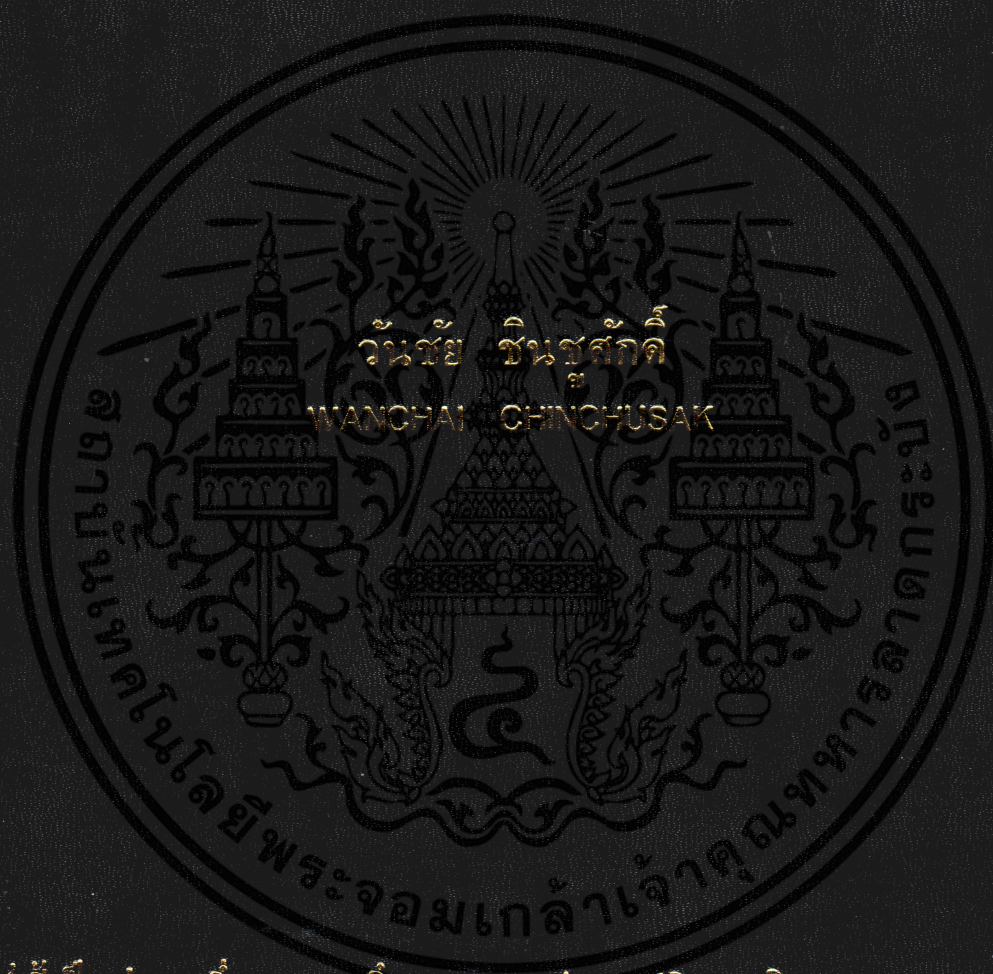


การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

DESIGN OF DC VOLTAGE WORKING STANDARD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-824-003-4

13
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

DESIGN OF DC VOLTAGE WORKING STANDARD



วันชัย ชินชูศักดิ์

WANCHAI CHINCHUSAK

เลขหน้.....
เลขทะเบียน 44947
วัน, เดือน, ปี 16 ส.ค. 2546

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-093-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF DC VOLTAGE WORKING STANDARD



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-324-093-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

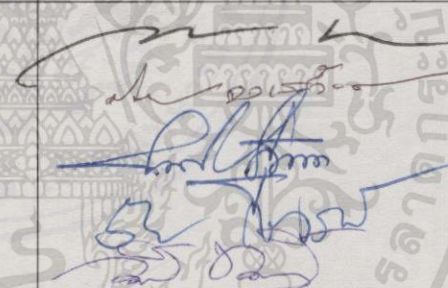
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน
DESIGN OF DC VOLTAGE WORKING STANDARD
ชื่อนักศึกษา นายวันชัย ชินชูศักดิ์
รหัสประจำตัว 42061151
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.พิพัฒน์ เลาสงคราม	
ผศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์	
รศ.สุพรรณ กุลพานิชย์	
รศ.วิริยะ กองรัตน์	
รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 14 ตุลาคม 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัญญา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๕/.....เดือน.....๓/๑๖.....พ.ศ.....๒๕๔๕.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

นักศึกษา

นายวันชัย ชินชูศักดิ์

รหัสประจำตัว

42061151

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งาน ชนิดซีเนอร์ ไดโอดขนาดแรงดันไฟฟ้า 1, 1.018 และ 10 โวลต์ มีเสถียรภาพดีกว่า 100 พีพีเอ็ม/เดือน โดยใช้เทคนิคแบบแรงดันต่างแยกชุด โดยทั่วไปชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานใช้เทคนิคการแบ่งแรงดัน จากผลการทดสอบความเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน 1 และ 1.018 โวลต์ พบว่าชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแรงดันต่างแยกชุดให้ค่าความเสถียรภาพเท่ากับ 60 และ 52 พีพีเอ็ม/เดือน และชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดันให้ค่าความเสถียรภาพเท่ากับ 76 และ 68 พีพีเอ็ม/เดือน ด้วยค่าความไม่แน่นอน ± 8 พีพีเอ็ม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Thesis Title	Design of DC Voltage Working Standard
Student	Mr.Wanchai Chinchusak
Student ID.	42061151
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Years	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Vittaya Tipsuwanaporn

ABSTRACT

This thesis presents the design of working standard DC voltage of zener diode type that generates outputs of 1, 1.018 and 10 volts. Their stabilities are better than 100 ppm/month. The different voltage technique was employed. Generally, the standard voltage of 1 and 1.018 volt based on the voltage divider technique. We have found that the stability results of the different voltage technique are 60 and 52 ppm/month. And the stability results of voltage divider technique are 76 , 68 ppm/month, the measurement uncertainty is ± 8 ppm for confidence level 95 %.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะมื่ออาจสำเร็จลงได้หากว่าขาดผู้ให้แรงบันดาลใจ ผู้วิจัยขอน้อมกราบ
ขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ และทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจให้ตลอดการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ. ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ รศ. พิพัฒน์ เลหาสงคราม และ รศ.วิทยา ทิพย์
สุวรรณพร ซึ่งท่านอาจารย์เป็นผู้แนะนำความรู้และรวมทั้งเทคนิคต่างๆ เพื่อทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้
สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น หัวหน้ากลุ่มงานฟิสิกส์ทั่วไป 1 กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์
บริการและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อม ผู้
อำนวยการศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์(ศทอ.) และเจ้าหน้าที่ ทุกท่าน ที่ให้
ความอนุเคราะห์ในการทดสอบ ElectroMagnetic Compatibility (EMC) ดร. พีระวัฒน์ สมนึก และ
เจ้าหน้าที่ ฝ่ายสนับสนุนทางเทคนิค กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ กรมวิทยา
ศาสตร์บริการ ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและจัดทำอุปกรณ์ประกอบ

คุณประโยชน์และคุณค่าทางวิชาการอันพึงมีทั้งหมดของวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบให้กับผู้วิจัย
ที่สนใจทุกท่านและประเทศชาติ

วันชัย ชินชูศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทํางาน.....	4
2.1 นิยามของแรงดันไฟฟ้า (Definition of voltage).....	5
2.2 ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชนิดซีเนอร์ไดโอด.....	10
2.3 หลักการทํางานของออปแอมป์ (The principle of operational amplifier).....	14
2.3.1 วงจรขยายแบบนอนอินเวอร์ติ้ง (Non-inverting amplifier).....	15
2.4 ทฤษฎีอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.4.1 เทอร์มัลอีเอ็มเอฟ (Thermal EMF).....	16
2.4.2 คอมมอน โหมดรีเจกชัน (Common mode rejection).....	17
2.4.3 สัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature coefficient).....	18
2.4.4 วิธีการกำจัดการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน (Method of Eliminating.....	
Interference).....	21
2.4.5 ลักษณะการชิลด์ระยะห่างไกลและระยะใกล้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
2.4.6 ผลของการชิลด์ (Shielding effectiveness).....	25
2.4.7 แอ็บซอร์พชัน ลอสส์ (absorption loss).....	27
2.4.8 รีเฟลคชัน ลอสส์ (reflection loss).....	27
2.5 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (Stability of DC voltage standard)	28
2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอน(Evaluation of Uncertainty).....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.1 ความไม่แน่นอนมาตรฐาน(Standard uncertainty).....	30
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	38
3.1 การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง.....	39
3.2 การออกแบบวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า.....	44
3.3 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulator Circuit).....	46
3.4 การสร้างและหลักการทํางานของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	50
3.5 การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ อุปกรณ์ประกอบและตัวกล่อง.....	53
3.6 การปรับตั้งชุด MET-10VDC-II.....	57
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	58
4.1 ทดสอบความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	58
4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	59
4.1.2 ผลการทดสอบเสถียรภาพ.....	60
4.2 การทดสอบเสถียรภาพภายใต้สภาวะแวดล้อม.....	63
4.3 การทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานภายใต้สภาวะสัญญาณรบกวนหรือEMC.....	64
4.3.1 การทดสอบ Radiated Immunity.....	64
4.3.2 การทดสอบ Radiated Emission.....	65
4.3.3 การทดสอบเพาเวอร์แม็กเนติกฟิลด์(Power Magnetic Field).....	67
4.4 การทดสอบริบเบิลแฟลคเตอร์.....	68
4.5 การสอบเทียบมาตรฐาน.....	70
4.5.1 การสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	70
4.5.2 การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์.....	71
4.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบและความเสถียรภาพ.....	
ของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	72
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์.....	76
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.1 ทดสอบความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	76
5.1.2 ทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานภายใต้สภาวะแวดล้อม.....	77
5.1.3 ทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานภายใต้สัญญาณรบกวนหรือEMC.....	77
5.1.4 ทดสอบค่ารีปเปิ้ลของชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	77
5.1.5 สอบเทียบมาตรฐาน.....	78
5.2 วิจัยผลลัพธ์การทดลอง.....	78
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
บทความผลงานวิจัยการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดลักษณะพารามิเตอร์ของออปแอมป์ในอุดมคติและข้อกำหนดทั่วไป.....	15
2.2 ค่าเทอร์มิสตีเอ็มเอฟของทองแดงกับโลหะอื่น.....	17
2.3 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากห้องปฏิบัติการ.....	33
2.4 กำหนดแหล่งที่มาและการประเมินค่าความไม่แน่นอนแบบที่ 1.....	36
2.5 กำหนดแหล่งที่มาและการประเมินค่าความไม่แน่นอนแบบที่ 2.....	37
3.1 คุณลักษณะเฉพาะของไอซี LM 336H แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง.....	40
3.2 คุณลักษณะเฉพาะของไอซีออปแอมป์ LM 308 ขยายแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	45
3.3 คุณลักษณะเฉพาะของไอซี LM 317K ควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	47
4.1 การทดสอบ Radiated Immunity กับ MET-10VDC-II ที่ระดับความแรงของสัญญาณ..... ขนาด 3 V/m ที่ย่านความถี่ 30MHz ถึง1GHz.....	65
4.2 แปลงหน่วยของสนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้า.....	67
4.3 ผลการทดสอบเพาเวอร์แม็กเนติกฟิลด์.....	68
4.4 ค่าริปเปิ้ลของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของชุดMET-10VDC-II	69
4.5 ค่าริปเปิ้ลวงจรเรียงกระแสของชุดMET-10VDC-II	69
4.6 ผลการสอบเทียบชุดMET-10VDC-II	70
4.7 ผลการสอบเทียบ UUC1.....	71
4.8 ผลการสอบเทียบ UUC2.....	72
4.9 การประเมินค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบ MET-10VDC-II ที่ 1, 1.018 โวลต์.....	72
4.10 การประเมินค่าความไม่แน่นอนความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน..... ขนาด 1 โวลต์.....	73
4.11 การประเมินค่าความไม่แน่นอนความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน..... ขนาด 1.018 โวลต์.....	74
4.12 การประเมินค่าความไม่แน่นอนความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน..... ขนาด 10 โวลต์.....	75
5.1 เสถียรภาพของชุด MET-10VDC-II.....	76
5.2 เสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดัน.....	76
ก Value of $t_p(V)$ from the t-distribution for degree of freedom V that defines an interval.... $-t_p(V)$ to $+t_p(V)$ that encompasses the fraction p of the distribution.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังการสอบกลับมาตรฐานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	4
2.2 โครงสร้างเวสตันแคดเมียมเซลล์แบบไม่อิมตัว.....	5
2.3 ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานของเวสตันเซลล์แบบไม่อิมตัว.....	6
2.4 โครงสร้างพื้นฐานของโจเซฟสันจังก์ชัน.....	7
2.5 หลักการทำงานตามนิยามของแรงดันไฟฟ้าของโจเซฟสันจังก์ชัน.....	7
2.6 การตอบสนองความถี่ของโจเซฟสันจังก์ชัน ได้สัญญาณขาออกเป็นขั้นระดับ..... แรงดันไฟฟ้า.....	8
2.7 โจเซฟสัน จังก์ชันอาร์เรย์.....	9
2.8 โจเซฟสันอาร์เรย์สร้างขั้นระดับแรงดันไฟฟ้าจำนวน 150,000 ควันไตซ์.....	10
2.9 ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์.....	10
2.10 การชดเชยอุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอด.....	11
2.11 หลักการทำงานแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซีเนอร์ไดโอด.....	12
2.12 วงจรรวมชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซีเนอร์ไดโอดขนาด 10 โวลต์.....	13
2.13 รูปแบบวงจรอปแอมป์ในอุดมคติและวงจรเทียบเท่า.....	14
2.14 วงจรแบบนอนอินเวอร์ตติ้งของไอซีออปแอมป์.....	15
2.15 แรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างโลหะต่างชนิดกัน.....	16
2.16 การเกิดกระแสคอมมอน โหมดกับ โวลต์มิเตอร์.....	18
2.17 การวัดค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิของตัวต้านทานแบบ 4 – เทอร์มินัล.....	20
2.18 แสดงการเกิดสัญญาณรบกวนระหว่างแหล่งกำเนิดคอนาล็อกและอุปกรณ์ดิจิตอล.....	22
2.19 การต่อการ์ดระหว่างแหล่งกำเนิดกับดิจิตอลโวลต์มิเตอร์.....	23
2.20 การถดถอยเชิงเส้นของชุด DC transfer standard เมื่อเปรียบเทียบกับ โจเซฟสันจังก์ชัน.....	29
3.1 แผนผังการทำงานของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแรงดันต่าง.....	38
3.2 การทำงานของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแรงดันต่าง(ก) กับแบ่งแรงดัน(ข).....	38
3.3 วงจรพื้นฐาน ไอซีกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง.....	39
3.4 วงจรภายในของไอซี LM 336H.....	40
3.5 การวิเคราะห์วงจรส่วนการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานของไอซี LM336H.....	41
3.6 (ก) การวิเคราะห์ค่าไบอัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	
(ข) การวิเคราะห์วงจรแบบเสมือนเทวินิน.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 (ก) และ 3.7 (ข) การหาค่าความต้านทานไบอัสของวงจรเสมือนเทวินิน.....	42
3.8 เทคนิคการเพิ่มความไวการปรับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเอาต์พุทช่วง 10 μV ถึง 100 μV	43
3.9 วงจรภายในของไอซี LM308.....	44
3.10 การออกแบบวงจรขยายชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	46
3.11 วงจรชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	47
3.12 วงจรภายในไอซี LM317K.....	48
3.13 ชุดแสดงระดับแรงดันไฟฟ้า.....	49
3.14 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน MET-10VDC-II.....	51
3.15 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 1.0180 โวลต์..... แบบซีเนอร์ ไดโอด.....	52
3.16 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 1.0000 โวลต์..... แบบซีเนอร์ ไดโอด.....	52
3.17 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์..... แบบซีเนอร์ ไดโอด.....	53
3.18 แผ่นวงจรพิมพ์ของชุด MET10-VDC-II ด้านลายทองแดง.....	54
3.19 แผ่นวงจรพิมพ์และอุปกรณ์ของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน..... (ก) ขนาด 10 โวลต์ และ(ข) ขนาด 1, 1.018 โวลต์.....	54
3.20 กล่องบรรจุไอซีกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน (LM336H).....	55
3.21 กล่องใส่ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน MET-10VDC-II.....	56
3.22 การปรับตั้งชุด MET-10VDC-II.....	57
4.1 การทดสอบเสถียรภาพชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (MET-10VDC-II).....	60
4.2 การวัดเสถียรภาพชุดแรงดันไฟฟ้าแบบแบ่งแรงดัน.....	60
4.3 ความเสถียรภาพของชุดMET-10VDC-II ขนาด 1 และ 1.018 โวลต์.....	61
4.4 ความเสถียรภาพของชุดMET-10VDC-II ขนาด 10 โวลต์.....	61
4.5 ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดันขนาด 1 และ 1.018 โวลต์.....	62
4.6 ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดันขนาด 10 โวลต์.....	62
4.7 การวัดเสถียรภาพของ MET-10VDC-II ภายใต้สภาวะแวดล้อม.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ทดสอบเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานภายใต้สภาวะแวดล้อมช่วงอุณหภูมิ..... ตั้งแต่ 20 – 40 องศาเซลเซียส.....	63
4.9 การทดสอบ Radiated Immunity กับ MET-10VDC-II ที่ระดับความแรงของสัญญาณ..... ขนาด 3 V/m และ 10 V/m.....	64
4.10 การทดสอบ Radiated Emission.....	66
4.11 ผลการทดสอบ Radiated Emission.....	66
4.12 การทดสอบผลอันเนื่องมาจาก power magnetic field กับ MET-10VDC-II.....	67
4.13 ค่ารีปเปิลของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	69
4.14 การสอบเทียบชุด MET-10VDC-II ด้วยชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐาน...	70
4.15 แผนผังการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์.....	71
ก1. ความเสถียรภาพระยะยาว (long term stability) ช่วงระยะเวลา 15 สัปดาห์..... (27 กุมภาพันธ์ – 15 มิถุนายน 2545).....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชนิดโซลิดสเตท (solid state) ใช้เป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงตามห้องปฏิบัติการมาตรฐานทางด้านไฟฟ้า ซึ่งเป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงขนาด 1, 1.018 และ 10.0 โวลต์ ให้ค่าเสถียรภาพ 0.3 พีพีเอ็มต่อเดือน และ 3 พีพีเอ็มต่อปี การเก็บรักษาและใช้งานสะดวกกว่าแบบเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐาน (standard cell) หรือเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานแบบสารเคมี (chemical standard cell) แต่กระบวนการถ่ายถอดความถูกต้อง ได้แก่ การสอบเทียบและการทวนสอบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าสำหรับห้องปฏิบัติการต่างๆ เช่น ห้องปฏิบัติการอุณหภูมิ ห้องปฏิบัติการวัสดุอ้างอิงเชิงเคมี และห้องปฏิบัติการงานทดสอบทางไฟฟ้า เป็นต้น การสอบเทียบและทวนสอบเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นที่ควรกระทำอย่างสม่ำเสมอเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของเครื่องมือและให้เกิดความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นการออกแบบและสร้างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานสำหรับห้องปฏิบัติการจะสามารถช่วยลดขั้นตอนการทวนสอบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าอีกทั้งเพิ่มความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชนิดนี้เป็นชุดแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิ (temperature coefficient : tempco) ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม และการกระทบกระเทือน เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์ หรือเรียกว่า MET-10VDC-II ซึ่งเป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานที่วงจรรวม (integrate circuit : IC) หรือไอซี ใช้หลักการทำงานแบบซีเนอร์ไดโอดทำงานร่วมกับไอซี ออปแอมป์ซึ่งเป็นชุดขยายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีเสถียรภาพ 100 พีพีเอ็มต่อเดือน (part per million หรือ ppm /month) สำหรับใช้เป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงกับสำหรับห้องปฏิบัติการทั่วไป

