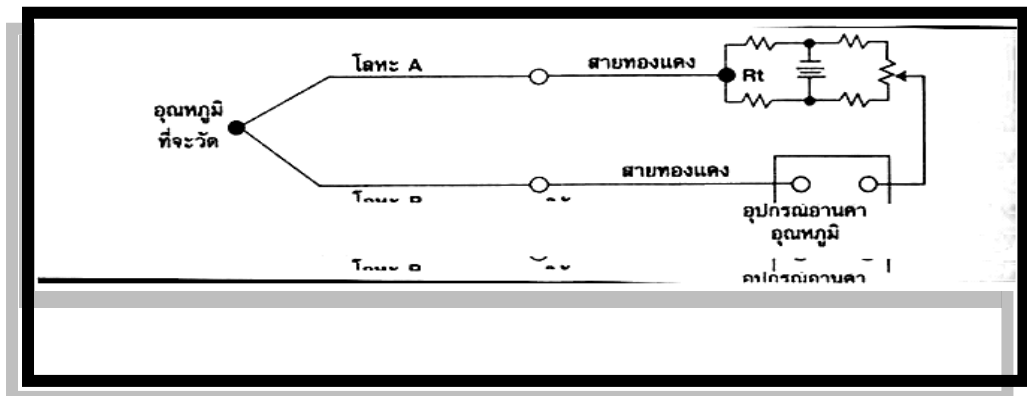


รูปแสดง Seebeck Voltage

รูปภาพที่ ๗-๑๔ หลักการของเทอร์โมคัปเปิล



รูปภาพที่ ๗-๑๕ การรักษา Reference Junction ด้วยน้ำแข็งบริสุทธิ์ นำจุดต่อจุ่มลงในน้ำแข็งก่อนนำเข้าอุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ เพื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ เกิดจากการวัดอุณหภูมิเทียบกับ 0 °C จริง ๆ แต่วิธีเหมาะสำหรับในห้องปฏิบัติการ



รูปภาพที่ ๗-๑๖ การรักษา Reference Junction ด้วยวงจรไฟฟ้าแบบ Bridge

วิธีนี้ใช้ความต้านทานที่เปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ (Temperature Sensitive Resistor) เช่น RTD หรือ Thermistor ต่อไว้ในวงจร Bridge เป็นตัวชดเชยอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนไป ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิได้รับจะมาจาก ๒ ส่วนรวมกัน คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิล ที่เกิดจากผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิที่จะวัดกับอุณหภูมิห้อง และแรงเคลื่อนไฟฟ้าชดเชยอุณหภูมิห้องจาก RT Thermocouple มีความแม่นยำ และความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับอุณหภูมิก็ค่อนข้างที่จะตรง จึงเป็นที่นิยมใช้ และยังสามารถวัดได้ตั้งแต่ประมาณ -250°C ถึง 1500°C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของ Thermocouple ด้วย

| Type | Positive Material | Negative Material | Accuracy*** Class 2 | Range °C (extension) | Comments |
|------|---------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|---|
| B | Pt, 30%Rh | Pt, 6%Rh | 0.5% >800°C | 50 to 1820 (1 to 100) | Good at high temperatures, no reference junction compensation required. |
| C** | W, 5%Re | W, 26%Re | 1% >425°C | 0 to 2315 (0 to 870) | Very high temperature use, brittle |
| D** | W, 3%Re | W, 25%Re | 1% >425°C | 0 to 2315 (0 to 260) | Very high temperature use, brittle |
| E | Ni, 10%Cr | Cu, 45%Ni | 0.5% or 1.7°C | -270 to 1000 (0 to 200) | General purpose, low and medium temperatures |
| G** | W | W, 26%Re | 1% >425°C | 0 to 2315 (0 to 260) | Very high temperature use, brittle |
| J | Fe | Cu, 45%Ni | 0.75% or 2.2°C | -210 to 1200 (0 to 200) | High temperature, reducing environment |
| K* | Ni, 10%Cr | Ni, 2%Al 2%Mn 1%Si | 0.75% or 2.2°C | -270 to 1372 (0 to 80) | General purpose high temperature, oxidizing environment |
| L** | Fe | Cu, 45%Ni | 0.4% or 1.5°C | 0 to 900 | Similar to J type. Obsolete - not for new designs |
| M** | Ni | Ni, 18%Mo | 0.75% or 2.2°C | -50 to 1410 | |
| N* | Ni, 14%Cr 1.5%Si | Ni, 4.5%Si 0.1%Mg | 0.75% or 2.2°C | -270 to 1300 (0 to 200) | Relatively new type as a superior replacement for K Type. |
| P** | Platinel II | Platinel II | 1.0% | 0 to 1395 | A more stable but expensive substitute for K & N types |
| R | Pt, 13%Rh | Pt | 0.25% or 1.5°C | -50 to 1768 (0 to 50) | Precision, high temperature |
| S | Pt, 10%Rh | Pt | 0.25% or 1.5°C | -50 to 1768 (0 to 50) | Precision, high temperature |
| T* | Cu | Cu, 45%Ni | 0.75% or 1.0°C | -270 to 400 (-60 to 100) | Good general purpose, low temperature, tolerant to moisture. |
| U** | Cu | Cu, 45%Ni | 0.4% or 1.5°C | 0 to 600 | Similar to T type. Obsolete - not for new designs |

ตารางที่ ๗-๒ แสดงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของแต่ละชนิด

๗.๕.๒.๑ ชนิดของ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

Thermocouple มีหลายชนิด (Type) แต่ละ Type ก็มีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างออกไป ดังนั้นการเลือกใช้ชนิดของ Thermocouple ก็มีความสำคัญ เพราะต้องเลือกให้เหมาะกับชนิดของงานที่ใช้

(๑.) เทอร์โมคัปเปิลแบบ s (Thermocouple Type S)

- สายลบทำจากแพลตินัม สายบวกทำจากโลหะผสม 90% ของแพลตินัม + 10% ของโรเดียม
- วัดอุณหภูมิได้ดีที่ -๕๐ - ๑,๗๖๘ องศาเซลเซียส
- ใช้งานในสภาวะที่เป็น Oxidizing และ Inert ได้ดี
- ไม่เหมาะกับงานที่เป็น Reducing , Vacuum และสภาพงานที่มีไอของโลหะ

(๒.) เทอร์โมคัปเปิลแบบ R (Thermocouple Type R)

- สายลอบทำจากแพลตินัม สายบวกรทำจากโลหะผสม 87% ของแพลตินัม + 13% ของโรเดียม
- วัดอุณหภูมิได้ดีที่ -๕๐ – ๑,๓๖๘ องศาเซลเซียส
- ใช้งานในสภาวะที่เป็น Oxidizing และ Inert ได้ดี
- ไม่เหมาะกับงานที่เป็น Reducing , Vacuum และสภาพงานที่มีไอของโลหะ
- คุณสมบัติเหมือนกับ Type S เกือบทุกอย่าง แตกต่างกันที่ความต่างศักย์ที่วัดได้จะสูงกว่า Type S

(๓.) เทอร์โมคัปเปิลชนิด B (Thermocouple Type B)

- สายลอบทำจากแพลตินัม 94% + โรเดียม 6% สายบวกรทำจากแพลตินัม 70% + โรเดียม 30%
- ช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ ๕๐ – ๑,๘๒๐ องศาเซลเซียส
- ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ในสภาวะที่เป็น Oxidizing หรือ Inert
- ไม่เหมาะกับงาน Reducing หรือ Vacuum และงานที่ไอของโลหะและอโลหะ เช่นเดียวกับ Type R และ S

(๔.) เทอร์โมคัปเปิลชนิด J (Thermocouple Type J)

- เนื่องจากแพลตินัมมีราคาสูง จึงมีการหาธาตุอื่นมาทำ เทอร์โมคัปเปิล เช่น เหล็ก นิกเกิล เป็นต้น
- สายบวกรทำด้วยเหล็ก และสายลอบทำด้วย Constantan (60% ของทองแดง + 40% นิกเกิล)
 - ช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -๒๑๐ – ๑,๒๐๐ องศาเซลเซียส
 - เหมาะกับงานที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก ใช้ได้ในสภาวะที่เป็น Vacuum, Oxidizing, Reducing หรือ Inert
 - ไม่เหมาะกับงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า ๐ และอุณหภูมิสูงกว่า ๗๖๐ องศาเซลเซียส

(๕.) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K)

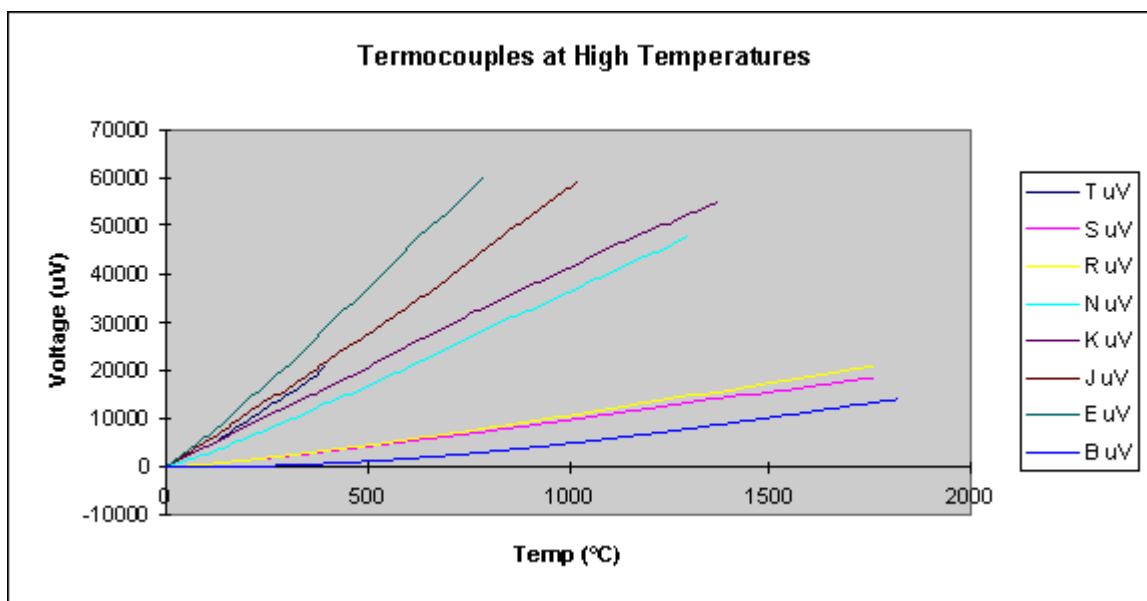
- พัฒนามาจากชนิด J เป็นชนิดที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด เพราะ ช่วงการวัดกว้างและสามารถวัดได้ในหลายสภาพแวดล้อม
- สายบวกรทำจากนิกเกิล 10% + โครเมียม 90% สายลอบทำจากนิกเกิล 95% + อลิเนียมแมงกานีสและซิลิกอน 5%
 - ช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -๒๗๐ – ๑,๓๗๒ องศาเซลเซียส
 - ใช้ได้ดีในสภาวะที่เป็น Oxidizing และ Inert สภาวะที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรง
 - ไม่เหมาะกับงานที่เป็น Reducing , งานที่มีไอของ ซัลเฟอร์ และงานที่เป็น Vacuum

(๖.) เทอร์โมคัปเปิลชนิด E (Thermocouple Type E)

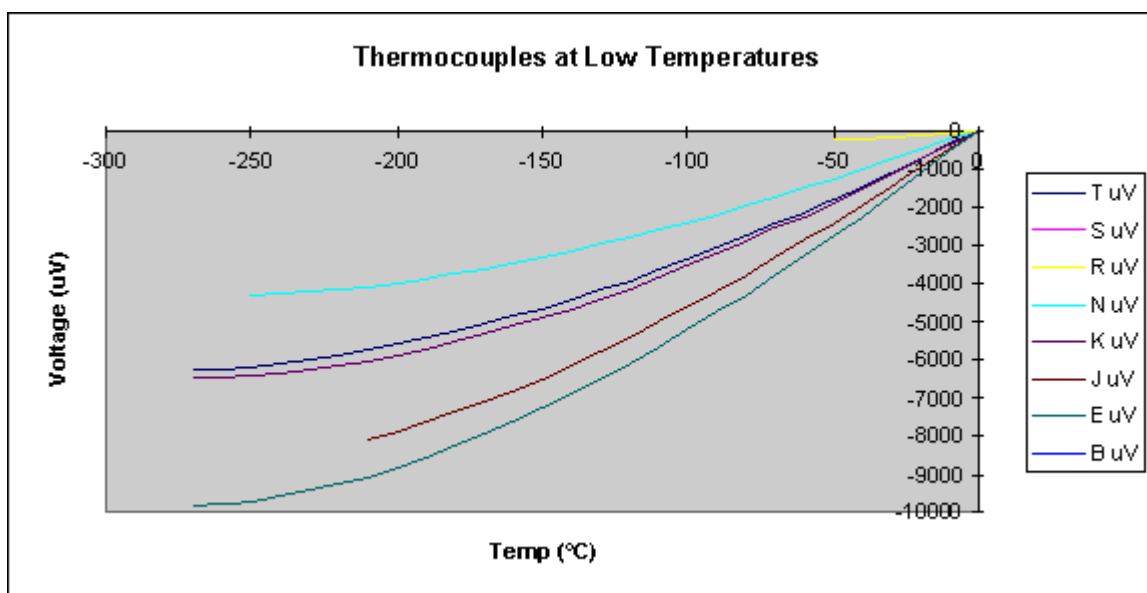
- พัฒนามาต่อมาจาก Type J จึงมีคุณสมบัติคล้ายกับ Type J, K

- สายบวกทำจาก โคเมียม 90% + นิกเกิล 10% สายลบทำจาก Constantan(60% ของทองแดง + 40% นิกเกิล)
- ช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -๒๗๐ - ๑,๐๐๐ องศาเซลเซียส
- เหมาะกับงานที่เป็น Oxidizing
- ไม่เหมาะกับงานที่เป็น Reducing , งานที่มีไอของ ซัลเฟอร์ และงานที่เป็น Vacuum เช่นเดียวกับ Type K

กราฟแสดงความต่างศักย์กับอุณหภูมิ (อุณหภูมิสูงกว่า 0 oC)



กราฟแสดงความต่างศักย์กับอุณหภูมิ (อุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C)



ต่อมาก็มาถึงการนำ Thermocouple ไปใช้ อย่างที่บอกไว้ตอนแรกว่า Thermo-couple จะมี Output ออกมาเป็น ความต่างศักย์ ซึ่งความต่างศักย์ที่ว่ามีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์ หรือ ไมโครโวลต์ ดังนั้นการจะนำ Thermo-Couple ไปใช้นั้น เราต้องมีวงจรขยาย ซึ่งการขยายนี้ก็หลายวิธี

๗.๖ ความกดดัน (Pressure)

ความดัน เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวหนึ่ง ในระบบของการวัด ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสสาร เช่น มีผลต่อจุดเดือด, ความหนาแน่น, การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสาร นอกจากนี้มนุษย์ยังนำเอาความดันมาประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องทุ่นแรง เช่น รถยกของ และระบบไฮดรอลิคต่าง ๆ เป็นต้น

๗.๖.๑ ความกดดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure)

ตามสภาพความเป็นจริงแล้วเรากำลังอาศัยอยู่ ณ บริเวณที่มีความลึกของทะเลอากาศถึง ๕๐๐ ไมล์ และมีแรงกดดันจำนวน ๑๔.๗ ปอนด์ บนพื้นที่ ๑ ตารางนิ้ว แต่เราไม่รู้สึกถึงแรงจำนวนนี้ เพราะภายในร่างกายของเราจะมีแรงต้านทานจำนวนเท่า ๆ กัน ทำให้สามารถรักษาสภาพความสมดุลนี้ได้อยู่ ๆ ได้ ความกดดัน ณ จุดใด ๆ ย่อมขึ้นอยู่กับความลึกของบรรยากาศ ถ้าเราอยู่สูงขึ้นไปความกดดันจะลดเบาบางลง ในขณะที่ถ้าเราอยู่ลึกลงไปใต้น้ำความกดดันจะเพิ่มขึ้น การวัดความกดดันก็คือ การวัดแรงที่กระทำต่อหนึ่งพื้นที่ มีหน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรืออาจเปรียบเทียบได้กับความสูงของน้ำ หรือปรอทในหลอดแก้วก็ได้ ความกดดันที่อยู่รอบตัวเรา ก็คือ ความกดดันบรรยากาศนั่นเอง

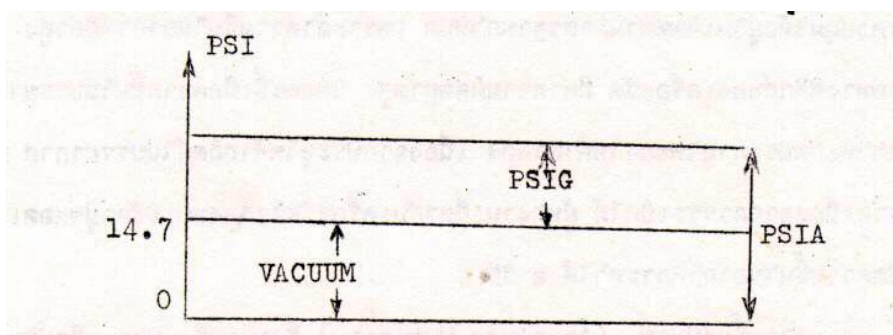
๗.๖.๒ ความกดดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure)

เป็นค่าความดันที่วัดจาก 0 PSI คือจุดศูนย์อยู่ที่จุดสุญญากาศ (ไม่เทียบจากความดันบรรยากาศ) ใช้สำหรับการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิก

๗.๖.๓ ความดันเกจ (Gage Pressure)

ค่าความดันเกจจะอ้างอิงค่าศูนย์ที่ความกดดันบรรยากาศ โดยวัดค่าที่สูงกว่าความดันบรรยากาศขึ้นไป

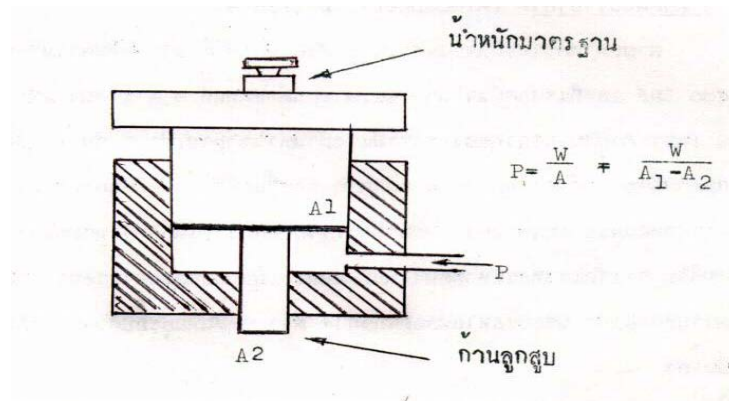
นอกจากความดันปกติเหล่านี้แล้ว สิ่งที่เราควรทราบอีกอย่างก็คือ สุญญากาศ (Vacuum) ซึ่งจะอ้างอิงจุดศูนย์ที่ความดันบรรยากาศ และมีค่ามากขึ้น เมื่อความดันลดลง มีค่าสูงสุดที่จุดศูนย์ของความดันสัมบูรณ์ นั่นคือ เป็นความดันที่วัดจาก 0 PSI ถึง 14.7 PSI ดังแสดงในรูป