1.2 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากแนวคิดในการออกแบบเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแชนแนล (Multi-Channel Automated Voltage Standard Comparison Equipment : AVSC) [1] ที่มีค่าเทอร์มัลดีเอมเอฟต่ำซึ่งใช้เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความแม่นยำ (accuracy) สูงกว่ากับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความแม่นยำต่ำกว่าหรือมาตรฐานระดับใช้งาน (working standard) และการออกแบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์สำหรับเครื่องเปรียบเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน[2] ประชุมวิชาการ EECON ครั้งที่ 24 ได้นำเสนอการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์ ชนิดซีเนอร์ไดโอด มีเสถียรภาพ 100 พีพีเอ็มต่อเดือน เพื่อใช้เป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงประจำห้องปฏิบัติการทั่วไปสำหรับสอบเทียบมาตรฐานและทวนสอบให้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า ด้วยแนวคิดที่กล่าวมานี้ จึงเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1 และ 1.018 โวลต์ ชนิดซีเนอร์ไดโอดมีความเสถียรภาพ 100 พีพีเอ็มต่อเดือน เป็นการออกแบบเพิ่มเติมจากชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์ ให้ครบสมบูรณ์ตามมาตรฐานสากล อีกทั้งนำเสนอเทคนิคการออกแบบให้มีแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุต (output) ทั้ง 3 ชุด คือ 1, 1.018 และ 10 โวลต์โดยตรง ซึ่งชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโดยทั่วไปจะใช้วิธีการแบ่งแรงดันไฟฟ้า (voltage divider) ที่ 10 โวลต์ ให้ได้แรงดันไฟฟ้าขนาด 1 และ 1.018 โวลต์ จึงมีผลกระทบกับเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้าขนาด 1 และ 1.018 โวลต์ เพราะเสถียรภาพของมันจะเปลี่ยนแปลงตามเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์โดยตรง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชนิดซีเนอร์ไดโอดขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์ ที่มีเสถียรภาพดีกว่า 100 พีพีเอ็มต่อเดือน หรือร้อยละ 0.01 (0.01%) เป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งาน สำหรับใช้สอบเทียบและทวนสอบเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าประจำห้องปฏิบัติการทั่วไป

1.4 ขั้นตอนและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ขั้นตอนและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 5 บทดังนี้

- บทที่ 1 บทนำ และแนวคิดเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน
 - 2.1 นิยามของแรงดันไฟฟ้า
 - 2.2 ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชนิดซีเนอร์ไดโอด
 - 2.3 หลักการทำงานของออปแอมป์
 - 2.4 ทฤษฎีอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
 - 2.5 การประเมินค่าความไม่แน่นอน

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ภาคแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
2. ภาคขยายแรงดันไฟฟ้า
3. ภาคควบคุมแรงดันแรงดันไฟฟ้าและส่วนประกอบอื่นๆ
4. การสร้างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

1. ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานและผลการทดลอง
2. สภาวะแวดล้อมและผลการทดลอง
3. สัญญาณรบกวนหรือEMCและผลการทดลอง
4. ค่ารีปเปิ้ลของชุดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่และผลการทดลอง
5. การสอบเทียบมาตรฐานชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานและดิจิตอลโวลต์มิเตอร์
6. การประเมินค่าความไม่แน่นอนของสอบเทียบมาตรฐานชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

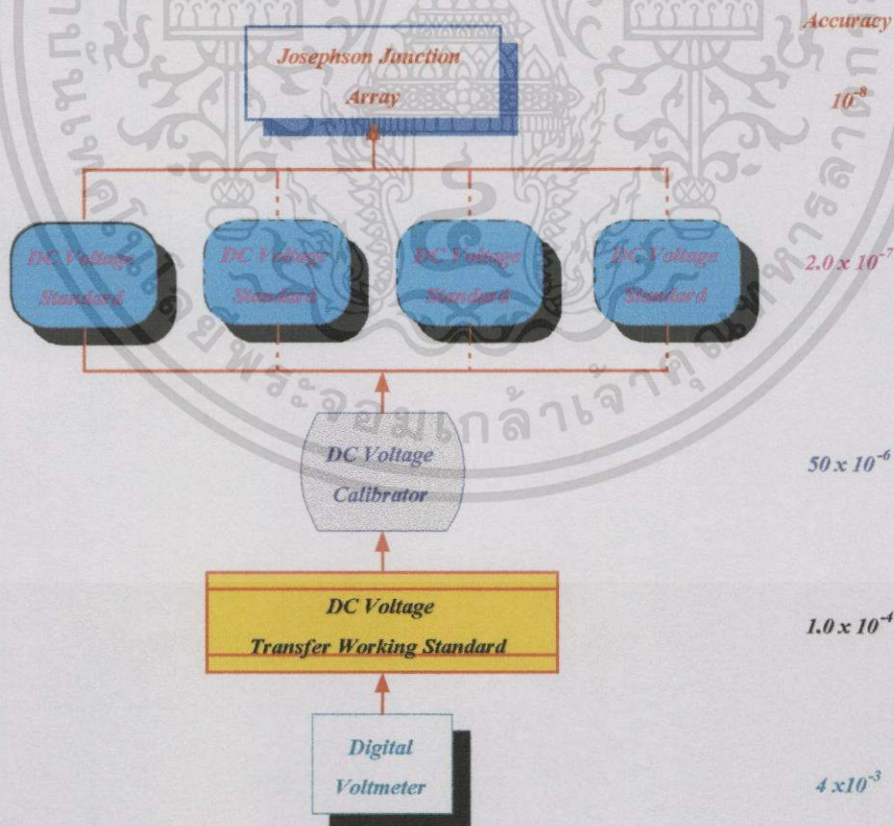
บทที่ 5 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ทั้งหมด



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

การสอบกลับมาตรฐานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (traceability of DC voltage standard) ดังรูปที่ 2.1 แสดงแผนผังการสอบกลับมาตรฐานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เริ่มจากเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปยังแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งาน (working standard) ได้แก่ ชุดถ่ายทอดแรงไฟฟ้ามาตรฐาน (DC voltage transfer working standard) สอบกลับมาตรฐานไปยังมาตรฐานระดับทุติยภูมิ (secondary standard) และสอบกลับมาตรฐานไปถึงมาตรฐานระดับปฐมภูมิ (primary standard) ที่เรียกว่า โจเซฟสัน จังก์ชัน อาร์เรย์ (Josephson junction array) [3] การสอบกลับมาตรฐานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของห้องปฏิบัติการสอบเทียบและทดสอบทางไฟฟ้า ยังมีขั้นตอนที่ซับซ้อน และขั้นตอนการตรวจสอบก่อนการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้านั้นก็คือการทวนสอบ (verification) ซึ่งเป็นระบบการตรวจสอบคุณภาพของการรับรองห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 [4] เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี หลักการทำงานของส่วนต่างๆ และการวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน



รูปที่ 2.1 แผนผังการสอบกลับมาตรฐานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

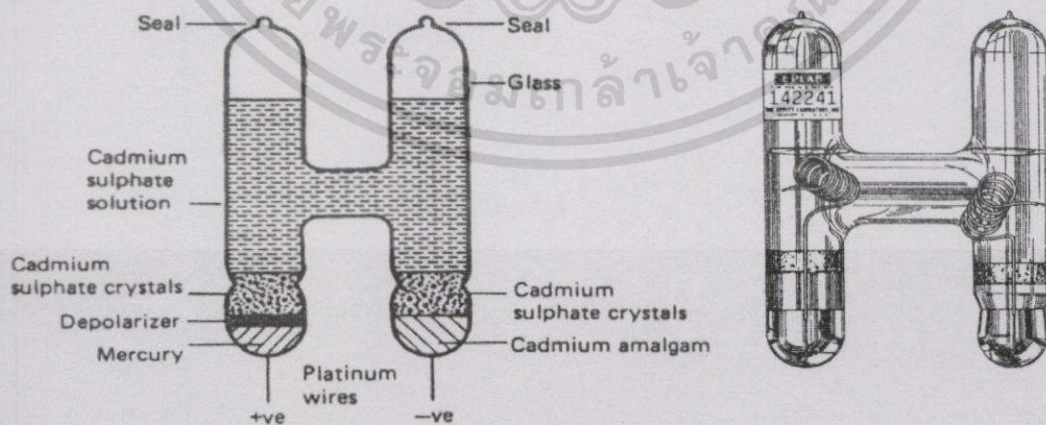
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 นิยามของแรงดันไฟฟ้า (Definiton of voltage)

หน่วยของแรงดันไฟฟ้าที่เรียกกันว่า โวลต์ (volt) เป็นหน่วยมาตรฐานสากลหรือหน่วยเอสไอ (International Standard Unit : SI) กำหนดให้หน่วยโวลต์เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดของตัวนำไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่ 1 แอมแปร์ เมื่อพลังงานที่สูญเสียไปเท่ากับ 1 วัตต์ หลายปีมาแล้วการวัดแรงดันไฟฟ้ากำหนดด้วยเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐาน (standard cell) ซึ่งจะมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 1.01858 โวลต์ และเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

เซลล์ไฟฟ้ามาตรฐาน รูปที่ 2.2 นี้เรียกว่า เซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานชนิดเวสต์ตัน หรือเรียกย่อว่า เวสต์ตันเซลล์ (Weston cell) ขั้วบวกมีปรอทเป็นอิเล็กโทรด และขั้วลบมีแคดเมียมอะมัลกัม (Cadmium amalgam) เป็นอิเล็กโทรด มีแคดเมียมซัลเฟต (cadmium sulphate solution) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และบรรจุองค์ประกอบต่างๆ เช่น ผลึกแคดเมียมซัลเฟต (cadmium sulphate crystals) ไว้ในกระเปาะแก้วรูปตัวเอช (H-shape)

เซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานชนิดเวสต์ตันมีอยู่สองชนิดด้วยกัน ชนิดแรกเป็นเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานแบบอิ่มตัว (saturated standard cell) ชนิดที่สองเป็นเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานแบบไม่อิ่มตัว (unsaturated standard cell) เซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานชนิดแรกสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีผลึกแคดเมียมซัลเฟตเคลือบที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว ส่วนเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานชนิดที่สองเป็นเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานแบบไม่อิ่มตัวด้วยสารละลายแคดเมียมซัลเฟตเข้มข้นจะเกิดการอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เซลล์ไฟฟ้าชนิดที่สองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิของแรงดันไฟฟ้าน้อยมากที่อุณหภูมิห้อง ส่วนเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานแบบอิ่มตัวมีค่าแรงดันไฟฟ้าแปรเปลี่ยนอยู่ประมาณ -40 ไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) มีความเสถียรภาพมากกว่าเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานแบบไม่อิ่มตัว



รูปที่ 2.2 โครงสร้างเวสต์ตันแคดเมียมเซลล์แบบไม่อิ่มตัว

ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติต่างๆ เช่น NIST (National Institute of Standards and Technology) หรือชื่อเดิมคือ NBS (National Bureau of Standards) จัดเก็บรักษาเวสตันเซลแบบอิมตัวเป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับปฐมภูมิ ไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 0.01 องศาเซลเซียส แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเวสตันเซลแบบอิมตัวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.01858 โวลต์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

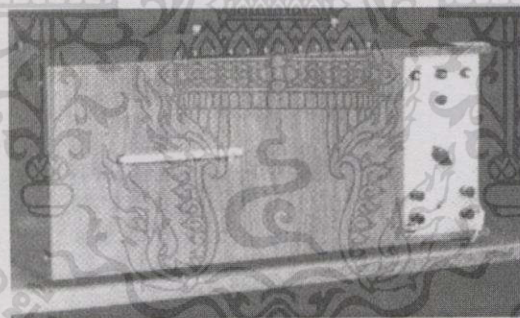
$$e_t = e_{20C} - 0.000046(t-20) - 0.00000095(t-20)^2 + 0.00000001(t-20)^3 \quad (2.1)$$