รูปภาพที่ ๗-๑๗ แสดงค่าความกดดันของบรรยากาศ

สำหรับเครื่องมือวัดความดัน มีอยู่หลายประเภท แต่แต่ละประเภทมีลักษณะการใช้งานและข้อดี ข้อเสียต่างกันไป เช่น มาโนมิเตอร์, บาโรมิเตอร์, ไดแอลเกจ, ควอท, บูร์ตอง และที่ใช้เป็นมาตรฐานหลัก ทางด้านความดันได้แก่ Dead Weight, Piston Gage ซึ่งมีความแม่นยำสูงมากมีหลักการทำงานง่าย ๆ คือ ความสมดุลกันระหว่าง แรงดันที่ป้อนเข้ากับน้ำหนักมาตรฐานบนพื้นที่ ที่ได้มาตรฐานของก้านลูกสูบ เมื่อป้อนแรงดันเข้าไปจะทำให้ก้านลูกสูบลอยตัวขึ้น และอยู่ในสภาวะ

สมดุลเมื่อความดันที่ป้อนเข้ามีค่าเท่ากับความดันมาตรฐาน ซึ่งเท่ากับ น้ำหนักมาตรฐานทั้งหมดบน ลูกสูบต่อพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ



รูปภาพที่ ๗-๑๘ การหาค่าความดัน

เมื่อ $P =$ ความดัน
 $W =$ น้ำหนักมาตรฐาน
 $A =$ พื้นที่หน้าตัด

๗.๗ ความชื้น (Humidity)

ความชื้นที่จะกล่าวถึงนี้ หมายถึง ปริมาณของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นตัวแปรซึ่งมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์เครื่องวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องวัดทางฟิสิกส์อย่างมากตัวหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีผลต่อความจุของอากาศ ใน Air Capacitor ซึ่งมีผลต่อความเป็นฉนวนของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน ฯลฯ ในการปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด ความชื้นนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง และจำเป็นต้องมีการควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนด เพราะถ้าความชื้นในอากาศมีค่าสูง จะทำให้การวัดปริมาณทางฟิสิกส์ของเครื่องวัด มีค่าความผิดพลาดสูง ในขณะที่เมื่อความชื้นในบรรยากาศมีค่าต่ำมากอาจทำให้เกิดประกายไฟของไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากประจุไฟฟ้าสถิตย์ในบรรยากาศ และอาจก่อให้เกิดอันตรายเนื่องจากการระเบิดได้ ผู้ทำงานเกี่ยวกับเครื่องวัดจึงต้องตระหนักอยู่ตลอดเวลา โดยทั่วไป

การวัดความชื้นในอากาศกระทำได้ ๒ วิธี

๗.๗.๑ ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute Humidity) ซึ่งหมายถึง มวล หรือปริมาณของไอน้ำในหนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศ

๗.๗.๒ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) หมายถึง อัตราส่วนของความชื้นสมบูรณ์กับความจุของไอน้ำเต็มที่ ซึ่งนิยมแสดงออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\% RH = \frac{Abs}{Cap.} \times 100$$

เมื่อ RH = ความชื้นสัมพัทธ์

Abs. = ความชื้นสมบูรณ์

Cap. = ความชื้นในอากาศที่รับได้เต็มที่ หรือความจุของไอน้ำในอากาศ

ความจุของไอน้ำเต็มที่ หมายถึง ไอน้ำในอากาศที่สามารถจุได้เต็มที่ ซึ่งวัดเป็นหน่วย ลบ.ฟุต ค่าความจุที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นกับอุณหภูมิ และความกดอากาศ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความชื้นในอากาศ ที่นิยมใช้ได้แก่ เครื่องวัดความชื้นแบบกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก (Wet & Dry Bulb Psychrometer) โดยวัดเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิห้องกับ

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง เครื่องวัดความชื้นแบบกลไก (Mechanical Hygrometer) ซึ่งใช้ในการควบคุมความชื้นในห้องปฏิบัติการ หรือบริเวณที่ต้องการความชื้นคงที่ โดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องวัด ซึ่งต้องการความเที่ยงตรงสูง ความชื้นสัมพัทธ์ ไม่ควรเกิน 50% นอกจากนี้ที่กล่าวมายังมีเครื่องวัดความชื้นแบบอื่นอีก เช่น วัดโดยใช้แรงโน้มถ่วง (Gravimetric) และ Psychrometer และแบบอื่น ๆ เป็นต้น

๗.๗.๓ ความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ) คืออัตราส่วนของเศษส่วนโดยโมลของไอน้ำ ในสารผสมต่อเศษส่วน โดยโมลของไอน้ำในสารผสมอิ่มตัว ที่อุณหภูมิและความดันทั้งหมดเดียวกัน พิจารณาไอน้ำเป็นก๊าซอุดมคติ นิยามของความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนของความดันย่อยของไอน้ำที่เกิดขึ้นในสารผสม (P_v) ต่อความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน (P_g)

$$\text{Relative humidity, R.H. } (\phi) = \frac{P_v}{P_g} = \frac{\rho_v}{\rho_g} = \frac{V_v}{V_g}$$

๗.๗.๔ อัตราส่วนความชื้น (ω) คืออัตราส่วนของมวลของไอน้ำ (m_v) ต่อมวลของอากาศแห้ง (m_a)

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622 P_v}{P - P_a}$$

โดยที่ ω มีหน่วยเป็น kg/kg ของอากาศแห้ง ในอากาศแห้งนั้นไม่มีไอน้ำ ดังนั้นจึงมี $\omega = 0$ ถ้าเพิ่มไอน้ำให้แก่อากาศแห้งนั้น พบว่า อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่อากาศนั้น ไม่สามารถรับไอน้ำเพิ่มได้มากไปกว่านั้น ณ จุดนี้ อากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นและเรียกว่า อากาศอิ่มตัว (Saturated air) เกรนของความชื้น (Grain of moisture) คือ หน่วยวัดปริมาณของไอน้ำในอากาศ ความชื้นในอากาศเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการปรับอากาศถ้าในอากาศมีความชื้นสูง การกำหนดขนาดเครื่องปรับอากาศที่จะต้องใช้จะต้องใหญ่กว่าเครื่องที่ใช้ในบริเวณที่มีความชื้นต่ำกว่า สำหรับห้องที่มีขนาดเท่ากัน ทั้งนี้เพราะเครื่องปรับอากาศ จะต้องเพิ่มขนาดเพื่อใช้ในการทำให้น้ำในอากาศ กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เกาะตัวอยู่ในที่ผิวครีบของคอยล์เย็นเพื่อลดปริมาณความชื้นของอากาศ ให้อยู่ในจุดที่พอเหมาะ คือ 50% RH ในการปรับอากาศนั้นนอกจากทำให้อุณหภูมิในห้องลดลงแล้ว ยังต้องควบคุมความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่พอเหมาะ เพื่อให้เกิดความสบายแก่ผู้อยู่ในห้องปรับอากาศนั้นด้วย

ในการปรับอากาศสำหรับห้องที่ใช้คอมพิวเตอร์ ถ้าความชื้นเกินกว่า ๖๐ % RH. แล้ว จะต้องหยุดการใช้คอมพิวเตอร์ทันที มิฉะนั้นเครื่องอาจจะเสียได้ การปรับอากาศสำหรับโรงพิมพ์ จะต้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่ให้เกินกว่า 30% RH. เพราะถ้าเกินกว่านี้ จะทำให้กระดาษติดกันหรือขึ้นราเสียหายได้ ดังนั้น การทำความเข้าใจในเรื่องเกี่ยวกับความชื้นในอากาศจึงเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของระบบปรับอากาศ

๗.๗.๕ ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) คือ น้ำหนักที่แท้จริงของไอน้ำที่มีอยู่ คือ หนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศ ณ สภาพนั้น ๆ เนื่องจากจำนวนน้ำหนักของไอน้ำที่มีในอากาศ ๑ ลูกบาศก์ฟุต มีน้อยมาก จึงนิยมใช้หน่วยวัดเป็น เกรน (Grain)

$$๗,๐๐๐ \text{ เกรน} = ๑ \text{ ปอนด์}$$

$$๑๕.๔ \text{ เกรน} = ๑ \text{ กรัม}$$

๗.๗.๖ จุดน้ำค้าง (Dew point, Tdp) เมื่ออากาศถูกทำให้เย็นลงภายใต้ความดันคงที่ ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่น นั่นคือ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง นั่นเอง

$$Tdp = T_{\text{sat}} \text{ ณ ความดันคงที่}$$

๗.๗.๗ ส่วนประกอบที่สำคัญอื่น ๆ ของอากาศ

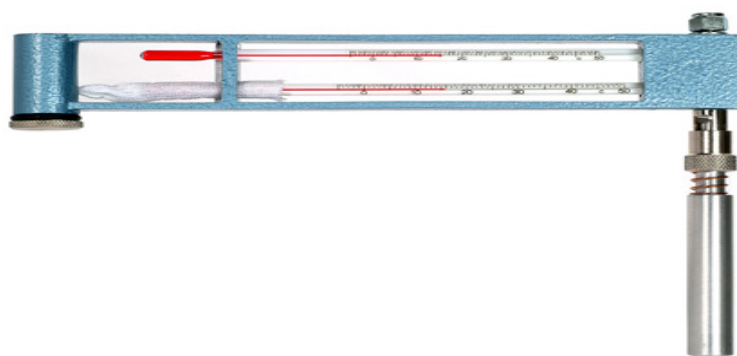
๗.๗.๗.๑ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-Bulb Temperature, Tdb) คือ อุณหภูมิของอากาศชั้นที่ซ็อบกบนเทอร์โมมิเตอร์ชนิดหลอดแก้ว

๗.๗.๗.๒ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-Bulb Temperature, Twb) คือ อุณหภูมิของอากาศชั้นที่ซ็อบกบนเทอร์โมมิเตอร์ชนิดหลอดแก้วที่มีผ้าเปียกหุ้มอยู่ที่กระเปาะและต้องมีลมผ่านเกินกว่า 3 m/s

๗.๗.๘ เทอร์โมมิเตอร์ แบ่งตามลักษณะการใช้ได้ดังนี้

๗.๗.๘.๑ เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะแห้ง (Dry-Bulb Thermometer) คือ เทอร์โมมิเตอร์ ที่ใช้วัดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้กันอยู่ทั่วไป การวัดแบบนี้เรียกว่า อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

๗.๗.๘.๒ เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก (Wet-Bulb Thermometer) คือเทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะแห้ง แต่ต่างกันที่ปลายกระเปาะนั้นมีผ้าหรือสำลีชุบน้ำหุ้มอยู่ อุณหภูมิที่วัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบนี้เรียกว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียก



รูปภาพที่ ๗-๑๙ สลิ่งไซโครมิเตอร์ (Sling Psychrometer)

ในการวัดความชื้นสัมพัทธ์ เราใช้เครื่องมือซึ่งเรียกว่า “ไฮโกรมิเตอร์” (Hygrometer) ซึ่งมีอยู่หลายหลากชนิด มีทั้งทำด้วยกระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไฮโกรมิเตอร์ซึ่งสามารถทำได้เองและมีความน่าเชื่อถือเรียกว่า “สลิ่งไซโครมิเตอร์” (Sling Psychrometer) ประกอบด้วยเทอร์โมมิเตอร์จำนวน ๒ อันอยู่คู่กัน โดยมีเทอร์โมมิเตอร์อันหนึ่งมีผ้าชุบน้ำหุ้มกระเปาะไว้ เรียกว่า “กระเปาะเปียก” (Wet Bulb) ส่วนกระเปาะเทอร์โมมิเตอร์อีกอันหนึ่งไม่ได้หุ้มอะไรไว้ เรียกว่า “กระเปาะแห้ง” (Dry Bulb) เมื่อหมุนสลิ่งไซโครมิเตอร์จับเวลา ๓ นาที แล้วอ่านค่าแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะทั้งสองบนตารางเปรียบเทียบ ก็จะได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

สลิ่งไซโครมิเตอร์ (Sling Psychrometer) คือ เครื่องมือวัดสภาพอากาศแบบพิเศษประกอบด้วย เทอร์โมมิเตอร์ ๒ อัน คือ แบบกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก ในการใช้วัดต้องจับด้ามถือและแกว่งเทอร์โมมิเตอร์ โดยหมุนเป็นวงกลมรอบ ๆ ด้ามถือ ขณะที่ยกเทอร์โมมิเตอร์ ความชื้นที่กระเปาะเปียกจะระเหยตัวเอง ถ้าอากาศมีความชื้นสูง การระเหยตัวของกระเปาะเปียกจะเกิดได้ช้า ความร้อนถ่ายเทได้น้อย อุณหภูมิของกระเปาะเปียกลดลงได้น้อย ถ้าความชื้นของอากาศต่ำ อากาศแห้งก็จะดูดซับความชื้นได้เร็ว ผ้ารอบกระเปาะระเหยได้ดี ความร้อนถ่ายเทออกมาก ทำให้ผิวของกระเปาะลดลงอย่างรวดเร็ว ค่าที่อ่านเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียกได้ต่ำกว่าเมื่อในอากาศมีความชื้นสูง

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงเท่ากับ ๑๐๐ % RH. อุณหภูมิของกระเปาะแห้งและเปียกจะเท่ากัน จากอุณหภูมิที่อ่านได้จาก กระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก สามารถนำไปหาค่าความชื้นสัมพัทธ์จากกราฟความชื้นสัมพัทธ์ (Psychrometric Chart)

๗.๗.๙ แผนภูมิไซโครเมตริก

แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart) เป็นกราฟหรือ แผนภูมิที่ใช้สำหรับพล็อตหรือ ลากเส้นจากค่าอ้างอิงต่าง ๆ เป็นค่าที่วัดได้ หรือต้องการคำนวณ โดยหาจากคุณสมบัติของอากาศและไอน้ำในอากาศ

ในแผนภูมิสามารถบอกสถานะของอากาศได้หลายอย่าง เช่น

หากทราบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และ อุณหภูมิกระเปาะเปียก อ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์จากแผนภูมิได้เลย

หากทราบอุณหภูมิกระเปาะเปียก และ ความชื้นสัมพัทธ์ จะหาค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งได้

หากทราบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และ ความชื้นสัมพัทธ์ จะหาค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกได้

หากทราบอุณหภูมิกระเปาะเปียก และ กระเปาะแห้ง จะหาค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างได้

หากทราบอุณหภูมิกระเปาะเปียก และ ความชื้นสัมพัทธ์ จะหาค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างได้

หากทราบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และ ความชื้นสัมพัทธ์ จะหาค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างได้

เกรนของความชื้นในอากาศ หาได้จากความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เหล่านี้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และ ความชื้นสัมพัทธ์

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และ จุดน้ำค้าง

อุณหภูมิกระเปาะเปียก และ ความชื้นสัมพัทธ์

อุณหภูมิกระเปาะเปียก และ จุดน้ำค้าง

ในฤดูหนาว อากาศภายในห้องที่เหมาะสมสำหรับคนทั่วไป คือ ต้องมีความชื้นสัมพัทธ์ 30 - 35 % อุณหภูมิ 22 - 26 °C

ในฤดูร้อน อากาศที่เหมาะสมคือต้องมีความชื้นสัมพัทธ์ 45-50 % อุณหภูมิ 24 - 26 °C

๗.๘ ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด เป็นคุณสมบัติเฉพาะของ ของไหล เช่นเกี่ยวกับ ความเค้น ความเครียด และ โมดูลัสของความยืดหยุ่น ในเรื่องของวัตถุเกร็ง หรือของแข็ง อาจถือได้ว่า ความหนืด เป็นความเสียดทานภายในของของไหล ในขณะที่ของไหลเคลื่อนที่ เป็นตัวที่จะกำหนดหรือบอกลักษณะการไหลของของไหล ว่าเป็นแบบราบเรียบ ที่เรียกว่าไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow) หรือไหลแบบการไหลวน (Turbulent Flow) หรือกล่าวได้ว่า ความหนืดเป็นปัจจัยกำหนดความยากง่ายของการไหล ของไหลนั่นเอง ค่าความหนืดของของไหล นับว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง เจ้าหน้าที่เปรียบเทียบ ๆ จำเป็นต้องทราบค่าความหนืด

ของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ หรือจะวัดอัตราการไหล เพื่อให้การเปรียบเทียบ ๆ เป็นไปอย่างถูกต้องเที่ยงตรงที่สุดเนื่องจากของไหลเป็นสสาร ซึ่งไม่คงรูปร่างแน่นอน ในการวัดค่าจึงไม่อาจใช้คุณสมบัติของความเค้นความเครียด และโมดูลัสของความยืดหยุ่นมาใช้ได้โดยตรง การวัดความหนืดจึงต้องวัดโดยอาศัยการไหลเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยนิยามความหนืดว่า เป็นอัตราส่วนของความเค้นเฉือน (Shear Stress) หรือแรงเฉือนกับอัตราเร็วของของไหล (Velocity Gradient) ความหนืดที่กล่าวถึงนี้ เป็นความหนืดสัมบูรณ์ ซึ่งเขียนในรูปของความสัมพันธ์ได้เป็น

$$Y = \frac{F/A}{\Delta V/\Delta}$$

เมื่อให้ Y = ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หน่วย Kg/mos

F/A = ความเค้นเฉือน (Shear stress) หน่วย N/m^2

$\Delta V/\Delta$ = เกรเดียนท์ของความเร็ว (Velocity gradient) หน่วย 1/S

การบอกค่าความหนืดที่นิยมอีกแบบ คือแบบ ไคเนมาติก (Kinematic Viscosity) เป็นอัตราส่วนของความหนืดสัมบูรณ์ต่อความหนาแน่นของของไหล (Fluid) ซึ่งในของเหลวจะมีค่า แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิแต่ในก๊าซ (Gas) จะตรงกันข้าม

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าหนืด ที่ใช้กัน ได้แก่ เครื่องวัดความหนืดแบบหมุน (Rotational Viscometer) เครื่องวัดค่าความหนืดแบบหลอดแก้ว (Capillary viscometers) เป็นต้น

๗.๙ การสั่นสะเทือน (Vibration)

การสั่นของเครื่องยนต์ขณะทำงาน จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อความถูกต้อง และประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องยนต์ได้ การวัดการสั่นสะเทือน ทำได้โดยการหาแรงที่กระทำต่อวัตถุที่กำลังสั่นอยู่ด้วยความแรงของการสั่น นอกจากนี้ยังมีแรงโน้มถ่วงของโลก หรือที่เรียกว่าแรงจี (G) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