เมื่อ

e_t = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิ t ใดๆ

e_{20C} = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เวสตันเซลแบบอิมตัวสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานให้คงที่ตลอดช่วงระยะเวลา 10 ถึง 20 ปี ด้วยการดูแลรักษาอย่างดี ค่าลอยเลื่อนหรือครีฟท์ (drift) ประมาณ 1 ไมโครโวลต์ต่อปี เพราะเวสตันเซลแบบอิมตัวจะมีความไวต่ออุณหภูมิ ฉะนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับห้องปฏิบัติการทั่วไปที่จะใช้เป็นมาตรฐานระดับทุติยภูมิ และระดับใช้งาน



รูปที่ 2.3 ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานของเวสตันเซลแบบไม่อิมตัว

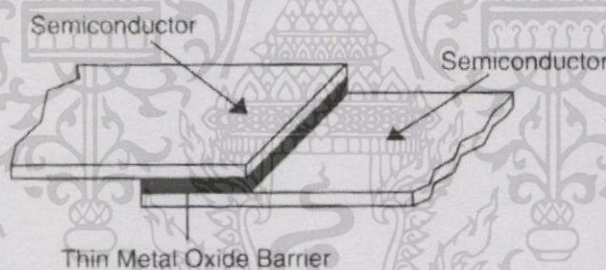
เวสตันเซลแบบไม่อิมตัวดังรูปที่ 2.3 สามารถใช้เป็นมาตรฐานระดับทุติยภูมิและระดับใช้งาน เพราะว่าเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานเหล่านี้มีโครงสร้างคล้ายกันกับเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานทั่วไปแต่ไม่ต้องการควบคุมอุณหภูมิที่แน่นอนมากนัก แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเวสตันเซลแบบไม่อิมตัวมีค่าตั้งแต่ 1.0180 ถึง 1.0200 โวลต์ และความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 0.01 ตลอดช่วงอุณหภูมิจาก 10 ถึง 40 องศาเซลเซียส โดยปกติเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานจัดเก็บอยู่ในกล่อง ค่าความต้านทานภายในของเวสตันเซลมีค่าตั้งแต่ 500 ถึง 800 โอห์ม กระแสไหลออกจากเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานเหล่านี้จะไม่เกิน 100 ไมโครแอมป์ เพราะว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้รับผลกระทบจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ลดลงภายในเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

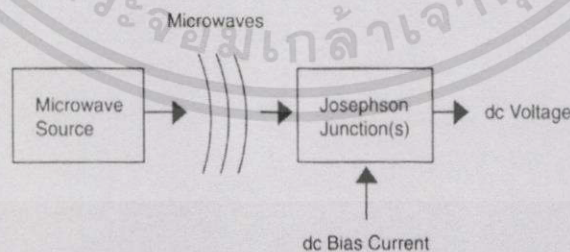
เซลล์ไฟฟ้ามาตรฐานอาจได้รับความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและยังมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเป็นฟังก์ชันของปฏิกิริยาเคมีและไม่ได้สัมพันธ์กันโดยตรงกับค่าคงที่ทางวิทยาศาสตร์ การค้นพบค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบใหม่เป็นผลงานของ ไบรอัน โจเซฟสัน (Brian Josephson) ในปี พ.ศ. 2505 พบว่าการเชื่อมต่อแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดังรูปที่ 2.4 แล้วเก็บไว้ที่ความเย็นใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์ (absolute temperature) ภายใต้การแผ่คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ จะเกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมจุดเชื่อมต่อนั้นดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับความถี่ของการแผ่รังสี ดังสมการที่ 2.2

$$V = \frac{\hbar f}{2e} \quad (2.2)$$

- ที่ V : Junction voltage
 \hbar : Planck's constant (6.63×10^{-34} J-s) = nh
 e : ประจุของอิเล็กตรอน (1.602×10^{-19} C)
 f : ความถี่ย่านไมโครเวฟ (GHz)



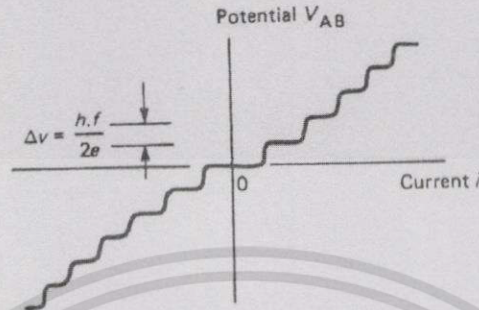
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของโจเซฟสันจังก์ชัน



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานตามนิยามของแรงดันไฟฟ้าของโจเซฟสันจังก์ชัน

แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานจะสัมพันธ์กันกับความถี่และเวลา เพราะว่าความถี่ของการแผ่รังสีเท่านั้นที่จะแปรผันตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.2 เมื่อความถี่ของการแผ่รังสีไมโครเวฟจะถูก ล็อกอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับอะตอมมิกคล็อก (atomic clock) และรูปที่ 2.6 เป็นการตอบสนองความถี่ของโจเซฟสันจังก์ชันความแม่นยำของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน เมื่อรวมค่าความแม่นยำของระบบทั้งหมดเท่ากับ 1×10^{-8}



รูปที่ 2.6 การตอบสนองความถี่ของโจเซฟสันจังก์ชันได้สัญญาณขาออกเป็นขั้นระดับแรงดันไฟฟ้า

โจเซฟสันจังก์ชันเป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เกี่ยวกับสารตัวนำยิ่งยวดซึ่งสัมพันธ์กันระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่ ด้วยอัตราส่วนของค่าคงที่มูลฐาน (ratio of fundamental constants : e/h) โจเซฟสันอาร์เรย์ (Josephson array) ใช้วงจรรวมที่มีจำนวนโจเซฟสันจังก์ชันชนิดอินทรินซิก (intrinsic) บรรจุอยู่สามารถสร้างแรงดันให้เป็นอิสระต่อกันซึ่งใช้แทนหน่วยโวลต์ในระบบหน่วยเอสไอ ที่สัญญาณขาออกของโจเซฟสันจังก์ชันกำหนดให้เป็นดังสมการที่ 2.3 นี้

$$U_j = \frac{nf}{K_{j-90}} \quad (2.3)$$

U_j : Junction Voltage

f : frequency(GHz)

K_{j-90} : 483 597.9 GHz/V

n : จำนวนเต็ม

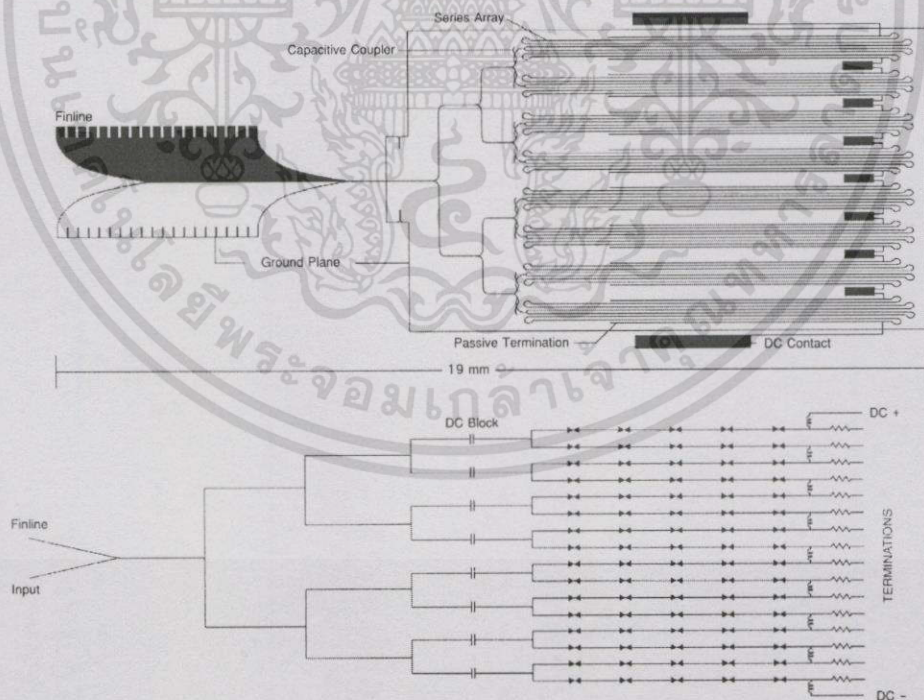
อธิบายในสมการโจเซฟสันเอฟเฟกต์ด้วยค่าคงที่ของโจเซฟสัน(Josephson constant) แทน

K_j : จะเท่ากับ 2 เท่าของ e/h

e : ประจุอิเล็กตรอน

h : ค่าคงที่ของพลังค์

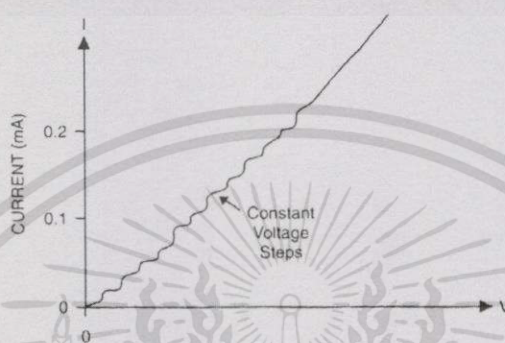
ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2531 คณะกรรมการชั่งตวงวัดระหว่างชาติ (Comitte International des Poids et Measures : CIPM) กำหนดให้ห้องปฏิบัติการมาตรวิทยาแห่งชาติทั่วไปใช้ค่าคงที่ของโจเซฟสันเดียวกันค่าที่ยอมรับนี้คือ K_{j-90} : 483 597.9 GHz/V ค่า K_{j-90} ที่ได้รับการยอมรับนี้ประกาศใช้อย่างเป็นทางการเมื่อเดือน มกราคม พ.ศ. 2535 สังเกตว่าค่า K_{j-90} กำหนดให้เป็นค่าคงที่ของโจเซฟสันซึ่งค่านี้ไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่าคงที่ทางฟิสิกส์ $K_j = 2e/h$ แต่เป็นค่าที่ใช้ในการตกลงร่วมกันระหว่างชาติ ต่อมาได้มีการกำหนดให้โจเซฟสันเอฟเฟ็ค (Josephson effect) ใช้แทนโวลต์ ในระยะแรกค่อนข้างมีปัญหาเพราะว่าค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำมากประมาณ 10 มิลลิโวลต์ต่อหนึ่งจังก์ชัน ต่อมาได้มีการพยายามต่ออนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นแต่ก็ยังติดปัญหามีข้อจำกัดด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้แต่ละจังก์ชัน ปัญหาของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับจังก์ชันแก้ไขด้วยการสร้างตัวเก็บประจุต่ออนุกรมเข้ากับจังก์ชันและป้อนสัญญาณไมโครเวฟไฟฟ้ากระแสสลับที่ข่านความถี่เหนือความถี่พลาสมา (plasma frequency) ซึ่งเป็นธรรมชาติของการเรโซแนนซ์ด้วยจังก์ชันของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อป้อนกระแสให้กับตัวเก็บประจุเหล่านั้น ก็จะได้ค่าเป็นขั้นระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ตกรวมจังก์ชันเมื่อกระแสไบอัสเข้าใกล้ศูนย์ และด้วยเทคโนโลยีได้จัดทำเป็นวงจรรวมโจเซฟสันซีรีส์อาร์เรย์ (Josephson series array) ดังรูปที่ 2.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากจำนวนจังก์ชันที่ต่ออนุกรมกัน 18,992 จังก์ชัน โดยขนานกัน 16 จังก์ชัน และอนุกรมกัน 1,187 จังก์ชัน



รูปที่ 2.7 โจเซฟสัน จังก์ชันอาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าความจุจำนวนจังก์ชัน 1,187 จังก์ชัน ที่มีลักษณะคล้ายเส้นไมโครสตริบ (microstrip line) เมื่อปล่อยคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟผ่านไปยังที่จุดสมดุลย์อิมพีแดนซ์ ส่วนที่ด้านปลายของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแต่ละชุดจะถูกใช้แยกวงจรกระแสไฟฟ้าสลับและกระแสตรง ชุดอาร์เรย์จะสร้างเป็นขั้นระดับแรงดันไฟฟ้าจำนวน 150,000 ควันไทซ์ (quantized) รูปที่ 2.8 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเสถียรภาพ 3×10^{-10} (300 zeta parts) ที่ย่านความถี่ไมโครเวฟ



รูปที่ 2.8 โจเซฟสันอาร์เรย์สร้างขั้นระดับแรงดันไฟฟ้าจำนวน 150,000 ควันไทซ์

2.2 ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชนิดซีเนอร์ไดโอด

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน ดังรูปที่ 2.9 ใช้เป็นระดับมาตรฐานอ้างอิง (reference standard) สำหรับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดควบคุมแรงดันไฟฟ้าบรรจุไว้ในชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำให้มีเสถียรภาพดีขึ้น ชุดควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง ± 0.03 องศาเซลเซียส ทำให้ได้เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าขาออกหรือเอาต์พุต 0.3 พีพีเอ็ม/เดือน และ 3 พีพีเอ็ม/เดือน มีแรงดันเอาต์พุต 3 ชุด คือ 1, 1.018 และ 10 โวลต์ สามารถใช้เป็นเครื่องมือถ่ายทอดความถูกต้องเครื่องมือสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน และสามารถเคลื่อนย้ายจากสถานที่หนึ่งและไปติดตั้งยังอีกสถานที่หนึ่งได้ เสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานสามารถที่จะกลับคืนสภาพได้อย่างรวดเร็วที่ ± 1 พีพีเอ็มภายในเวลา 30 นาที

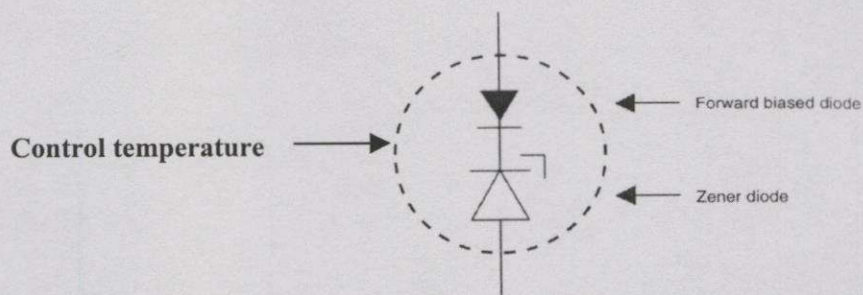
ตั้งแต่มีการค้นพบสารกึ่งตัวนำใช้ทำอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อปี พ.ศ. 2493 ซีเนอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ ในยุคแรกซีเนอร์ไดโอดมีเสถียรภาพไม่ดีนักเพราะว่ามีสัญญาณรบกวนสูงมาก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาซีเนอร์ไดโอดให้มีเสถียรภาพและคุณสมบัติอื่นๆ ดีกว่าเซลล์ไฟฟ้ามาตรฐาน



รูปที่ 2.9 ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์ [5]

ซีเนอร์ไดโอดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้มีให้เลือกหลากหลายชนิด รูปทรง ความแข็งแรงทนทาน ต่อการกระแทกกระเทือนและแรงสั่นสะเทือน ซีเนอร์ไดโอดส่วนมากจะมีค่า tempco ดังนั้นควรเลือกไดโอดที่มีค่า tempco ต่ำและมีวงจรควบคุมอุณหภูมิเพื่อแก้ไขและชดเชยให้เป็นศูนย์ เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง 2 ถึง 3 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.10 ในการผลิตเพื่อเชิงการค้า ค่า tempco ของซีเนอร์ไดโอดเท่ากับ ± 2 มิลลิโวลต์ต่อองศา ได้ถูกนำมาใช้ในเครื่องมือวัด และอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และชุดสอบเทียบเครื่องมือวัด (DC voltage calibrator) เป็นต้น การใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง มีช่วงแรงดันไฟฟ้าขนาด 6.2 - 6.3 โวลต์ ใช้เป็นเหมือนชั้นที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้า (shunt voltage regulator) ซึ่งเป็นชุดป้องกันความเสียหายจากการลัดวงจร ที่ขั้วต่อเอาต์พุต และขาเข้าหรืออินพุต (input) เมื่อไม่มีการลัดวงจรเกิดขึ้นก็จะมีกระแสออกอย่างรวดเร็วและหากว่ามีการลัดวงจรกระแสลดต่ำลงจะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปตามกฎของโอห์ม