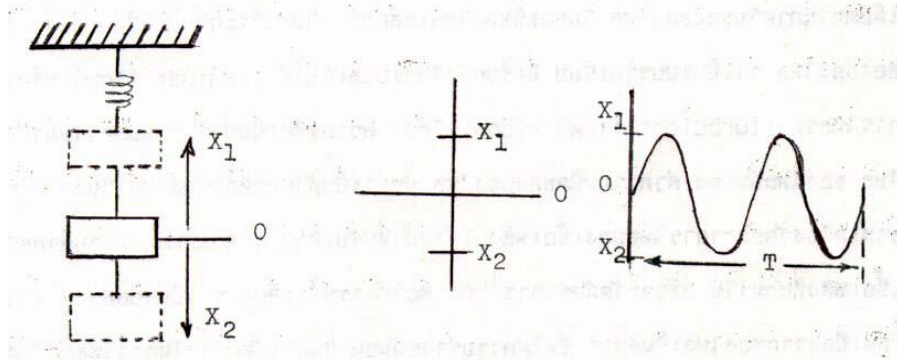
ธรรมชาติของการสั่น วัตถุที่มีการสั่นอย่างอิสระจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ผ่านแกนวออ้างอิงเป็นรอบ ๆ โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง และความถี่ เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น จะดูได้จากที่แสดง

ระยะทาง (Displacement) คือขนาดหรือระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ครบรอบ มักวัดจากยอดถึงยอด (Peak to Peak) จากรูป ซึ่งเป็นการสั่นขึ้น-ลงของมวล ซึ่งแขวนอยู่กับสปริงซึ่งปลายหนึ่งยึดแน่นอยู่ มวลจะสั่นอยู่ในระยะทางจาก X_1 ถึง X_2 ซ้ำ ๆ กัน

อัตราเร็ว (Velocity) ใช้อัตราการสั่น หาได้จากการเคลื่อนที่ในหนึ่งรอบเวลา

ความเร่ง (Acceleration) คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหนึ่งหน่วยเวลา

ความถี่ (Frequency) คือ จำนวนรอบของการสั่นในหนึ่งหน่วยเวลา



รูปภาพที่ ๗-๒๐ การหาค่าความสั่นสะเทือนของวัตถุ

การวัดการสั่น สามารถวัดได้ทั้งแบบกระตุก, แบบเป็นห้วง ๆ หรือ แบบต่อเนื่องก็ได้ วิธีที่นิยมใช้วัด คือ ใช้ ทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีอยู่ ๒ แบบ คือ

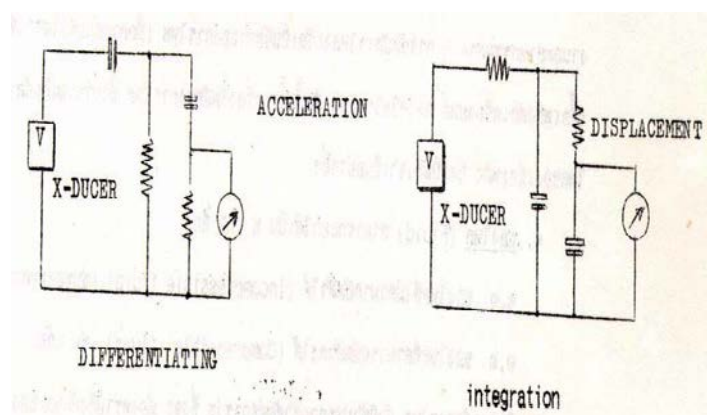
๗.๙.๑ เวลโลซิตีทรานสดิวเซอร์ (Velocity Transducer) ใช้หลักการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กผ่านขดลวดตัวนำ แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวด ผ่านตัวแปลงสัญญาณ แล้วอ่านออกมาในรูปค่าเฉลี่ยของความเร็วในการสั่น การวัดโดยวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจาก

๗.๙.๑.๑ แรงดันขาออกเป็นสัดส่วนกับอัตราเร็วของการสั่น

๗.๙.๑.๒ อัตราของการสั่นจะเพิ่มขึ้น ถ้าขนาดหรือความถี่ของการสั่นเพิ่มขึ้น และทั้งสองหน่วยของการวัด จะสามารถแสดงผลได้พร้อมกัน

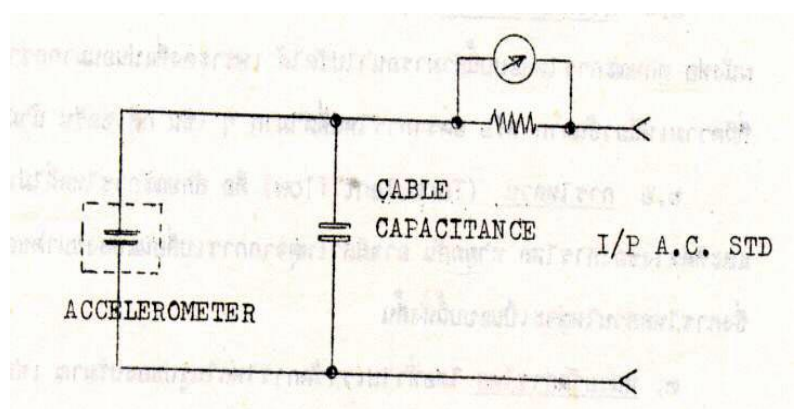
๗.๙.๑.๓ ในเครื่องยนต์ทั่ว ๆ ไป ถ้าการสั่นเปลี่ยนแปลง ความเร็วจะเปลี่ยนสถานะของเครื่องยนต์ด้วย ถ้าความเร็วคงที่ ภาวะของเครื่องยนต์ก็จะคงที่ด้วย

๗.๙.๑.๔ การวัดด้วยวิธีนี้ จะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของความถี่น้อยกว่าวิธีอื่น การนำทรานซิสเตอร์วัดอัตราเร็วไปใช้งาน เราสามารถหาค่าความเร่ง และขนาดของการสั่นได้ โดยใช้เครื่องวัดแบบ เอ.ซี. โวลท์มิเตอร์ ต่อเข้าเป็นวงจรดังรูป หน่วยของความไวคัพจะวัดเป็น mV/in/Sec หรือขนาดของแรงดันไฟฟ้าเนื่อง จากการสั่นต่อหน่วยความเร็วของการสั่น



รูปภาพที่ ๗-๒๑ เครื่องวัดแบบ เอ.ซี. โวลท์มิเตอร์

๗.๙.๒ ตัววัดความเร่ง (Accelerameter) โดยใช้ Piezoelectric ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นผนิกเป็นตัวรับการสั่นแรงที่กระทำต่อมวลของตัวพิคอัพ จะกดลงบนแผ่นผลึก จะทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนไป คล้ายกับการเปลี่ยนค่าประจุในตัวประจุไฟฟ้า



รูปภาพที่ ๗-๒๒ หลักการเครื่องวัดความสั่นสะเทือน

การเปลี่ยนค่าประจุไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ป้อนเข้ามา การใช้ตัววัดความเร่งนี้จะเป็นตัวกำหนดแรงที่ป้อนเข้ามายังเครื่องยนต์ที่มีความเร็วสูงมาก ๆ เพื่อป้องกันเกิดแรงที่เครื่องยนต์เกินขีดการทำงานที่ปลอดภัยของอุปกรณ์ การวัดความเร่งจะต้องวัดขณะที่มีแรงป้อนเข้าเครื่องยนต์

โดยปกติเราจะใช้ตัววัดความเร่งกับเครื่องยนต์รอบจัดเกิน ๑๐, ๐๐๐ รอบต่อนาที เช่น เครื่องยนต์ของ F-16 หน่วยวัดความไวการสั่น มีหลายแบบ เช่น บอกเป็นหน่วยวัดประจุโดยตรง คือ Pico Coulomb ซึ่งสามารถใช้ Signal Conditioner หรือ Charge Amplifier เปลี่ยนกลับมาเป็นค่าของการสั่นปกติได้ แต่ตัววัดความเร่งบางตัว จะมี Signal Conditioner ภายในตัวเอง จึงจ่ายแรงดันออกมาเป็นหน่วย mV/G โดยตรงเลย

๗.๑๐ อัตราการไหล (Flow Rate)

การไหลเป็นตัวที่สำคัญตัวหนึ่งในระบบควบคุม หมายถึง การเคลื่อนที่ของไหลการวัดอัตราการไหล ที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น มิเตอร์วัดน้ำ มิเตอร์วัดน้ำมัน มิเตอร์วัดแก๊ส (ตามปั้มน้ำมัน) การวัดเหล่านี้ เพื่อต้องการหาปริมาณที่ใช้ไป เพื่อคำนวณออกมาเป็นราคาในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ การวัดอัตราไหลจะวัดเป็นอัตราของการไหล เพื่อควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงต่อเครื่องยนต์ กลไกในโรงงาน ดังนั้นทั้งเครื่องวัดอัตราการไหล ทั้งปริมาณและอัตราการไหลของเชื้อเพลิง จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

๗.๑๐.๑. ของไหล (Fluid) สามารถแยกได้เป็น ๒ ชนิด คือ

๗.๑๐.๑.๑ ของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible Fluid) เช่น ของเหลว

๗.๑๐.๑.๒ ของไหลที่สามารถอัดตัวลงได้ (Compressible fluid) เช่น แก๊ส ในการวัดการไหล ยังมีตัวประกอบสำคัญต่อการวัด ซึ่งจะ ต้องทราบถึงลักษณะของการไหล แรงเสียดทานระหว่างของไหลกับภาชนะและค่าความหนืดของของไหลเอง

๗.๑๐.๒ ลักษณะการไหลของของไหล แบ่งได้เป็น ๒ ลักษณะ

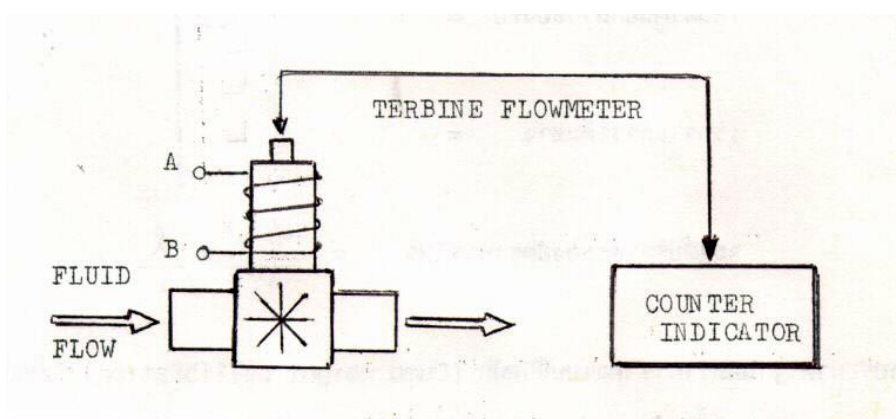
๗.๑๐.๒.๑ การไหลแบบเรียบ (Laminar Flow) คือลักษณะการไหลขนานไปกับความยาวของผนังท่อ ลักษณะการไหลแบบนี้สามารถนำไปวัดได้ เพราะคงที่แน่นอนมากกว่าแบบอื่นมักเกิดกับ Fluid ที่มีความหนืดสูงมาก หรือ อัตราการไหลที่ต่ำมาก ๆ เช่น กลีเซอริน น้ำมันเตา

๗.๑๐.๒.๒ การไหลวน (Turbulent Flow) คือ ลักษณะการไหลที่ไม่เป็นระเบียบ มีความเร็ว และทิศทางของการไหล ทำมุ่มกัน อาจมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อ ท่อหักมุม ฯลฯ ซึ่งการไหลส่วนใหญ่จะเป็นแบบนี้ทั้งสิ้น

๗.๑๐.๓ หน่วยวัดการไหล

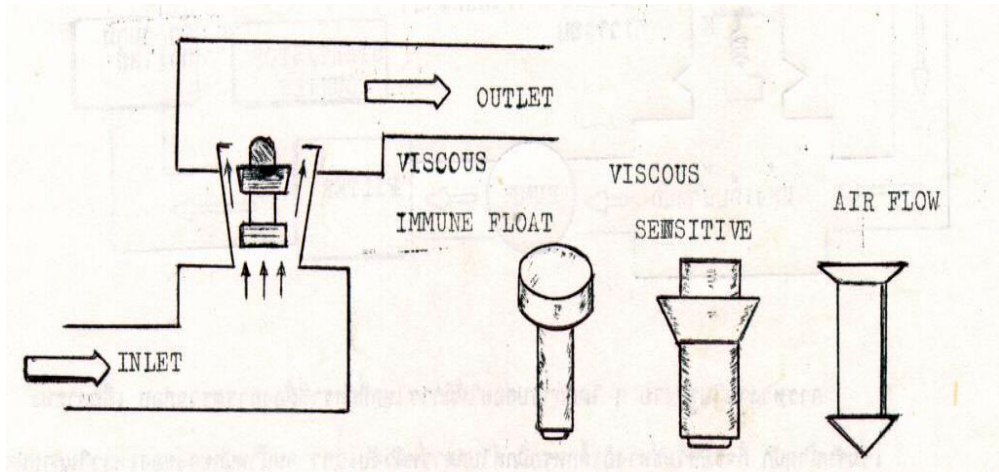
โดยทั่วไปเราวัดการไหลในรูปของปริมาณ เช่น น้ำหนัก ปริมาตร มีหน่วยเป็นลิตร แกลลอน หรือปอนด์ แต่ในกรณีการวัดแก๊ส เนื่องจากความหนาแน่นของแก๊สเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วด้วยอุณหภูมิ และค่าความดันบรรยากาศ เราจึงใช้หน่วยที่แตกต่างไป ๒ หน่วย คือ หน่วยวัดได้จริงกับหน่วยวัดมาตรฐาน โดยคิดหน่วยวัดมาตรฐานจากกฎของแก๊สในอุดมคติ อุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลมีหลายแบบดังต่อไปนี้ คือ

๗.๑๐.๓.๑ ตัววัดแบบกังหัน (Turbine Meter) ใช้หลักการของใบกังหันหมุนติดกับสนามแม่เหล็ก เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เพื่อนำไปอ่านที่ตัวเครื่องวัดที่อ่านซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้มากที่สุด เพราะมีระดับความแม่นยำคงที่ในระยะยาว ค่าแรงดันที่ผลิตได้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วเชิงมุมของใบกังหันและความเร็วเชิงมุมของกังหันจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของการไหล ในการออกแบบจะสามารถจ่ายความถี่ได้ ๑๐๐ - ๕๐๐ เฮิร์ต และยังสามารถจ่ายความถี่สูงมากเท่าใด ก็ยังได้รายละเอียดของการไหลมากเท่านั้น ข้อดีคือใช้ง่าย สามารถต่อเข้ากับเครื่องวัดที่อยู่ไกล ๆ ออกไปเนื่องจากสัญญาณที่ได้เป็น Pulse ที่เหมาะสมสำหรับระบบ Digital หรือ Digital Computer ความแม่นยำตลอดอายุการใช้งาน ประมาณ 0.25% ของ Span และให้ค่า Repeatability ถึง 1.0%



รูปภาพที่ ๗-๒๓ แสดงถึงการวัดอัตราการไหลโดยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

๗.๑๐.๓.๒ Rota Meter ใช้หลักการของแรงที่เกิดจากการไหลไปยกตัวลูกลอย (Float) ให้ลอยขึ้นในหลอดแก้วใสที่ได้ทำการคำนวณปริมาตรไว้เรียบร้อยแล้ว ตำแหน่งที่ลอยตัวในแนวตั้งของท่านจะมีสเกลชี้บอกอัตราการไหลไว้แล้ว ตัวอย่าง ฟุนที่ใช้ แสดงดังรูปข้างล่าง เครื่องวัดแบบนี้ มักจะใช้ประจำอยู่กับที่ เพราะเคลื่อนย้ายไม่สะดวก



รูปภาพที่ ๗-๒๔ แสดงถึงการวัดอัตราการไหลโดยลูกลอยในหลอดแก้ว

๗.๑๐.๓.๓ ตัววัดแบบลูกบอล (Moving Ball Meter) ใช้หลักการของการจับเวลาของการเดินทางของลูกบอล ที่ผ่านไปตามความยาวของท่อที่มีขนาดคงที่ โดยลูกบอลจะมีขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อวัด เพราะแรงเสียดทานของเครื่องวัดชนิดนี้น้อยมาก

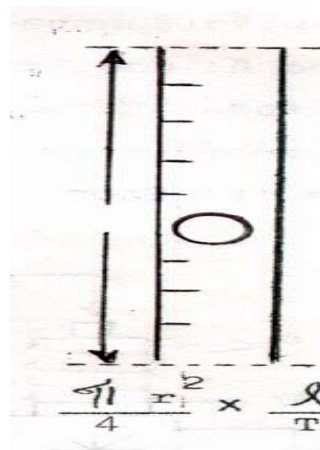
$$\text{ถ้ากำหนดให้ พื้นที่หน้าตัดของท่อ} = \frac{\pi r^2}{4}$$

$$\text{ความยาวของท่อ} = l$$

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ} = r$$

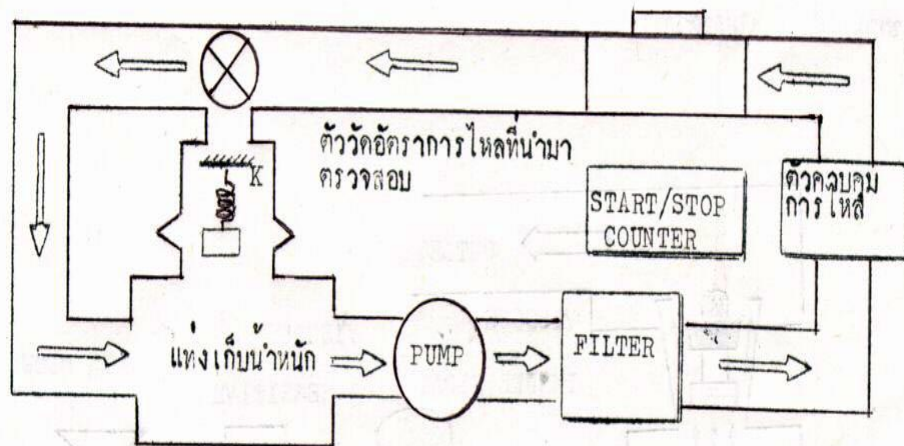
$$\text{เวลาในการเดินทาง} = T$$

$$\text{จะได้ปริมาตรของอัตราการไหล} = \frac{\pi r^2}{4} \times \frac{l}{T}$$



รูปภาพที่ ๗-๒๕ การอ่านค่าอัตราการไหลของลูกบอล

๗.๑๐.๓.๔ ตัวปรับมาตรฐานอัตราการไหลแบบน้ำหนัก (Dump weight calibration) ใช้หลักการชั่งน้ำหนักของไหล ให้ถึงจุดที่ตั้งไว้ตามหน่วยเวลา วิธีนี้เป็นวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการสำหรับการปรับเทียบมาตรฐาน อัตราการไหลของของเหลว



รูปภาพที่ ๗-๒๖ แสดงการวัดอัตราการไหลใช้หลักการซึ่งน้ำหนักของไหล

การทำงานในรูปง่าย ๆ โดยการปล่อยให้มีการไหลที่อัตราที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อภาชนะเริ่มรับน้ำหนัก ก็จะมีสวิทซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ไปสตาร์ทตัวจับเวลา จนน้ำหนักของของเหลวในภาชนะเท่ากับน้ำหนักที่ตั้งไว้ของเหลวทั้งหมดจะไหลลงสู่ถังเก็บพร้อมกับสวิทซ์อิเล็กทรอนิกส์ก็จะไปหยุดเวลาดังนั้นเราก็ได้น้ำหนักในหน่วยเวลาเป็นค่ามาตรฐาน นอกจากตัววัดการไหลทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีตัวทรานซิสเตอร์อีกหลายแบบที่ใช้กันอยู่เช่นโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในเครื่องบินจะใช้หลักการของซิงโครเข้าไปได้ แต่เนื่องจากเครื่องวัดการไหลของชนิดอื่น ๆ นอกจากที่กล่าวมาแล้ว เป็นเครื่องวัดที่มีคุณภาพต่ำ จึงขอกกล่าวแต่เพียงเครื่องวัดที่มีขีดความสามารถในระดับของ PMEL เท่านั้น