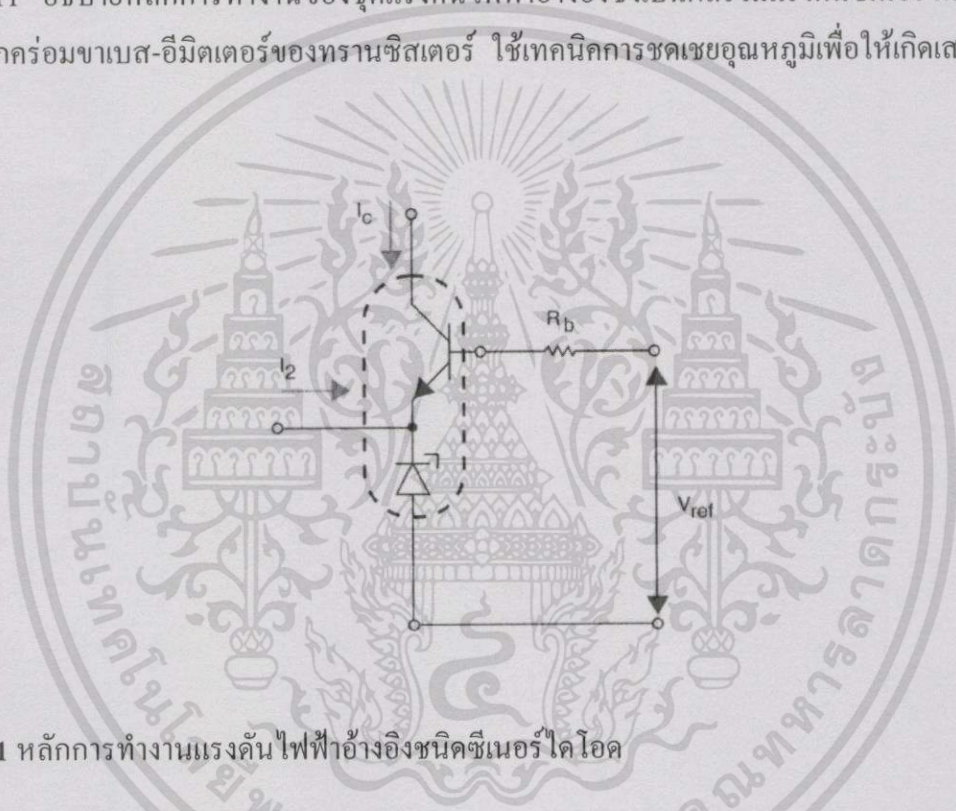
ซีเนอร์ไดโอดสามารถให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการแรงดันของซีเนอร์ไดโอดสามารถเชื่อมต่อเพื่อกลับแรงดันอินพุตแบบโฟลโลเวอร์ (voltage follower) ชุดบัฟเฟอร์ที่ขยายแรงดันเอาต์พุตจะจ่ายกระแสตามที่ต้องการ แรงดันของซีเนอร์ไดโอดจะลดลงที่ละน้อยสาเหตุจากเทอร์มัลอีเอ็มเอฟในการต่อสายและสวิตช์อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าขนาด 6.2 โวลต์ ก็ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน



รูปที่ 2.10 การชดเชยอุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอด
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

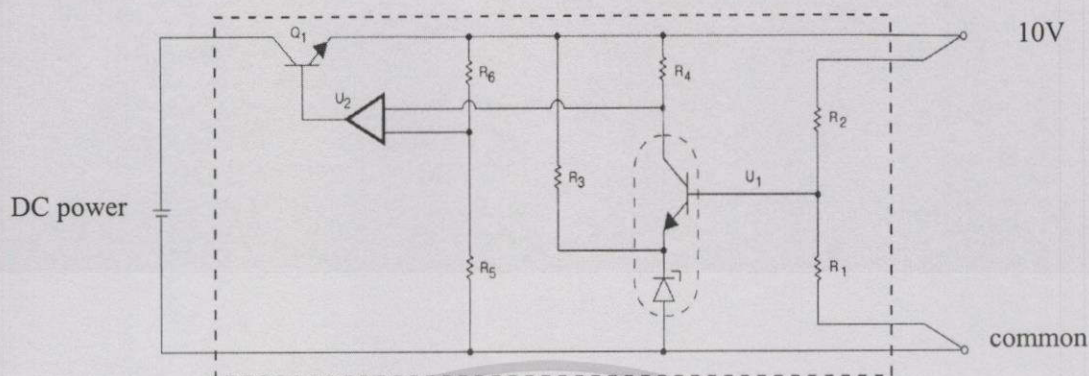
ให้กับห้องปฏิบัติการ แรงดันไฟฟ้าขนาด 10 โวลต์ หรือแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทริคูลให้ เป็น 10 โวลต์ เป็นค่าที่เหมาะสมมากกว่าเพราะง่ายสำหรับการถ่ายทอดความถูกต้อง ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานในห้องปฏิบัติการจึงถูกออกแบบให้จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 10 โวลต์หรือทั้ง 10 โวลต์ และ 1.018 โวลต์ ได้จากแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 6.2 โวลต์ ส่วนชุดขยายแรงดันไฟฟ้าจะแยกออกจากชุดซีเนอร์ไดโอดและสามารถจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงขนาดเท่ากัน อีกทั้งมีการ จำกัดกระแสเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น

ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานเป็นวงจรรวม ประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดและทรานซิสเตอร์ รูปที่ 2.11 อธิบายหลักการการทำงานของชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งเป็นผลรวมแรงดันซีเนอร์ไดโอดและแรงดันตกคร่อมขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ใช้เทคนิคการชดเชยอุณหภูมิเพื่อให้เกิดเสถียรภาพ ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซีเนอร์ไดโอด

ชุดขยายแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมีข้อดีอยู่ 2 ประการด้วยกันเมื่อใช้ร่วมกับซีเนอร์ไดโอด ประการแรกกระแสที่อยู่ในตัวซีเนอร์ไดโอด (I_2) สามารถกำหนดได้อย่างอิสระที่ขาเบส (base) ของทรานซิสเตอร์ เพราะฉะนั้นกระแสที่ขาคอลเลกเตอร์ (current collector : I_C) สามารถปรับให้ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิ เข้าใกล้ศูนย์ในช่วงอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ และประการที่สองตัวทรานซิสเตอร์ในชุดขยายแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสามารถให้อัตราขยายสูง ซึ่งจะสอดคล้องกันกับอัตราขยายของชุดขยายแรงดันไฟฟ้าลบป้อนกลับ (negative feed back amplifier) เพื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตสูงขึ้น

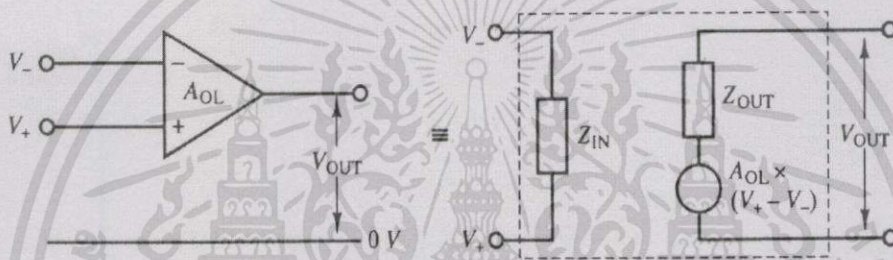


รูปที่ 2.12 วงจรรวมชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซีเนอร์ไดโอดขนาด 10 โวลต์

จากรูปที่ 2.12 สามารถอธิบายวงจรรวมของชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซีเนอร์ไดโอดขนาด 10 โวลต์ ชุดขยายแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (U_1) เป็นชุดขยายแรงดันเอาต์พุต 10 โวลต์ และเสถียรภาพขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของชุดขยายแรงดันไฟฟ้าและอัตราส่วนความเสถียรภาพของตัวต้านทานแบบต่ำ ให้แรงดันไฟฟ้าขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์ มีค่าเสถียรภาพเท่ากับ 0.3 พีพีเอ็ม/เดือน และ 3 พีพีเอ็ม/ปี ทั้งใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทั่วไปหรือแบตเตอรี่สำรองที่จ่ายกระแสแบบต่อเนื่องนานถึง 72 ชั่วโมง พร้อมระบบป้องกันการลัดวงจรที่จ่ายกระแสได้ 10 มิลลิแอมป์ มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุต 0.1 พีพีเอ็ม ขณะมีการต่อโหลดอยู่ข้อเสียของการแยกชุดขยายแรงดันในทางกลับกันชุดขยายแรงดันอาจจะรวมค่าผิดพลาดปริมาณหนึ่งเข้าไปด้วยกับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานนั้น การชดเชยค่าคริปต์และสัญญาณรบกวนในชุดขยายแรงดัน ค่าคริปต์ในชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้า และในชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสิ่งต่างๆเหล่านี้จะรวมเข้าไปโดยตรงกับค่าคริปต์ ในซีเนอร์ไดโอด ส่งผลกระทบให้กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 10 โวลต์ ถ้าเป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ 1.0 และ 1.018 โวลต์ โดยทั่วไปจะใช้แบบแบ่งแรงดันไฟฟ้าจาก 10 โวลต์ โดยใช้ตัวต้านทานหนึ่งตัวหรือมากกว่ามาแบ่งแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นค่าผิดพลาดก็จะรวมอยู่กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 10 โวลต์ และค่าผิดพลาดเนื่องจากคริปต์ในตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าและการปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ (potentiometer) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำ การดูแลรักษาเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานทำได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและติดตามค่าความเสถียรภาพเทียบกับเวลาโดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 ไมโครโวลต์ ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชนิดซีเนอร์ไดโอดอาจจะแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าหยุดทำงานลงหรือมีการเปิด-ปิดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าหรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นสำหรับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความเสถียรภาพสูงควรจะจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา

2.3 หลักการทำงานของออปแอมป์ (The principle of operational amplifier)

ออปแอมป์ (operational amplifier : op-amp) [6] ได้รับการออกแบบให้เป็นวงจรขยายแบบวงจรรวมเพื่อขยายสัญญาณจากกระแสตรงไปจนถึงสัญญาณที่มีความถี่หลายกิโลเฮิร์ต ออปแอมป์โดยปกติจะไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวของมันเองแต่จำเป็นต้องได้รับการป้อนกลับจากอุปกรณ์โครงข่ายภายนอก สร้างสัญญาณที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงซึ่งจะขึ้นอยู่กับชุดอุปกรณ์ป้อนกลับสัญญาณด้วย โดยทั่วไปออปแอมป์จะมีอินพุตอยู่สองอินพุตกับหนึ่งเอาต์พุตด้วยกัน แรงดันที่ขั้วเอาต์พุตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างระหว่างแรงดันที่ขั้วอินพุต รูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบวงจรและวงจรเทียบเท่าของออปแอมป์



รูปที่ 2.13 รูปแบบวงจรออปแอมป์ในอุดมคติและวงจรเทียบเท่า

ถ้าเราให้ออปแอมป์มีพฤติกรรมเป็นแบบอุดมคติ เราสามารถคำนวณค่าอุปกรณ์โครงข่ายโดยพิจารณาอย่างง่ายตามตารางที่ 2.1 เป็นข้อกำหนดลักษณะพารามิเตอร์ของออปแอมป์ การคำนวณเหล่านี้สามารถดัดแปลงได้หากว่าจำเป็นที่นำไปใช้ในลักษณะไม่ใช่ออปแอมป์ทางอุดมคติในทางปฏิบัติจริงรูปที่ 2.14 แสดงวงจรออปแอมป์และวงจรเทียบเท่ารวมถึงชุดอุปกรณ์โครงข่ายประกอบและลักษณะที่เปลี่ยนแปลงได้มาจากสองเงื่อนไขดังนี้

$$[i_+ = i_- = 0] \text{ และ } [V_+ = V_-] \quad (2.4)$$

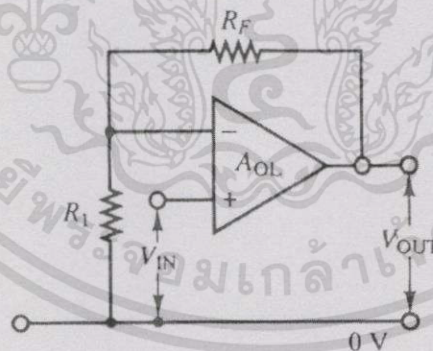
เงื่อนไขที่สองผลลัพธ์จากการสมมติว่า $A_{OL} \rightarrow \infty$: เพราะว่ $V_{OUT} = A_{OL}(V_+ - V_-)$ และ V_{OUT} เป็นปริมาณที่วัดได้ ต่อมาเราจะได้ว่าแรงดันต่าง $(V_+ - V_-) \rightarrow 0$ เช่น $V_+ = V_-$ เราสามารถอธิบายการใช้เงื่อนไขที่ได้มาจากเปลี่ยนแปลงลักษณะ (transfer characteristics) ดังตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดลักษณะพารามิเตอร์ของออปแอมป์ในอุดมคติและข้อกำหนดทั่วไป

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดลักษณะพารามิเตอร์ของออปแอมป์ในอุดมคติและข้อกำหนดทั่วไป

Parameter	Ideal op-amp	Typical op-amp
D.C. open loop gain (A_{OL})	∞	100 dB(10^5)
Input impedance (Z_{IN})	∞	2M Ω
Output impedance (Z_{OUT})	0	75 Ω
Input offset voltage (V_{OS})	0	1 mV
Temp. coeff. Of input offset voltage(γ)	0	5 μ V $^{\circ}$ C $^{-1}$
Input bias current (i_B)	0	80 nA
3 dB bandwidth 0 to (f_B)	0 to ∞	0 to 10 Hz
Common mode rejection ratio(CMRR)	∞	90 dB

2.3.1 วงจรขยายแบบนอนอินเวอร์ตติ้ง (Non-inverting amplifier)

วงจรขยายแรงดันแบบนอนอินเวอร์ตติ้งจากรูปที่ 2.15 เป็นการต่อสัญญาณเข้ากับขาอินพุททั้งบวก(+) และลบ (-) ของไอซีออปแอมป์แบบขั้วปกติ ประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือแรงดันอินพุท (V_{IN}) สมการที่ 2.5 และแรงดันเอาต์พุท (V_{OUT}) สมการที่ 2.6 วงจรแบบนอนอินเวอร์ตติ้งนี้จะได้อัตราขยายแรงดัน (A_{OL}) แบบทวีแรงดันดังสมการที่ 2.7 โดยการกำหนดค่าความต้านทานป้อนกลับ (R_F) กับค่าความต้านทานอินพุท (R_I) เท่ากันก็จะได้อัตราขยายสูงสุด



รูปที่ 2.14 วงจรแบบนอนอินเวอร์ตติ้งของไอซีออปแอมป์

$$V_{IN} = \frac{V_{OUT} R_I}{R_F + R_I} \quad (2.5)$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN} (R_F + R_I)}{R_I} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{OL} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_F}{R_I} \tag{2.7}$$

โดยค่า R_F : ค่าความต้านทานป้อนกลับ

R_I : ค่าความต้านทานที่อินพุท

A_{OL} : อัตราขยาย DC Open loop

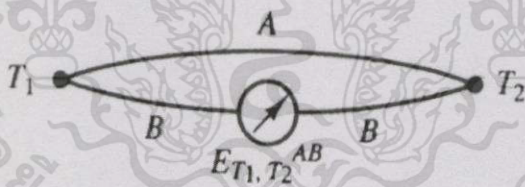
V_{IN} : แรงดันอินพุท

V_{OUT} : แรงดันเอาต์พุท

2.4 ทฤษฎีอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 เทอร์มัลอีเอ็มเอฟ (Thermal EMF)