๗.๑๑ ความเร็วรอบ (Speed)

ตั้งแต่มนุษย์เริ่มสร้างล้อขึ้นมาใช้งาน ก็ได้เริ่มคิดจะวัดความเร็วของการหมุนของมัน หน่วยที่ใช้จะเป็นจำนวนรอบต่อหน่วยเวลา ใช้ตัวย่อเป็น RPM (Revolution Per Minute) สาเหตุที่เราวัดก็เพื่อจะได้ทราบรอบสูงสุดของเครื่องยนต์ ที่สามารถทำได้โดยไม่เกิดความเสียหาย อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ มีดังนี้

๗.๑๑.๑. Mechanical Tachometer ใช้หลักการของเพลาและลูกตุ้ม ซึ่งติดตั้งอยู่บนแกนเดียวกันกับเพลาหมุนของเครื่องยนต์ มีความแม่นยำ 0.5%

๗.๑๑.๒ Stroboscope ใช้หลักการของการกระพริบของแสงไฟส่องไปยังล้อหมุน ถ้าความถี่ถูกปรับจนกระทั่งมองเห็นส่วนที่หมุนอยู่ปรากฏนิ่ง แสดงว่าความเร็ว ของการหมุนเท่ากับ ความถี่ของออสซิลเลเตอร์หรือผลคูณของความถี่ของออสซิลเลเตอร์ที่สร้างขึ้นภายใน STROBOSCOPE

๗.๑๑.๓. Electrical Tachometer แบ่งออกได้เป็นหลายแบบ

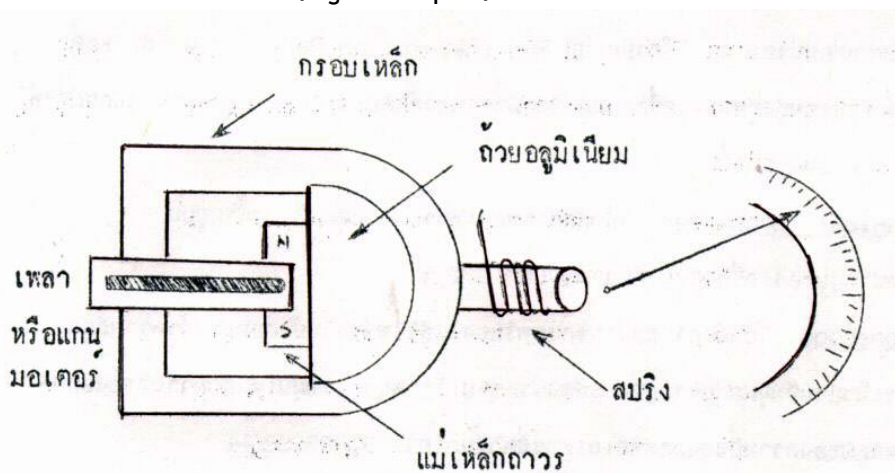
๗.๑๑.๓.๑ Tacho Generator ใช้หลักการของการผลิตแรงดันไฟฟ้าที่แปรเป็นสัดส่วนกับความเร็วที่เพลาโดยใช้เส้นลวด กับขดลวดตัดกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้หลักการเดียวกับ Meter Movement ซึ่งเราอาจทำได้ทั้ง AC Generator และ DC Generator แบบของการใช้แม่เหล็กถาวรติดบนเพลาที่ถูกขับ โดยส่วนหมุน แล้ววัดแรงดันที่ขดลวดเป็นแบบ ๓ เฟส ๒ ขั้วนี้ เรียกว่าชนิดโรเตอร์ ซึ่งแบบนี้จะจ่ายไฟ ๓๕.๕ โวลท์ เมื่อไม่มีโหลด และผลิตความถี่จาก ๐ ถึง ๗๐ เฮิร์ต ส่วนอีกแบบเรียกชนิด เหนี่ยวน่า (Reluctance Tach.Gen) ซึ่งเมื่อเพลาหมุน มันก็จะ

เหนี่ยวนำให้เกิดความถี่จาก ๐ ถึง ๔,๗๕๒ เฮิร์ต และแบบใช้กับความถี่สูงพิเศษถึง ๑๐,๐๑๐ เฮิร์ต ข้อดีคือไม่จำเป็นต้องป้องกันกำลังจากภายนอกให้ในการทำงาน และความเร็วของการหมุนวัดได้แม่นยำ ถึง 0.5% หรืออาจดีกว่า

๗.๑๑.๓.๒ Magnetic Drag cup ใช้หลักการวัดจากผลของการที่แม่เหล็กถาวรการหมุนไป ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และแรงบิดขึ้นในถ้วยอลูมิเนียม ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างแม่เหล็กและกรอบเหล็กกรอบนอก ซึ่งขนาดของแรงบิดที่เกิดขึ้นด้วยจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการหมุนที่แม่เหล็กทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางแรงบิด เป็นเหตุให้ถ้วยอลูมิเนียมหมุนไป จนกว่าจะสมดุลกับแรงต้านของสปริงกันหอย ซึ่งจะมีเข็มชี้ติดอยู่ วิธีนี้ใช้กันมากในเครื่องวัดรอบของรถยนต์

๗.๑๑.๓.๓ เครื่องวัดแบบซิงโคร ในเครื่องบินเราใช้ตัวส่งการอ่านความเร็วรอบโดยใช้ตัวทรานสมิตเตอร์ ซึ่งใช้หลักการของการส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังซิงโครมอเตอร์ ซึ่งจะไปหมุนแม่เหล็กถาวร (Drag Cup) ที่ตัวอ่าน การหมุนของซิงโคร จะหมุนตามกันด้วยความเร็วเดียวกัน เนื่องจากเพลลาของมอเตอร์จะไปหมุนแม่เหล็กถาวร ความแม่นยำของเครื่องวัดประเภทนี้ 0.3% ของความเร็วสูงสุด ๓,๐๐๐ รอบต่อนาที

๗.๑๒ แสงและระบบออปติก (Light & Optic)



รูปภาพที่ ๗-๒๗ แสดงถึงแสงเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

ธรรมชาติของแสง เป็นเรื่องที่น่าฉงนสงสัยมานานแล้ว จนกระทั่งมีนักฟิสิกส์ได้ค้นพบและนำแสงไปใช้ประโยชน์ การศึกษาเรื่องแสง แยกเป็น ๒ วิธีด้วยกัน คือ วิธีแรกศึกษาจากความเชื่อที่ว่า แสงเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอธิบายได้ในลักษณะของคลื่น ส่วนวิธีที่สองเป็นการศึกษาแสงในรูปของการเดินทางของแสงเป็นเส้นตรง ที่เรียกว่า Optic ในห้องปฏิบัติการมาตรฐานเครื่องวัด มีวิธีการวัดแสง โดยใช้เครื่องมือมาตรฐานต่าง ๆ จำนวนมาก และสลับซับซ้อน แต่จะขอนำเรื่องแสงมากล่าวเพียงเล็กน้อย ในเรื่องของการประยุกต์ใช้กับเครื่องวัดชนิดต่าง ๆ

๗.๑๒.๑. ปริมาณแสง (Luminous Flux) คือปริมาณของแสงที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสง มีหน่วยเป็นลูเมน

๗.๑๒.๒ ความเข้มแห่งการส่องสว่าง (Intensity of Illumination) คือปริมาณแสงที่ตกบนพื้นที่หนึ่งหน่วยใน ๑ วินาที มีหน่วยเป็นลูเมนต่อตารางหน่วย หรือกำลังเทียนตารางหน่วย โดยกฎกำลังสองผกผันจะกล่าวได้ว่า ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นที่รับแสง จะเป็นปฏิภาคผกผันกับระยะทางกำลังสองจากแหล่งกำเนิดแสง ถึงตำแหน่งรับแสง

๗.๑๒.๓ Photometry คือ การเปรียบเทียบกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Photometer โดยอาศัยคุณสมบัติของแสงต่อไปนี้

๗.๑๒.๓.๑ คุณสมบัติของแสงทางOptic แสงจะมีการสะท้อน (Reflection) โดยมุมตกเท่ากับมุมสะท้อนในระบบเดียวกัน

๗.๑๒.๓.๒ แสงจะมีการหักเห (Refraction) เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน

๗.๑๒.๓.๓ แสงจะมีการกระจาย (Dispersion) กล่าวคือ ในลำแสงจะเป็นคลื่นผสมที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เมื่อผ่านลำแสงในตัวกลางบางชนิด เช่นปริซึม จะทำให้มีความเร็วต่างกัน และแยกจากกันตามค่าความยาวคลื่นออกมาเป็น สเปกตรัม

๗.๑๒.๔ โพลาริเซชัน (Polarization) คือ การลดความเข้มของแสง โดยการควบคุมการเดินทางของแสงตามระนาบ เพราะแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีการเดินทางเป็นเส้นตรงในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตลอด ถ้าเราทำกล่องตระแกรงให้มีช่องให้แสงผ่านในแนวต่าง ๆ จะสามารถกั้นการเดินทางของแสงในระนาบอื่น ๆ ได้