เทอร์มัลอีเอ็มเอฟ (thermal electromotive force : thermal EMF) เป็นแรงดันไฟฟ้าปริมาณหนึ่งมีหน่วยเป็นไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส ($\mu V/^\circ C$) อันเนื่องมาจากอุณหภูมิดังรูปที่ 2.15 ซึ่งศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมนั้นจะเกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อระหว่างโลหะต่างชนิดกันที่บริเวณ ขั้วต่อสายไฟฟ้า หน้าสัมผัส สวิตช์ และจุดบัดกรีของอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นต้น



รูปที่ 2.15 แรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างโลหะต่างชนิดกัน

เมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดจากความต่างศักย์ปริมาณหนึ่งบริเวณจุดเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิดกัน ($E_{T_1-T_2}^{AB}$) และค่าความต่างศักย์นี้จะเป็นแหล่งกำเนิดค่าความผิดพลาดที่พบมากในระบบการวัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าความต่างศักย์นี้มีสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิต่างที่เปลี่ยนไปของรอยต่อในรูปของเทอร์โมคัพเปิล (thermocouple) ดังสมการที่ 2.8

$$E_{T_1-T_2}^{AB} = a_1(T_1 - T_2) + a_2(T_1^2 - T_2^2) + \dots \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$E_{T_1-T_2}^{AB}$: ความต่างศักย์ที่จุดเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิดกัน

$T_1 - T_2$: อุณหภูมิต่างที่จุดเชื่อมต่อของโลหะสองชนิด

a_1, a_2, \dots : เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะทั้งสอง

เพื่อลดค่าความผิดพลาดในการวัดที่มีสาเหตุจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนหรือเทอร์มัลอีเอ็มเอฟ ที่เกิดจากอุณหภูมิตรงบริเวณจุดสัมผัสที่เป็นโลหะต่างชนิดกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมขึ้นที่จุดสัมผัสขณะทำการวัดโดยปกติเพื่อให้ระบบการวัดมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดจึงต้องมีการควบคุมมิให้เกิดเทอร์มัลอีเอ็มเอฟขึ้น การกำจัดเทอร์มัลอีเอ็มเอฟทำได้ด้วยการจุดเชื่อมต่อให้แน่น ทำความสะอาดคราบเกลือ น้ำมันต่างๆ สายไฟฟ้าต้องเป็นชนิด low thermal และเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีวัสดุชนิดเดียวกัน

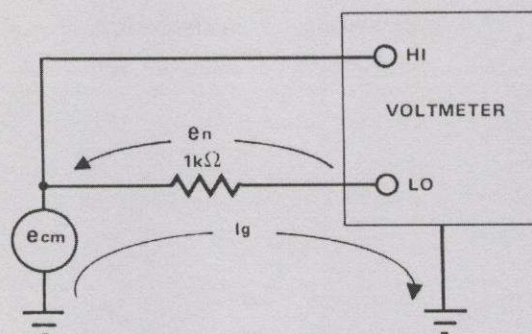
ตารางที่ 2.2 ค่าเทอร์มัลอีเอ็มเอฟของทองแดงกับโลหะอื่น

ทองแดงกับโลหะอื่น	เทอร์มัลอีเอ็มเอฟ ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
ทองแดง	น้อยกว่า 0.3
ทอง	0.5
เงิน	0.5
ทองเหลือง	3.0
ลวดเชื่อมตะกั่ว-ดีบุก	5.0

2.4.2 คอมมอนโหมดรีเจกชัน (Common mode rejection)

คอมมอนโหมดรีเจกชัน (common mode rejection :CMR) เป็นการเกิดแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมกันระหว่างแท่นหรือตัวถังของเครื่องโวลต์มิเตอร์กับกราวนด์ (ground) ของแหล่งกำเนิด ในการเชื่อมต่อที่ขั้วต่อ Hi และขั้วต่อ Lo ของโวลต์มิเตอร์ e_{cm} ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทำให้เกิดกระแสกราวนด์ (I_g) ที่ไหลผ่านตัวต้านทานในสายไฟที่ต่ออยู่ 10 กิโลโอห์ม ที่ต่อไปยังขั้วต่อ Lo แรงดันที่จุดต่อร่วม (normal mode voltage: Cn) ตกคร่อมตัวต้านทาน 1 กิโลโอห์ม ที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์กับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า โวลต์มิเตอร์สามารถที่จะกำจัดกระแส I_g ปริมาณน้อยได้

ค่าความต้านทานที่ไม่สมดุลย์หมายถึงค่าความต้านทานสายไฟทั้งขั้วต่อ Hi และขั้วต่อ Lo ซึ่งอาจจะมีค่าสูงถึง 1 กิโลโอห์ม ต่ออนุกรมกันอยู่ในการวัดบางครั้งต้องการค่าความต้านทานที่ไม่สมดุลย์สังเกตว่าโวลต์มิเตอร์บางเครื่องกำหนดให้ความต้านทานในสายขั้วต่อ Lo เท่ากับ 1 กิโลโอห์ม เพราะว่าสายที่ขั้วต่อ Lo มีค่ากระแสคอมมอนโหมดมากกว่า และบางครั้งเครื่องโวลต์มิเตอร์



รูปที่ 2.16 การเกิดกระแสคอมมอนโหมดกับโวลต์มิเตอร์

ที่ใช้วัดไฟฟ้ากระแสสลับกำหนดให้ความต้านทานในสายเท่ากับ 100 โอห์ม แทนที่จะเป็น 1 กิโลโอห์ม ส่วนเครื่องโวลต์มิเตอร์ที่ไม่ได้กำหนดค่าความต้านทานไม่สมดุลในสายไฟไม่สามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์ที่กำหนดความต้านทานไม่สมดุลในสายได้และกระแส I_g นี้ให้เป็นคอมมอนโหมดรีเจกชันซึ่งโดยปกติจะกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของค่าสูงสุดของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อร่วมเป็นผลทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาดโดยสัปดาห์คร่อม 1 กิโลโอห์ม ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการไม่สมดุลในสายไฟที่ต่ออยู่ และอัตราส่วนของคอมมอนโหมดรีเจกชันจะอยู่ในรูปของหน่วย เดซิเบล (dB) ดังสมการที่ 2.9 นี้

$$CMRR = 20 \text{ LOG}_{10} C_{cm} \div \text{Voltmeter Error (dB)} \quad (2.9)$$

เครื่องมือวัดได้แก่ ดิฟเฟอเรนเชียล และดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่มีคุณภาพดีและวัดได้แม่นยำจะมีชุดการ์ดิ่ง (guarding) พิเศษเพื่อป้องกันและลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากคอมมอนโหมด รีเจกชัน กำหนดคุณลักษณะเท่ากับ 120 เดซิเบล ที่ความถี่ 100 เฮิร์ต วิธีที่สองกำหนดให้ค่า CMR เท่ากับค่าสูงสุดของ e_{cm} ซึ่งจำกัดให้ค่าผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ต่ำกว่าที่กำหนดความถี่ที่ป้อนให้สมดุลกับความต้านทานอินพุท

การกำหนดคุณลักษณะคอมมอนโหมด 120 เดซิเบล เป็นอัตราส่วนของ 1,000,000 ต่อ 1 และ 140 เดซิเบล เป็นอัตราส่วน 10,000,000 ต่อ 1 ยกตัวอย่างเช่น หากว่าจะวัด 100 มิลลิโวลต์ (mV) ด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดในการอ่านเท่ากับ 1 ไมโครโวลต์ (μV) และมีค่า CMR เท่ากับ 120 เดซิเบล ที่จะยอมให้ได้สูงสุด 1 โวลต์ ค่าผิดพลาดที่จะพบเท่ากับ ($1\text{V} \div 1 \mu\text{V} = 1,000,000 : 1$)

2.4.3 สัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิ (temperature coefficient หรือ tempco) [7] การกำหนดเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมจะเป็นประโยชน์กับเครื่องมือวัดเพราะว่าห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่จะไม่ได้ออกแบบให้ทำงานที่อากาศร้อน เย็น และความชื้นสูง ส่วนมากจะมีการกำหนดช่วงอุณหภูมิและความชื้นในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งาน ค่า tempco ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronics device temperature coefficient) มีหน่วยเป็น พีพีเอ็มต่อองศาเซลเซียส (ppm/ °C) ค่า tempco ทั้งอุปกรณ์เกทพาสซีฟ (passive) ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ และแอ็คทีฟ (active) ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด และซีเนอร์ไดโอด เป็นต้น ในกรณีอุปกรณ์ประเภทแอ็คทีฟให้พิจารณาจากตารางข้อมูลของผู้ผลิตประกอบการออกแบบ ส่วนกรณีอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟโดยเฉพาะค่าความต้านทานของตัวต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ให้พิจารณาดังสมการที่ 2.10 และ สมการที่ 2.11

$$R_T = R_I (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots) \quad (2.10)$$

$$\frac{R_T}{R_I} = 1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots \quad (2.11)$$

โดย R_T : ความต้านทานที่อุณหภูมิ T (องศาเซลเซียส)

R_I : ความต้านทานที่อุณหภูมิเริ่มต้น(องศาเซลเซียส)

α, β, γ : สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน(พีพีเอ็ม/องศาเซลเซียส)

เทอมของ β, γ จะไม่กล่าวถึงเพราะ β, γ มีค่าน้อยมากให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{R_T}{R_I} = (1 + \alpha T) \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{1}{T} \left[\frac{R_T - R_I}{R_I} \right] \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.12 เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป (ΔR) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิ (T) จะได้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานตามสมการที่ 2.13

$$\alpha = \frac{1}{T} \cdot \frac{\Delta R}{R_I} \quad (2.14)$$

ค่า tempco ของตัวต้านทาน (α) ในสมการที่ 2.14 เทอม $\Delta R/R_I$ จะมีปริมาณน้อยๆ แต่เมื่อเทียบกับเครื่องมือที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงสูงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปปริมาณน้อยๆเหล่านี้จะมีผลอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 1-2 พีพีเอ็มของตัวต้านทาน 10 กิโล

โอห์ม จะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปประมาณ 10 - 20 มิลลิโอห์ม ส่วนกรณีค่าความต้านทานมีค่าเอกสารเป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

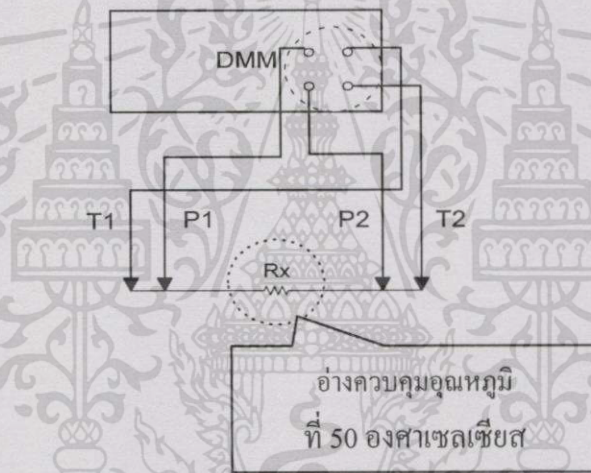
มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานก็จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ดังนั้นควรพิจารณาชนิดของตัวต้านทานให้เหมาะสมกับงาน

ชนิดคาร์บอน (carbon) มีค่าความผิดพลาดมากกว่า $\pm 5\%$ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานอยู่ในช่วง ± 1000 พีพีเอ็ม/องศาเซลเซียส หรือมากกว่า

ชนิดคาร์บอน-ฟิล์ม (carbon film) มีค่าความผิดพลาด $\pm 5\%$ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานอยู่ในช่วง ± 350 พีพีเอ็ม/องศาเซลเซียส

ชนิดเมทัลฟิล์ม (metal film) มีค่าความผิดพลาด $\pm 0.01 - 1\%$ เป็นตัวต้านทานที่มีเสถียรภาพดี มีสัญญาณรบกวนค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานอยู่ในช่วง ± 100 พีพีเอ็ม/องศาเซลเซียส

การวัดค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิของตัวต้านทานแบบ 4-เทอร์มินัล ดังรูปที่ 2.20 ประกอบด้วยคิจิตอลมัลติมิเตอร์โดยเลือกฟังก์ชันโอห์มมิเตอร์ที่สามารถอ่านได้ละเอียด 0.1 มิลลิโอห์ม หรือเลือกช่วงการวัดของคิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่สามารถอ่านได้



รูปที่ 2.17 การวัดค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิของตัวต้านทานแบบ 4 – เทอร์มินัล

ค่าที่บันทึกได้นำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานดังสมการที่ 2.15

$$\alpha_{4-Term} = \left(\frac{\Delta R}{\Delta T} \right) = \left(\frac{R_r - R_b}{T_r - T_b} \right) \quad (2.15)$$

ΔR = ผลต่างระหว่างค่าความต้านทานอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิในอ่าง (โอห์ม)

ΔT = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิในอ่าง(องศาเซลเซียส)

R_r = ค่าความต้านทานก่อนจุ่มหรือที่อุณหภูมิห้องที่อ่านได้จากคิจิตอลมัลติมิเตอร์ (โอห์ม)

R_b = ค่าความต้านทานหลังจุ่มหรือที่อุณหภูมิในอ่างที่อ่านได้จากคิจิตอลมัลติมิเตอร์ (โอห์ม)

T_r = อุณหภูมิห้องขณะทำการวัด(องศาเซลเซียส)

T_b = อุณหภูมิแอลกอฮอล์ในอ่างขณะทำการวัด(องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 วิธีการกำจัดการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน

(Method of Eliminating Interference)

ปัจจุบันการออกแบบเครื่องมือหรือใช้ไฟฟ้าสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือเครื่องมือเหล่านั้นจะต้องไม่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทั้งภายในตัวเครื่องมือเองและแพร่กระจายออกมารบกวนเครื่องมืออื่นภายในห้องปฏิบัติการยกตัวอย่างเช่น ตามมาตรฐาน EN 55022 ว่าด้วยการกำหนดปริมาณความแรงของการแพร่กระจายสัญญาณความถี่วิทยุ 30 เมกะเฮิร์ต(MHz) – 1 จิกะเฮิร์ต(GHz) ต้องไม่มากกว่า 50 เดซิเบลหรือไมโครโวลต์ต่อเมตร (dB หรือ $\mu\text{V}/\text{m}$) อาจกล่าวได้ว่าการกำจัดสัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะไม่สามารถกำจัดให้หมดสิ้นได้ แต่การกำจัดจะทำให้ปริมาณสัญญาณรบกวนลดลงเหลือน้อยที่สุด ให้เป็นไปตามเกณฑ์ยอมรับของมาตรฐานสากล วิธีการหลักในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่รวบรวมได้มีอยู่หลายวิธีด้วยกันดังนี้ หัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะการกักรัด(Guarding) [8] และการชีลด์(shielding)เท่านั้นเพราะมีผลกระทบโดยตรง

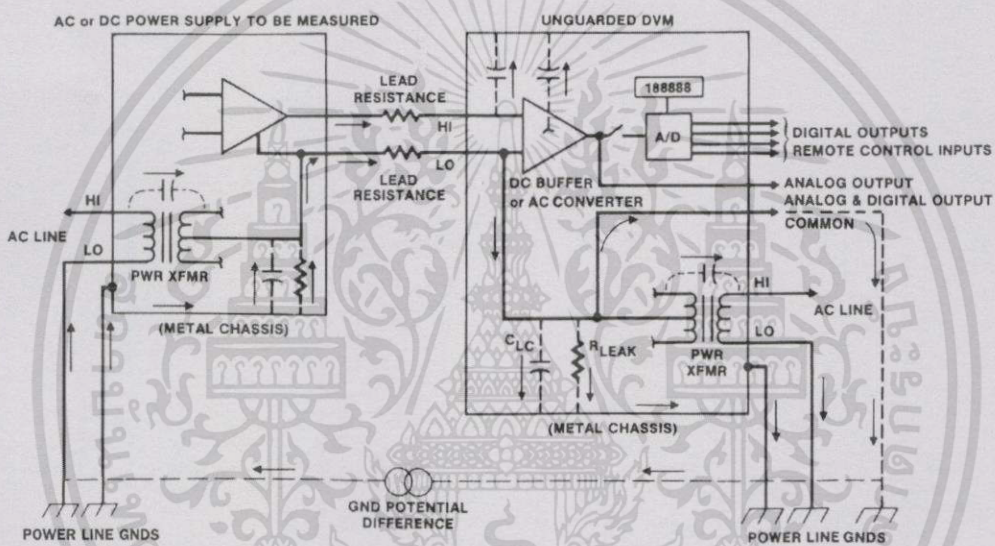
1. การกักรัด (Guarding)

โดยทั่วไปการต่อกรัดเป็นวิธีการลดค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการต่อพ่วงอุปกรณ์แบบคอมมอนโหมดในการวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมโครโวลต์ และการวัดที่ต้องการความแม่นยำสูงการต่อกรัดมีความจำเป็นอย่างมาก เพราะว่าการวัดจะช่วยลดการไหลเวียนกระแสตามจุดที่ต่อร่วมกันโดยไม่จำเป็นลง ทำให้เกิดศักย์ตกคร่อมระหว่างแท่นเครื่องกับขั้วไฟฟ้าลบสังเกตได้ว่าเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูงจะมีจุดต่อกรัดไว้เสมออีกด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การต่อกรัดนั้นใช้สำหรับการวัดกระแสตรง กระแสไฟฟ้าสลับและ ความต้านทาน

การวัดปริมาณทางไฟฟ้าโดยทั่วไปจะประกอบด้วยสองส่วนสำคัญนั่นก็คือ ส่วนแรกแหล่งกำเนิด ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น และส่วนที่สองเป็นส่วนของเครื่องมือวัด ได้แก่ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และ โพรเทินซิโอมิเตอร์ เป็นต้น ค่าความผิดพลาดเนื่องเกิดจากกระแสคอมมอนโหมดที่ระหว่างสองส่วนนี้มีอยู่ด้วยกันหลากหลายลักษณะด้วยกัน คือ การรั่วไหลไฟฟ้ากระแสตรงของความต้านทาน ค่าความจุที่จุดต่างของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับกับหม้อแปลงไฟฟ้าและ ระหว่างอินพุตขั้วไฟฟ้าลบ (L_o) กับแท่นเครื่อง (C_{Lc}) ของเครื่องมือวัด สาเหตุจากกระแสไหลจากสายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านลงกราวด์ของระบบ ผ่านตัวความจุเสมือนและรั่วไหลของความต้านทานของ แหล่งกำเนิดที่จะวัด กระแสจากจุดต่อร่วม (common mode current) ไหลผ่านสายไฟฟ้าบวก (H_i) และลบ (L_o) เป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม ที่ความต้านทานสายไฟ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดจะเป็นค่าที่ได้จากศักย์ตกคร่อมแหล่งกำเนิดรวมกับศักย์ตกคร่อมความต้านทานสายไฟ นี่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องมือวัดที่มีความไวสูง

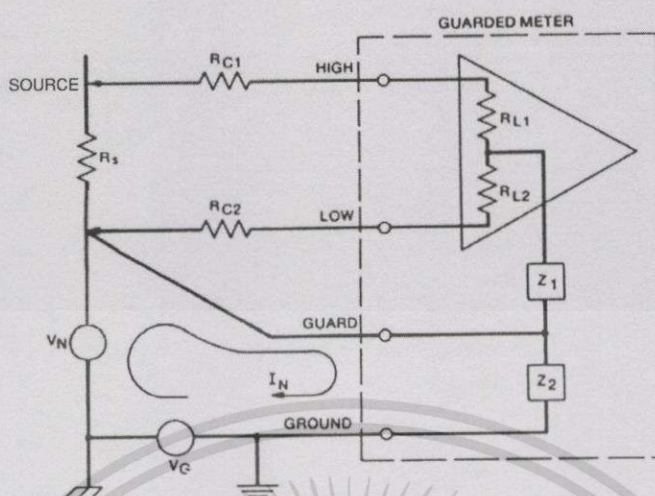
กระแสจากจุดต่อร่วมก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในการวัดซึ่งแตกต่างจากการต่อเครื่องมือกับเครื่องมือกระแสที่ไหลผ่านความจุและรั่วไหลผ่านความต้านทานจากส่วนต่างๆของภาคขยายดิจิทัลโวลต์มิเตอร์ไปยังแทนเครื่อง

รูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณขาออกแบบอนาล็อกและสัญญาณขาออกแบบดิจิทัลแบบนอนไอโซเลตเต็ด (non-isolated) เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสที่จุดต่อร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกทั้งแบบอนาล็อกและดิจิทัล นอกจากนี้ได้แสดงเส้นทางเดินสัญญาณความถี่กระแสที่ไหลผ่านจุดต่อร่วมสัญญาณขาออกแบบดิจิทัลเป็นแบบไอโซเลตเต็ด (isolated) จะสร้างสัญญาณดิจิทัลแบบต่อเนื่องกระแสที่ไหลผ่านจุดต่อร่วมอุปกรณ์เชื่อมต่อภายนอก เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.18 แสดงการเกิดสัญญาณรบกวนระหว่างแหล่งกำเนิดอนาล็อกและอุปกรณ์ดิจิทัล

การแก้ไขสัญญาณรบกวนและค่าผิดพลาดจากการวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าด้วยการการ์ดได้แก่ การเชื่อมต่อสายเข้าที่ขั้วต่อ low ดังรูปที่ 2.22 ของแหล่งกำเนิดจะไม่ทำให้กระแส (I_N) ไหลผ่านเข้าไปรบกวนชุดขยายสัญญาณของเครื่องมือวัดได้



รูปที่ 2.19 การต่ออาร์ระหว่างแหล่งกำเนิดกับคิตจิตอลโวลต์มิเตอร์

2. การชิลด์ (Shielding)

การชิลด์ (Shielding) [9] เป็นเทคนิคการป้องกันการรบกวนสัญญาณจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งอยู่ในลักษณะของการแทรกสอดของสัญญาณย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency Interference: RFI) พิจารณาได้สองกรณีคือ ใกล้กับแหล่งกำเนิด (near field) และไกลกับกำเนิด (far field) สัญญาณรบกวน

การเพิ่มการชิลด์กล่องโลหะที่อยู่ภายใน โครงสร้างกล่องใหญ่อีกทีหนึ่ง จะทำให้กระแสจลจลร่วมจะลดลงเมื่อมีการต่ออาร์อย่างเหมาะสม การชิลด์ควรทำรอบๆชุดขดขั้วขดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าใช้แผ่นโลหะบางชิลด์ขดขดขั้วขดขั้วให้แยกออกจากกันกับขดปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยเด็ดขาด และรวมถึงชุดขดลวดต่างๆที่จะป้อนเข้าสู่วงจรหากทำเช่นนี้จะสามารถลดค่าความจุที่เกิดจากการอาร์คที่ชุดขดลวดของหม้อแปลงและแกนเหนี่ยวนำหม้อแปลงให้ต่ำกว่า หนึ่งพิโคฟารัดซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้ลดค่ากระแสที่ไหลผ่านจุดต่อร่วมได้ การชิลด์เป็นการวางโลหะกั้นระหว่างส่วนสองส่วนเพื่อป้องกันหรือควบคุมไม่ให้สนามแม่เหล็กและไฟฟ้าจากหนึ่งเดินทางเข้าไปในอีกที่หนึ่ง การชิลด์อาจใช้เป็นที่ๆเก็บแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ให้มีการแพร่กระจายออกมาได้ หากว่ามี การชิลด์โดยรอบก็จะเป็นการป้องกันไฟฟ้าที่มีความไวติดตั้งอยู่ข้างนอกกรอบชิลด์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน การชิลด์ป้องกันมิให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกมาจะดีกว่าการชิลด์ที่อุปกรณ์ตัวรับมีอยู่หลายกรณีที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องยอมให้มีการแพร่กระจายออกไปเช่น สถานีโทรทัศน์ และวิทยุกระจายเสียง เป็นต้น ดังนั้นการชิลด์ที่ตัวรับสัญญาณรบกวนนั้นๆเป็นสิ่งจำเป็น

การชิลด์จะทำให้สัญญาณรบกวนเข้าหรือออกได้น้อยมาก ไม่ว่าจะออกแบบดีแค่ไหนและส่วนที่สัญญาณรบกวนจะถูกลดให้เข้าหรือออกมาจากกล่องได้แก่ การทะลุทะลวงผ่านสายเคเบิลโดยผ่าน

เข้าที่ปลายด้านหนึ่งของสายชิลด์ไปยังอีกปลายด้านหนึ่งที่จะทำให้เกิดการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเป็นการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการชิลด์กล่องทั้งหมด สัญญาณรบกวนจากแรงดันไฟฟ้าควรจะใส่ตัวกรองสัญญาณของสายเคเบิลก่อนที่ทะลุผ่านชิลด์มาได้ การประยุกต์ใช้งานแบบนี้ได้ทั้งสายไฟฟ้ากระแสสลับและ สายสัญญาณ การชิลด์สายสัญญาณซึ่งจะทะลุผ่านชิลด์ของกล่อง ต้องเชื่อมต่อกับกล่องเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนปะปนควบคู่กันมาตลอดที่ตรงขอบ

2.4.5 ลักษณะการชิลด์ระยะห่างไกลและระยะใกล้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกกำหนดโดยแหล่งกำเนิดตัวกลางที่อยู่โดยรอบแหล่งกำเนิด ระยะระหว่างแหล่งกำเนิด และระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดกับจุดสังเกตการณ์ ในกรณีห่างไกลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์ดังนี้ $E/H = Z_0 = 377$ โอห์ม อิมพีแดนซ์ของตัวกลางสำหรับอากาศ พิจารณาแบบเวฟอิมพีแดนซ์ (Z_w) สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไปเป็นดังนี้

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad (2.16)$$

ลักษณะอิมพีแดนซ์ในตัวกลางใดๆเป็นดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.17)$$

ในกรณีของคลื่นระนาบ ในกรณีที่อยู่ห่างจากสนาม Z_0 ก็มีค่าเท่ากับเวฟอิมพีแดนซ์ (Z_w) ด้วยสำหรับ ฉนวน ($\sigma \ll j\omega\epsilon$) เป็นอิสระกับความถี่และจะได้ดังสมการที่ 2.18

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.18)$$

สำหรับ free space Z_0 มีค่าเท่ากับ 377 โอห์ม ในกรณีตัวนำ ($\sigma \gg j\omega\epsilon$) ลักษณะของอิมพีแดนซ์หรือที่เรียกกันว่า ชิลด์อิมพีแดนซ์ (Z_s) จะได้เป็น

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\epsilon}{\sigma}} \quad (2.19)$$

$$|z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \quad (2.20)$$

เมื่อแทนค่ารีเลทีฟ คอนดักทิวิตี (relative conductivity : σ_r) และเพอร์มิอิตี (permeability : μ_r) ของวัสดุต่างชนิดกันลงในสมการที่ 2.20 ก็จะได้ผลลัพธ์ดังตัวอย่างต่อไปนี้

สำหรับวัสดุเป็นทองแดง

$$|z_s| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{f} \quad (2.21)$$

สำหรับวัสดุเป็นอลูมิเนียม

$$|z_s| = 4.71 \times 10^{-7} \sqrt{f} \quad (2.22)$$

สำหรับวัสดุเป็นเหล็ก

$$|z_s| = 3.68 \times 10^{-5} \sqrt{f} \quad (2.23)$$

และกรณีวัสดุทั่วไป

$$|z_s| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \sqrt{f} \quad (2.24)$$

2.4.6 ผลของการชีลด์ (Shielding effectiveness)

ผลของการชีลด์ (shielding effectiveness: S) ทั้งใกล้และไกลสนามรบกวน สามารถหาได้จาก การวิเคราะห์ปัญหาสองวิธี ด้วยกัน วิธีแรกใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ห้วงจรและวิธีที่สองใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีของทฤษฎีการวิเคราะห์ห้วงจรใกล้เพียงวิธีการชีลด์เพื่อป้องกันกระแสเหนี่ยวนำจาก สัญญาณรบกวน และกระแสเหนี่ยวนำเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดสนามด้านทานสนามรบกวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มที่จะหักล้างสนามสัญญาณรบกวนที่มากกระทบในตอนแรก

การชิลด์สามารถกำหนดทอมในการลดความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ใช้หน่วยเป็นโวลต์/เมตร (V/m) หรือความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ใช้หน่วยเป็นแอมแปร์/เมตร (A/m) ผลของการชิลด์ (S) ใช้หน่วยเป็นเดซิเบล (dB) ดังนั้นผลการชิลด์ป้องกันสนามไฟฟ้าคือ

$$S = 20 \log \frac{E_o}{E_1} \quad (2.25)$$

เมื่อ E_o = เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าตกกระทบ
 E_1 = เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการชิลด์

ผลการชิลด์ป้องกันสนามแม่เหล็ก

$$S = 20 \log \frac{H_o}{H_1} \quad (2.26)$$

เมื่อ H_o = เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กตกกระทบ
 H_1 = เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการชิลด์

ในการออกแบบเพื่อชิลด์ป้องกันสัญญาณรบกวนมีข้อพิจารณาสำคัญอยู่ 2 ข้อด้วยกันดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการชิลด์
2. ความไม่สม่ำเสมอและช่องของการชิลด์

ประการแรกพิจารณากำหนดการชิลด์ป้องกันด้วยวัสดุแข็งไม่ให้มีตะเข็บและรู ผลอันเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอและรูที่เกิดขึ้น การชิลด์ช่องหรือรูให้ได้ผลต้องชิลด์ด้วยวัสดุชนิดเดียวกันทั้งหมด

ผลของการชิลด์นั้นจะแปรตามความถี่ ลักษณะรูปทรงของการชิลด์ ตำแหน่งที่มีการชิลด์ ชนิดของสนามรบกวน ทิศทางของสัญญาณตกกระทบและการโพลาไรเซชัน ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเฉพาะการชิลด์ด้วยแผ่นวัสดุเรียบตัวนำ เป็นลักษณะรูปทรงธรรมดาแนวทิศในการแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ชิลด์ ซึ่งจะไม่เกี่ยวข้องกับรูปทรงของการชิลด์ ผลลัพธ์ของการคำนวณแผ่นวัสดุเรียบใช้เป็นประโยชน์ในการหาคำนวณความสามารถของการชิลด์สัมพัทธ์ของวัสดุชนิดต่างๆ

ผลรวมของการชิลด์ทั้งหมดของวัสดุใดๆเท่ากับผลรวมของเอ็บซอร์พชัน ลอสส์ (absorption loss: A_{nl}) เป็นการลดทอนสัญญาณเนื่องจากการดูดกลืนบวกด้วยรีเฟลคชัน ลอสส์ (reflection loss: R_r)

เป็นการลดทอนสัญญาณเนื่องจากการสะท้อนบวกด้วยค่าแก้ไขแฟกเตอร์ (correction factor: B_{cf}) รวมได้เป็นดังสมการที่ 2.27

$$S = A_{at} + R_{rl} + B_{cf} \quad (2.27)$$

ในทางปฏิบัติเทอม B_{cf} สามารถตัดทิ้งได้หากว่า A_{at} มีค่ามากกว่า 9 เดซิเบล หรือกรณีเป็นสนามไฟฟ้าและคลื่นระนาบ

2.4.7 แอ็บซอร์พชัน ลอสส์ (absorption loss)

แอ็บซอร์พชัน ลอสส์ (absorption loss: A_{at}) เป็นการสูญเสียหรือการลดทอนสัญญาณเนื่องจากการดูดกลืนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางแอมพลิจูดจะลดลงเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล สาเหตุเพราะกระแสเหนี่ยวนำในตัวกลางทำให้เกิดโอห์มมิก ลอสส์ และความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ เขียนอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.28 และ 2.29 นี้

$$E_1 = E_0 e^{-t/\delta} \quad (2.28)$$

$$H_1 = H_0 e^{-t/\delta} \quad (2.29)$$

ที่ E_1, H_1 เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในตัวกลาง t สมการที่ 2.30 เป็นสมการ แอ็บซอร์พชัน ลอสส์ ของวัสดุที่ใช้ในการชีลด์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$A_{at} = 3.34 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (2.30)$$