๗.๑๒.๕ เลนส์ (Lens) เป็นอุปกรณ์ที่หักเหการเดินทางของแสง ให้ผ่านจุดกำหนดซึ่งถ้าจุดที่กำหนดนั้นเป็นแสงจากภาพวัตถุแล้วเอาฉากมารับ จะเกิดรูปภาพที่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้น หรือเล็กลงกว่าเดิมได้ เนื่องจากคุณสมบัติของแสงที่เดินทางเป็นเส้นตรง เราจึงนำคุณสมบัติข้อนี้มาใช้ในการวัดระนาบและความเรียบ มุม และระยะทาง ซึ่งอุปกรณ์ทางด้านแสงที่มีใช้อยู่ใน กว.สอ.ทอ. ชนิดดังนี้.-

๗.๑๒.๕.๑ ไมโครสโคป (Microscope) เป็นกล้องที่ใช้ขยายขนาดของวัตถุ โดยใช้หลักของเลนส์ ๒ เลนส์ โดยเลนส์วัตถุ (อยู่ใกล้วัตถุ) จะทำหน้าที่ขยายขนาดวัตถุ รูปภาพที่เกิดจากเลนส์อันแรก จะถูกขยายซ้ำด้วยเลนส์อันที่สอง โดยใช้กระจกเงาเป็นตัวรวมแสง เพื่อให้เห็นวัตถุ เลนส์ตัวที่สองจะอยู่ใกล้ตา จะขยายเพิ่มขึ้น EYE LENS

๗.๑๒.๕.๒ Optical Flat เป็นผลึกโปร่งใสซึ่งทำจากแก้ว หรือแร่หินเขียว หนุมนานที่ทำด้านข้างเรียบมากภายในหนึ่งส่วนล้านนิ้ว ซึ่งเราจะนำ Optical Flat ไปตรวจสอบความเรียบบนพื้นผิวที่ต้องการวัดความเรียบมาก ๆ เช่น กรณี การตรวจสอบภาพ เกจบล็อก (Gage Block)

๗.๑๒.๕.๓ Monochromatic Light เพื่อให้การใช้ Optical Flat บังเกิดผลโดยวิธีการแทรกสอดของคลื่นแสง เราจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดแสงที่ทราบความถี่แน่นอน โดยทั่ว ๆ ไปจะใช้ลำแสง ฮีเลียม ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ ๒๓.๒ ไมครอนี้ ดังนั้นถ้ามีการแทรกสอดของคลื่นแสง แลบทที่เกิดขึ้นบนวัตถุที่เรียบจะห่างกันเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$) หรือ ๑๑.๖ ไมครอนี้

๗.๑๒.๕.๔ Collimator เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงขนาน เพื่อใช้เป็นมาตรฐานที่มีความแม่นยำสูง ในการตรวจสอบระยะทาง ทั้งแนวระดับ และแนวตั้ง และตรวจสอบความเอียงของแกนทั้งสอง

๗.๑๒.๕.๕ Theodolite เป็นอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้นให้มีระนาบทั้งสาม แกนตั้งฉากกันทั้งหมด โดยตัวกล้องสามารถหมุนได้ทั้งแนวระนาบ และแนวตั้ง โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งเครื่องวัดแบบนี้จะออกแบบมาใช้วัดมุมโดยเฉพาะ เมื่อติดตั้งอุปกรณ์นี้เรียบร้อยแล้ว ไม่ว่าจะกวาดกล้องไปแนวใด ตำแหน่งใด ย่อมอ่านค่ามุมที่เปลี่ยนทั้งแนวนอน และแนวตั้งได้อย่างแม่นยำ และสามารถปรับคืนตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง กล้องแบบนี้มีหลายระดับแต่ระดับที่ดีที่สุด จะวัดได้ละเอียดถึง ๑ ฟลิปดา

จากที่กล่าวมาเป็นเพียงจำนวนเล็กน้อย อุปกรณ์ทาง Optic ได้มีการพัฒนาอย่างมากมายหลายชนิด Theodolite ในปัจจุบัน เพียงแต่เล็งกล้องไปยังเป้าหมายตัวเครื่องวัด จะบอกทั้งพิกัด และระยะทางให้เราทราบทันที ระบบเครื่องเล็งจรวด ปืน เลเซอร์ จะต้องนำเข้ามาปรับเทียบมาตรฐาน โดยเครื่องวัดทาง Optical ทั้งสิ้น

๗.๑๓ รังสี (Radiation)

รังสีที่จะกล่าวถึงในที่นี้ หมายถึง รังสีที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ทั้งในระยะเวลาสั้น ๆ และระยะยาว อันได้แก่ กัมมันตรังสี รังสีอันเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ตลอดจนรังสีที่แผ่ออกมาจากที่วัตถุถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงสูง เช่น X-Ray รังสีจากหลอดส่งสัญญาณที่มีความแรงสูง เช่น สถานีเรดาร์ เป็นต้น เนื่องจากรังสีเหล่านี้ถ้าได้รับในปริมาณที่มากกว่าปกติ เป็นเวลานาน จะทำให้ระบบการทำงานของเซลล์ในร่างกายทำงานผิดปกติหรืออาจถึงเสียชีวิต ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาให้ทราบถึงวิธีการวัดปริมาณรังสีในบรรยากาศ ตลอดจนเครื่องมือที่จะวัดปริมาณรังสีของรังสีเหล่านี้ คือ อัลฟา, เบตา, แกมมา, นิวตรอน และโปรตรอน ตลอดจนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) โดยใช้คุณสมบัติที่ว่าเมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านไปใ้ในอากาศจะทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน อุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีเหล่านี้ มีดังนี้

๗.๑๓.๑ กล้องเก็บอิเล็กตรอน (Ionization Chamber) ใช้หลักการที่ว่า เมื่ออนุภาคผ่านไปใ้ในอากาศ อากาศจะแตกตัวเป็นไอออน ไอออนที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมด้วยกรวยอาโนดกำลังสองแล้วส่งไปยังวงจร สำหรับวัดค่าออกมา

๗.๑๓.๒ โดสิมิเตอร์ (Dosimeter) อาศัยหลักการของ Goldleaf Electroscope โดยนำแผ่นโลหะบาง ๆ สองแผ่นผูกติดกับปลายแท่งอิเล็กโตรด เมื่อมีไอออนในอากาศ ก็จะสะสมที่แท่งอิเล็กโตรด และแผ่นโลหะบาง ทำให้เกิดการผลักกันของประจุชนิดเดียวกัน แผ่นโลหะจะบานออกจากกัน ค่าระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่เปลี่ยนแปลงจะถูกนำไปอ่านบนสเกล

๗.๑๓.๓ แผ่นฟิล์มรับรังสี (Film Badge) อนุภาคของรังสีที่แผ่ออกไป จะทำปฏิกิริยากับสารแผ่นฟิล์มดำ มากน้อยขึ้นกับปริมาณรังสี เช่น ฟิล์มจากการฉายรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น

หน่วยสำหรับวัดปริมาณรังสี ได้มีการพัฒนาจากหน่วยหลักเดิม คือ คูรี ซึ่งกำหนดจากรังสีที่มีอัตราการแตกตัว 3.7×10^{10} นิวเคลียสต่อวินาที ซึ่งเป็นหน่วยที่ใหญ่เกินไป ไม่เหมาะกับการวัดปริมาณรังสีน้อย ๆ เช่น รังสีตกค้างในบรรยากาศ จึงต้องมีการทำหน่วยให้เล็กลง เป็นเบคเคอเรล

๑ เบคเคอเรล เท่ากับ 3.7×10^{10} คูรี

แต่หน่วยที่เราพบเสมอ ๆ คือ เรินกันส์ ซึ่งวัดจากปริมาณของรังสีแกมมา หรือรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงาน ๐.๘๓ เอิร์กต่อน้ำหนักอากาศหนึ่งกรัม

๗.๑๔ สรุป

เครื่องวัดทางกลไฟฟ้า และเครื่องวัดทางฟิสิกส์ทั้งหมดที่กล่าวมา ส่วนใหญ่เป็นเครื่องวัดที่ใช้เป็นมาตรฐานหลักในห้องปฏิบัติการเครื่องวัด หรือ PMEL และเครื่องวัดใช้สนับสนุนกิจกรรมการบินร่วมกับช่างอากาศ หน่วยบินต่าง ๆ ของกองทัพ อุปกรณ์เครื่องวัดเหล่านี้จะถูกส่งมาทำการซ่อม-ปรับเทียบมาตรฐาน ที่กองซ่อมปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด ส.ทอ.ตามระยะเวลาที่กำหนด นอกจากนี้ยังมีชุดเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการออกไปทำการซ่อม และปรับเทียบเครื่องวัดนอกที่ตั้งตามความต้องการของหน่วยผู้ใช้ และตามระยะเวลาที่กำหนด ทกเดือนต่อหนึ่งครั้ง ตามแท่นทดลองเครื่องยนต์ต่าง ๆ ทุกแบบที่ใช้ในกองทัพอากาศ ซึ่งประกอบด้วยระบบเครื่องวัดการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น เครื่องวัดรอบเครื่องยนต์, เครื่องวัดแรงบิด หรือแรงดุด เครื่องวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง และไฮดรอลิก เครื่องวัดการสั่นสะเทือนเครื่องวัดความดันอากาศและน้ำมัน เครื่องวัดอุณหภูมิท่อท้าย ซึ่งระบบเหล่านี้มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ดังนั้นเครื่องวัดเหล่านี้จะต้องมีความถูกต้อง แม่นยำ และได้มาตรฐานอยู่ตลอดเวลา

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กองวิทยาการ กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ. วิชาเครื่องวัด

กรุงเทพฯ: ๒๕๕๑.

สมาคมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). การวัดและเครื่องวัดไฟฟ้า

----- . หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม

ภาษาอังกฤษ

Stephen F. ADAM. Microwave Theory and Application

Prentice Hall INC: 1969

Navy Metrology and Calibration Program. Physical Measurement

USAF. T.O. 00-110N-3

----- .T.O. 11H4-1-5