เมื่อ t เป็นความหนาของตัวกลางที่ใช้ในการชีลด์

2.4.8 รีเฟล็กชัน ลอสส์ (reflection loss)

รีเฟล็กชัน ลอสส์ (reflection loss: R_{rl}) เป็นการลดทอนสัญญาณลงเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณระหว่างสองตัวกลางจะสัมพันธ์กันกับความแตกต่างในรูปของอิมพีแดนซ์ระหว่างตัวกลาง ความเข้มของสนามไฟฟ้า และแม่เหล็ก ที่ถูกส่งผ่านจากตัวกลางด้วยอิมพีแดนซ์ Z_1 และ ไปยังตัวกลางด้วยอิมพีแดนซ์ Z_2 ดังสมการที่ 2.31 และ 2.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้า

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad (2.31)$$

สนามแม่เหล็ก

$$H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad (2.32)$$

เมื่อ E_0, H_0 เป็นความเข้มของคลื่นตกกระทบและ E_1, H_1 เป็นความเข้มคลื่นที่ถูส่งผ่าน

$$R_r = 168 + 10 \log(\sigma_r / \mu_r f) \quad (2.33)$$

รีเฟลคชัน ลอสส์ของวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียมและเหล็กกล้า เปรียบเทียบให้เห็นว่าถึงแม้ว่าเหล็กกล้าจะมีค่าแอมป์ซอร์พ ลอสส์ มากกว่าทองแดงแต่มีค่ารีเฟลคชัน ลอสส์ต่ำกว่าทองแดง แนวตะเข็บยาว ช่องสล็อตทำให้น้ำสัมผัสไฟฟ้าที่จุดต่างตลอดแนวยาวของมันเอง อาร์เรย์สล็อตอิมพีแดนซ์ที่ตกคร่อมตะเข็บประกอบด้วย ความต้านทานและค่าความจุอุปกรณ์

2.5 เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

(stability of DC voltage standard)

ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานเป็นวิธีที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางไฟฟ้าใช้ติดตามสังเกตความเปลี่ยนแปลงและความคงที่ สม่ำเสมอของปริมาณแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันตลอด ความสัมพันธ์ของความเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานจะอยู่ในรูปของพีพีเอ็ม ต่อคาบเวลา(period of time) ซึ่งคาบเวลาของเสถียรภาพแบ่งออกเป็น 2 ช่วงระยะเวลาคือ เสถียรภาพระยะสั้น (short term stability) คือช่วงเวลา 30 วัน และความเสถียรภาพระยะยาว (long term stability) คือช่วงเวลา 90 วัน หรือ 1 ปี ในทางปฏิบัติความเสถียรภาพระยะยาวสั้นจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเท่าใดนัก หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่ามีความเสถียรภาพดี เมื่อเปรียบเทียบกับความเสถียรภาพระยะยาวจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่า ยกตัวอย่าง การวัดค่าความเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงขนาด 10 โวลต์ ค่าความเสถียรภาพระยะสั้นเท่ากับ 0.3 พีพีเอ็ม/เดือน และ ค่าความเสถียรภาพระยะยาวเท่ากับ 3 พีพีเอ็ม/ปี เป็นต้น

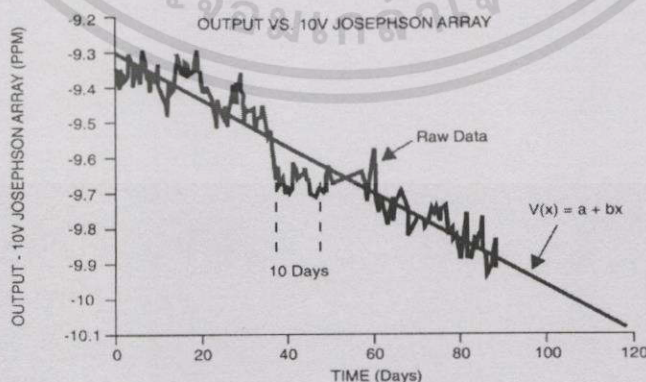
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคเชิงสถิติที่ใช้ประเมินเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกับเวลาโดยใช้หลักการถดถอยเชิงเส้น(Linear regression) เพื่อทำนายค่าแรงดันไฟฟ้าในอนาคต รูปที่ 2.22 แสดงค่าถดถอยเชิงเส้น V_x ในกรณีที่ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานถูกกำหนดให้ค่าความแปรปรวนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถแยกประเภทได้อย่างสะดวกเป็นสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำหรือสูง ที่สัญญาณรบกวนความถี่ต่ำมีช่วงเวลาหลายวันเช่นเกิดขึ้นภายใน 10 วัน เนื่องจากผลกระทบจากสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ ค่าความถดถอยเชิงเส้นจะอยู่ภายใต้การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของชุดแรงดันอ้างอิงมาตรฐาน

$$U_{tot} = s_1 t_1 \sqrt{\left[\frac{t_2 s_{ra}}{s_1 t_1} \right]^2 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \tag{2.34}$$

ที่

- U_{tot} = ค่าความไม่แน่นอนรวมทั้งหมด
- S_1 = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำการถดถอยเชิงเส้น
- t_1 = ค่า student 't' ที่ค่าองศาอิสระ $n-2$
- t_2 = ค่า student 't' ที่ ค่าองศาอิสระ $(n/7)-2$
- S_{ra} = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนย้ายค่าเฉลี่ยการถดถอย(Average regression)
- n = จำนวนครั้งที่วัด
- x = เวลาที่ใช้ในการทำนายค่าความไม่แน่นอน
- \bar{x} = เวลาเฉลี่ยของการวัด x ทั้งหมด
- x_i = ค่าของ x ที่ i ใดๆ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)



รูปที่ 2.20 การถดถอยเชิงเส้นของชุด DC transfer standard เมื่อเปรียบเทียบกับ โจเซฟสันจังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอน (Evaluation of Uncertainty)

การสอบเทียบความถูกต้องของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (DC Voltage working standard calibration) ผลที่ได้จะบอกให้รู้ถึงค่าความผิดพลาดซึ่งอยู่ในรูปของค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) จากการประยุกต์ใช้หนังสือ Guide to the expression of uncertainty in measurement หรือ ISO/TAG4 [10]

การพิจารณาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน โดยนำเอาหลักการทางสถิติมาประยุกต์ เช่น ทฤษฎีความน่าจะเป็น การสุ่มตัวอย่าง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าความแปรปรวน ทฤษฎีการกระจายแบบต่างๆ เช่น แบบปกติ (normal distribution) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular distribution) สามเหลี่ยม (triangular distribution) และอื่นๆ นอกจากนี้ยังนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์ เช่น เชิงอนุพันธ์ย่อย ลำดับอนุกรม มาใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการสอบเทียบทั้งหมด

2.6.1 ความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty)

ผลของการวัดจะอยู่ในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ใช้กันอยู่จะเป็นดังต่อไปนี้

1. ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ (type A Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ (U_A) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานโดยการพิจารณาทางสถิติ จากการวัดซ้ำจำนวน n ครั้ง ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยของการวัดเป็นดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$S(x_k) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (2.36)$$

$S(x_k)$: ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ $S(\bar{x}_i)$: ค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ดังนั้น จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดเอเป็น

$$U_A = U(x_i) = S(\bar{x}_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} S(x_k) \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี (type B Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี (U_B) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานโดยไม่ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติโดยตรง แต่จะใช้การตัดสินใจทางวิทยาศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังจะกล่าวต่อไป

เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนชนิดบีในกรณีต่างๆรวมทั้งหมดเป็น

$$U_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots} \quad (2.38)$$

เมื่อ U_{B1}, U_{B2} : เป็นค่าความไม่แน่นอนชนิดบีที่ได้จากกรณีต่างๆ

กำหนดให้ U_{B1} จากใบรับรองผลการสอบเทียบของผู้ผลิต

$$U_{B1} = \pm \frac{U_{STD}}{k} \quad (2.39)$$

กรณีที่ U_{STD} เป็นค่าความไม่แน่นอนจากใบรับรองของเครื่อง DC Voltage Calibrator จะถูกหารด้วยตัวประกอบ (k -factor ในตาราง student's t-distribution) k ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของระดับความเชื่อมั่นที่ 68% หรือที่ประมาณ 1σ ซึ่งในที่นี้จะให้เป็นการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)

พิจารณา U_{B2} จากความละเอียดในการอ่านหรือเรซโซลูชัน (resolution)

ความละเอียดในการอ่านของเครื่องมือซึ่งให้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ได้มีการแจกแจงเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular distribution) ซึ่งมีขีดจำกัดล่าง (lower limit) และขีดจำกัดบน (upper limit) ค่าประมาณของอินพุตที่ได้เป็น

$$U_{B2} = \pm \frac{\delta}{\sqrt{3}} = \frac{a_w}{2\sqrt{3}} \quad (2.40)$$

เมื่อ a_w = เป็นค่าเรซโซลูชันหรือเท่ากับ 2δ ทำเป็นเซมิเรนจ์ (semi-range)

3. ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty: U_C)

เป็นผลรวมของค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบทั้งหมด ทั้งจากชนิดเอและชนิดบี เรียกว่ากฎแห่งการกระจายความไม่แน่นอน (law of propagation of uncertainty) และวิธีการที่สองของผลบวกยกกำลังสอง (root-sum of square)

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2.41)$$

นำค่า U_C มาพิจารณาเพื่อหาค่าไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainties) เพื่อปรับค่าความไม่แน่นอนในการวัดเข้าสู่ระดับความเชื่อที่ 95% หรือประมาณ 2σ

$$V_{eff} = \frac{U_C^4}{\sum_{i=1}^N \frac{U_i^4}{v_i}} = \frac{U_C^4}{\frac{U_A^4}{n-1} + \frac{U_{GB}^4}{\infty} + \frac{U_{RES}^4}{\infty}} \quad (2.42)$$

เมื่อได้ค่า V_{eff} เป็นองศาอิสระหรือมีค่าเท่ากับ $n-1$ แล้วนำไปเปิดตาราง student's t-distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อหาค่า k ว่าค่าความไม่แน่นอนจะมีการแจกแจงแบบ t-distribution หรือ normal distribution ต่อไป ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบจะได้ว่า

$$U_r = kU_C \quad (2.43)$$

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานตามมาตรฐาน ISO/TAG4 ได้รับการสอบเทียบโดยการเปรียบเทียบกับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอีกชุดหนึ่ง ผลต่างของแรงดันจะถูกวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง รูปแบบการวัดกำหนดให้มีค่าเทอร์มัลอีเอ็มเอฟมีค่าต่ำสุด มีการควบคุมอุณหภูมิภายในบริเวณส่วนที่บรรจุชุดอ้างอิงมาตรฐานให้คงที่อยู่ภายในช่วง 0.001 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของชุดอ้างอิงทดสอบจะได้รับการกำหนดจากเทอร์โมมิเตอร์แบบใช้เทอร์มิสเตอร์ด้านใน

รูปแบบทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของการวัดแรงดันไฟฟ้า [11] เป็นดังนี้

$$V_R = V_S + V_{DMM} + C_{DMM} + C_T \quad (2.44)$$

- V_R = เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้รับการสอบเทียบที่มีการระบุอุณหภูมิ
 V_S = เป็นค่าที่ได้จากชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน
 V_{DMM} = เป็นค่าที่อ่านได้จากมัลติมิเตอร์ ใช้วัดผลต่างระหว่างชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานกับชุดที่จะวัด
 C_{DMM} = เป็นค่าแก้ที่ได้จากใบรับรองของมัลติมิเตอร์
 C_T = เป็นค่าแก้ที่ได้จากอุณหภูมิขณะทดสอบกับอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.3 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากห้องปฏิบัติการ

Date	11/7	13/7	15/7	20/7	22/7	26/7	31/7	3/8
Meas'd	503.25	533.32	513.05	509.21	501.45	538.79	525.60	513.58
diff. (μV)								
Temp ($^{\circ}\text{C}$)	20.40	20.90	21.10	21.00	21.10	20.05	20.50	20.95
Corr'n (μV)	44.66	16.24	36.54	40.60	44.66	2.03	20.30	38.57
Value (μV) at 20($^{\circ}\text{C}$)	547.91	549.56	549.59	549.81	546.11	540.82	545.90	552.15

ที่แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1.018 000 โวลต์ เฉลี่ยค่าที่วัดได้เท่ากับ 547.73 ไมโครโวลต์ สัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิ เท่ากับ - 40.6 ไมโครโวลต์/องศาเซลเซียส

การประเมินค่าความไม่แน่นอนอนชนิดเอ (U_A) สำหรับการวัดความเสถียรภาพจากการวัดจำนวน n ครั้ง ($n = 8$) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(standard deviation) เท่ากับ 3.47 ไมโครโวลต์ จำนวนค่าความไม่แน่นอนอนชนิดเอ เท่ากับ $U_A = 3.47/\sqrt{8} = 1.227$, ค่าองศาอิสระ (V_i) = $8-1 = 7$

การประเมินค่าไม่แน่นอนอนชนิดบี (U_B) จากใบรับรองผลการสอบเทียบของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.018 600 โวลต์ และค่าความไม่แน่นอนขยายเท่ากับ 4.4 ไมโครโวลต์ ด้วยค่าโคเวอเรจแฟกเตอร์ ($k = 2.2$) กำหนดให้เป็น U_{B1}

$$U_{B1} = 4.4/2.2 = 2.0 \text{ ไมโครโวลต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95\% มีค่าเท่ากับ 2.2}$$

ช่วงความแปรปรวนของอุณหภูมิภายในขณะทำการวัดเท่ากับ 0.001 องศาเซลเซียส ให้สัมประสิทธิ์เนื่องจาก อุณหภูมิเท่ากับ 40.6 ไมโครโวลต์ ทำให้เป็นเซมิเรนจ์ (semi-range) หรือ U_{B2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{B2} = 40.6 \times 0.001 = 0.0406 \text{ ไมโครโวลต์}$$

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดอุณหภูมิของเครื่องมือวัดเท่ากับ 0.05 องศาเซลเซียส ทำการแปลงให้เป็นเซมิเรนจ์ ได้ว่า

$$U_{B3} = 0.05 \times 40.6 = 2.03 \text{ ไมโครโวลต์}$$

ค่า resolution ของมัลติมิเตอร์มีเท่ากับ 10 นาโนโวลต์ และทำให้เป็นเซมิเรนจ์จะได้ว่า

$$U_{B4} = 10/2 = 5 \text{ นาโนโวลต์ หรือเท่ากับ } 0.005 \text{ ไมโครโวลต์}$$

คุณลักษณะเฉพาะ (specification) ของมัลติมิเตอร์ ที่ได้รับการสอบเทียบเท่ากับ $\pm(0.006\% \text{ of reading (ค่าที่อ่านได้) บวกด้วย } 5 \text{ เท่าของค่า resolution ของมัลติมิเตอร์) ยกตัวอย่างช่วงการวัดที่ } 2 \text{ มิลลิโวลต์ ในช่วงใช้งานหลักนัยสำคัญที่น้อยที่สุดเป็น } 10 \text{ นาโนโวลต์ ค่าที่อ่านได้เท่ากับ } 60 \text{ ไมโครโวลต์ ทำให้เป็นค่าเซมิเรนจ์ หรือ } U_{B5}$

$$\begin{aligned} U_{B5} &= 0.006\% \text{ of reading} + 5 \times 10 \text{ นาโนโวลต์} \\ &= 3.6 + 50 \text{ นาโนโวลต์} \\ &= 0.0536 \text{ ไมโครโวลต์} \end{aligned}$$

ค่าความผิดพลาดเนื่องจากการโหลดกระแสจากความต้านทานภายในมัลติมิเตอร์ถ้าความต้านทานของมัลติมิเตอร์ตามที่คุณผลิตกำหนดมีค่าเท่ากับ 10 เมกะโอห์ม และชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานทั้งสองมีค่าความต้านทานเท่ากับ 1000 โอห์ม ให้อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากผลต่างระหว่างชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงทั้งสอง ค่าความผิดพลาดจากการโหลดกระแสให้เป็น

$$\text{loading Error} = -60 \frac{2000}{(10^7 + 2000)} = -0.0120 \text{ ไมโครโวลต์}$$

ให้เป็นค่าแก้ + 0.012 ไมโครโวลต์ จะเป็นค่าที่บวกเพิ่มกับค่าที่วัดได้ ความแปรปรวนแรงดันไฟฟ้าจริงและค่าเบี่ยงเบนจากความต้านทานระบุได้ค่าความไม่แน่นอน $\pm 10\%$

ค่าความไม่แน่นอนจากการโหลดกระแสมีเซมิเรนจ์หรือ U_{B6}

$$U_{B6} = 0.012 \times 0.1 = 0.0012 \text{ ไมโครโวลต์}$$

ค่าเทอร์มิสทอร์ที่ขั้วที่ยังไม่ได้ชดเชยที่คำนวณได้จากการวัดจะไม่มากกว่า 0.25 ไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส กำหนดให้เป็น U_{B7}

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนเหล่านี้พิจารณาให้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและองศาอิสระเข้าสู่อินฟินิตี้เราจะรวมองค์ประกอบทั้งหมดเพื่อความสะดวกจัดทำตารางดังนี้

การรายงานผลค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับ 1.0185477 โวลต์ ด้วยค่าความไม่แน่นอน ± 5.4

ไมโครโวลต์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และค่า $k = 2.07$ แหล่งกำเนิดค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไม่แน่นอนที่ไม่ได้รวมเอาไว้ก็คือการปัดตัวเลขของค่าความละเอียดในการอ่านซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความไม่แน่นอนบางตัวที่รวมไว้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีค่าน้อยมากตัวอย่างที่ยกมานี้เทอมอื่นที่ต้องพิจารณาต่อไปก็คือมีค่าคริฟท์ ค่าความไม่แน่นอนนี้ต้องการสอบเทียบอย่างน้อยสองครั้งจึงจะหาค่าอัตราคริฟท์ได้ สมมติว่าให้ค่าอัตราคริฟท์เท่ากับ 1 ไมโครโวลต์ต่อปี ค่าความไม่แน่นอนจะน้อยกว่า ± 1 ไมโครโวลต์

ตารางที่ 2.4 อธิบายการคำนวณค่าความไม่แน่นอนและสะดวกง่ายขึ้น ใน 6 คอลัมน์แรกเป็นข้อมูลที่มีอยู่แล้วในคอลัมน์ที่ 6 เป็นค่าองศาอิสระ (V) ในแต่ละส่วนค่าทั้งหมดยกเว้นในสองแถวแรกให้ค่าองศาอิสระเป็นอนันต์ใช้เลขยกกำลัง 10^{10} ในคอลัมน์ที่ 7 หัวข้อนี้เป็น U_i เป็นค่าที่คำนวณได้จากการหารคอลัมน์ที่ 5 ด้วยคอลัมน์ที่ 4 (semirange/Divisor) ในคอลัมน์ที่ 9 ประกอบด้วยผลคูณของตัวเลขในช่องที่ 7 และช่องที่ 8 ในตัวอย่างนี้จำนวนในคอลัมน์ที่ 8 ไม่ค่อยสำคัญเท่าไรเพราะมีค่าเป็นหนึ่งทั้งหมด จำนวนตัวเลขแปดแถวแรกของคอลัมน์ที่ 10 เป็นค่ายกกำลังสองใกล้เคียงกันกับคอลัมน์ที่ 9 ในคอลัมน์ที่ 11 ประกอบด้วยจำนวนตัวเลขแปดแถวซึ่งเป็นผลลัพธ์ของเลขกำลังสองในคอลัมน์ที่ 10 หารด้วยจำนวนองศาอิสระในคอลัมน์ที่ 6 ค่าทั้งหมดเหล่านี้อาจถูกตัดออกจากคอลัมน์จำนวนตัวเลขในสองคอลัมน์สุดท้าย ในคอลัมน์ที่ 10 และ 11 ซึ่งอยู่ในแถวที่เขียนว่า "Sums" เป็นผลรวมของจำนวนตัวเลขของแต่ละคอลัมน์ จำนวนผลรวมแรกเป็นผลรวมกำลังสองของแต่ละค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน $\sum (u_i/c_i)^2 = 6.9014$ รากที่สองของจำนวนนั้นซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนรวม (U_c) เท่ากับ 2.627 1

สังเกตได้ว่าผลรวมในแถวที่ 11 ที่อยู่แถวล่างสุดเป็นสมการของ เวลช์-สแกตเตอร์เวท (Welch-Satterthwaite) ค่าบนสุดของสมการนี้เป็นค่าความไม่แน่นอนรวมยกกำลังสี่ ซึ่งคล้ายกับค่ากำลังสองของผลรวมในคอลัมน์ที่ 10 ดังนั้น จำนวนได้จากกำลังสองของผลรวมในคอลัมน์ที่ 10 หารด้วยผลรวมในคอลัมน์ที่ 11 ผลลัพธ์เท่ากับ 26.8 ใสไว้ในแถวที่เขียนว่า "Effective degree of freedom, V_e "

ถึงขั้นตอนนี้ก็จะเหลือแค่ค่าจากตาราง Student's T (ภาคผนวก ก) ที่เหมาะสมใส่ลงใน ตารางที่ 2.4 ค่าความไม่แน่นอนขยายแถวสุดท้ายของตารางได้จากการคูณตัวเลขสองจำนวนเข้าด้วยกัน ($U = ku$)

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานตามแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวข้างต้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ ด้วยกันคือ แบบที่ 1 ดังตารางที่ 2.4 เป็นการพิจารณาค่าความไม่แน่นอนตามมาตรฐานของสถาบัน National Association of Testing Authorities, Australia หรือเรียก ย่อว่า NATA และ แบบที่ 2 ดังตารางที่ 2.5 เป็นการพิจารณาค่าความไม่แน่นอนตามมาตรฐานของ ISO/TAG 4 เพื่อความสะดวกสำหรับห้องปฏิบัติการจะนำไปใช้ประเมินค่าความไม่แน่นอน

ตารางที่ 2.4 กำหนดแหล่งที่มาและการประเมินค่าความไม่แน่นอนแบบที่ 1

Components	Units	Dist.	U&a	Divisor	V_i	U_i	C_i	$U_i C_i$	$(U_i C_i)^2$	$(U_i C_i)^2 / V_i$
Meas'd value (U_A)	μV	Normal	1.227	1	7	1.2270	1	1.2270	1.5055	0.3238
Standard cal. (U_{B1})	μV	Rect.	4.4	2.2	11	2.0000	1	2.0000	4.0000	1.4545
Ref. Temp. (U_{B2})	μV	Rect.	0.0406	1.7321	1.00e+10	0.02344	1	0.02344	0.0005	3.02e-17
Test Temp. (U_{B3})	μV	Rect.	2.03	1.7321	1.00e+10	1.1720	1	1.1720	1.3736	1.89e-10
DMM Res. (U_{B4})	μV	Rect.	0.005	1.7321	1.00e+10	0.0029	1	0.0029	8.33e-06	6.94e-21
DMM Spec. (U_{B5})	μV	Rect.	0.0536	1.7321	1.00e+10	0.0309	1	0.0309	0.0010	9.17e-17
Loading(U_{B6})	μV	Rect.	0.0012	1.7321	1.00e+10	0.0007	1	0.0007	4.80e-07	2.30e-23
Thermals(U_{B7})	μV	Rect.	0.25	1.7321	1.00e+10	0.1443	1	0.1443	0.0208	4.34e-14
Sums									6.9014	1.7783
Combined Standard uncertainty, U_c									2.6271	
Effective degree of freedom, V_i									26.8	
Coverage factor, k =Student's for V_{eff} and CL95%									2.07	
Expanded uncertainty, $U = k U_c$									5.4380	

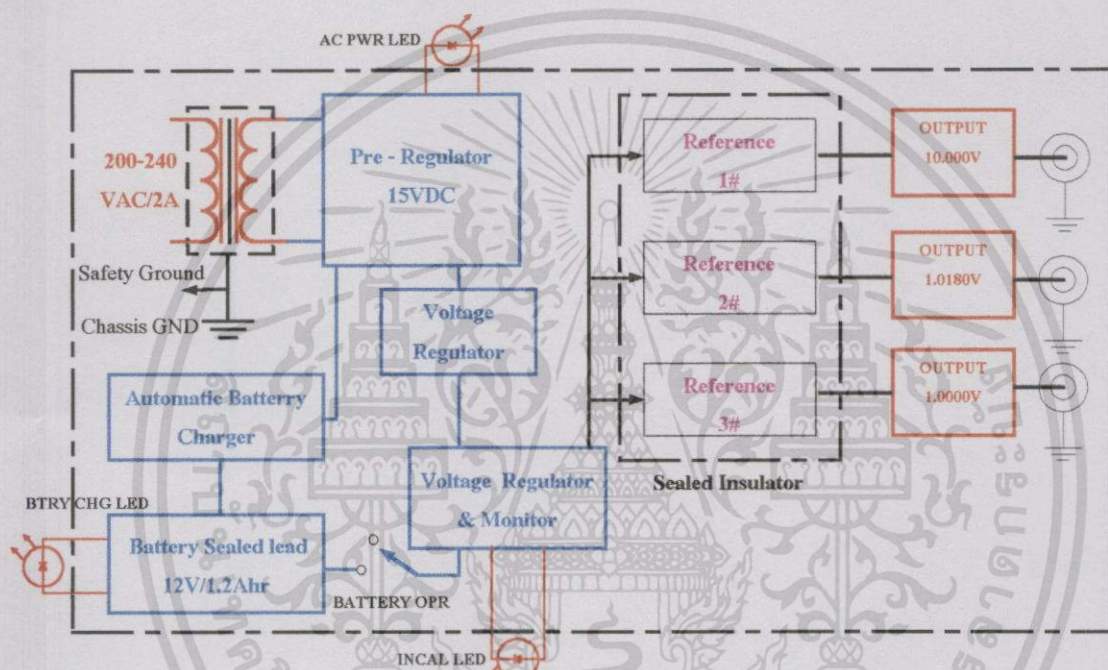
ตารางที่ 2.5 กำหนดแหล่งที่มาและการประเมินค่าความไม่แน่นอนแบบที่ 2

Type	Source of uncertainty	Units	Value	Distribution	Divisor	U _i	C _i	V _{eff}
U _A	Repeatability	μV	1.2270	Normal	1	1.22700	1	7
U _{B1}	Standard Calibrator	μV	4.4000	Rectangular	√3	2.00000	1	∞
U _{B2}	Reference temperature	μV	0.0406	Rectangular	√3	0.02344	1	∞
U _{B3}	Test temperature	μV	2.0300	Rectangular	√3	1.17200	1	∞
U _{B4}	Resolution of digital voltmeter	μV	0.0050	Rectangular	√3	0.00290	1	∞
U _{B5}	Specification of digital voltmeter	μV	0.0536	Rectangular	√3	0.03090	1	∞
U _{B6}	Loading error	μV	0.0012	Rectangular	√3	0.00070	1	∞
U _{B7}	Thermal EMF	μV	0.2500	Rectangular	√3	0.14430	1	∞
U _B		-	-	-	-	3.37424	-	-
U _C	Combined uncertainty (U _c)		-	-	-	2.62710	-	26.8
U _r	Expanded uncertainty (kU _c)		-	k = 2.07	-	5.4380		

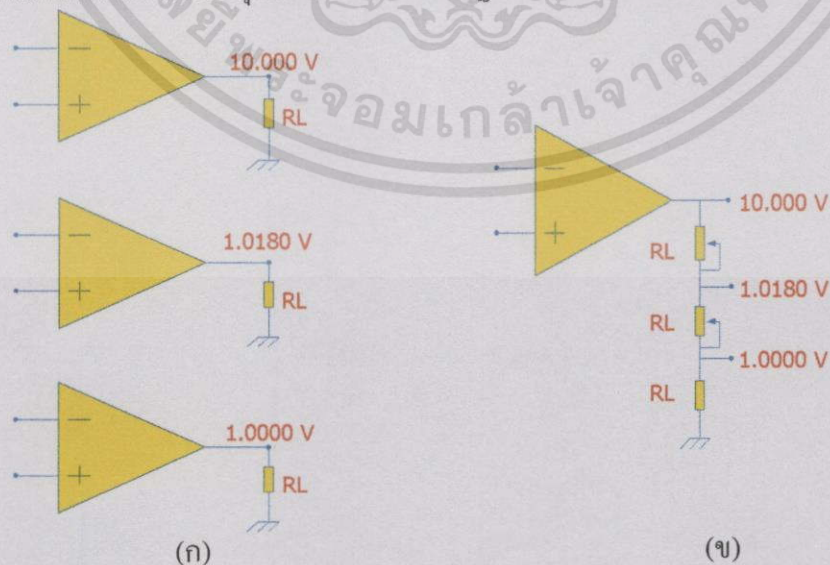
บทที่ 3

การออกแบบและสร้างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

การออกแบบและสร้างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์ ในรูปที่ 3.1 เป็นหลักการทำงานของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแรงดันต่างแยกชุด โดยชุดแรงดันไฟฟ้าแต่ละชุดจะเป็นอิสระต่อกันส่งผลถึงเสถียรภาพดีกว่าชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดัน



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแรงดันต่าง



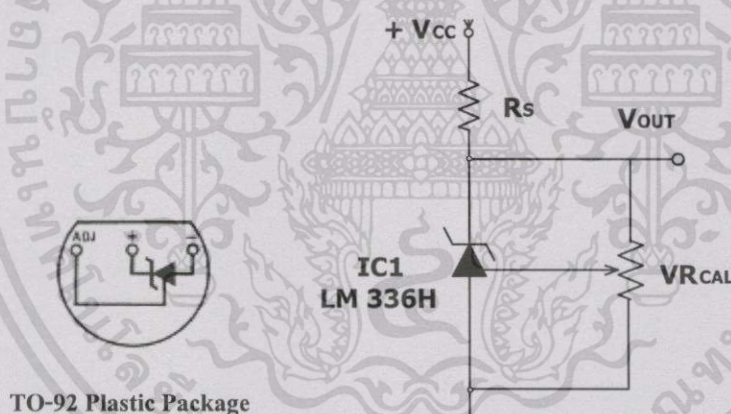
รูปที่ 3.2 การทำงานของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแรงดันต่าง(ก) กับแบ่งแรงดัน(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

การออกแบบชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงนี้ใช้อุปกรณ์แบบวงจรรวมหรือไอซี LM336H ชนิด ซีเนอร์ไดโอด เป็นส่วนสำคัญของวงจรถัดไป เพราะเป็นไอซีให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่แรงดันอ้างอิง 5.0 โวลต์ เสถียรภาพเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส ที่ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำ ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส รายละเอียดของคุณลักษณะเฉพาะของไอซีดังกล่าวที่ 3.1

การทำให้เสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย ในวงจรพื้นฐานของซีเนอร์ไดโอดแบบวงจรรวมคือไอซี LM336H ของบริษัทเนชั่นแนลเซมิคอนดักเตอร์ จากรูปที่ 3.3 เริ่มที่แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} ช่วง 12 – 15 โวลต์ ผ่านตัวต้านทาน R_s ขนาด 5 กิโลโอห์ม ที่ให้แรงดันตกคร่อม IC1 กับตัวโพเทนชิโอมิเตอร์ (VRCAL) ขนาด 1 กิโลโอห์ม ช่วงตั้งแต่ 4 ถึง 6 โวลต์ ในทางปฏิบัติจะปรับแรงดันตกคร่อม IC1 ให้ V_{OUT} ได้เท่ากับ 5 โวลต์ โดยการปรับ VRCAL กระแสประมาณ 1 มิลลิแอมป์

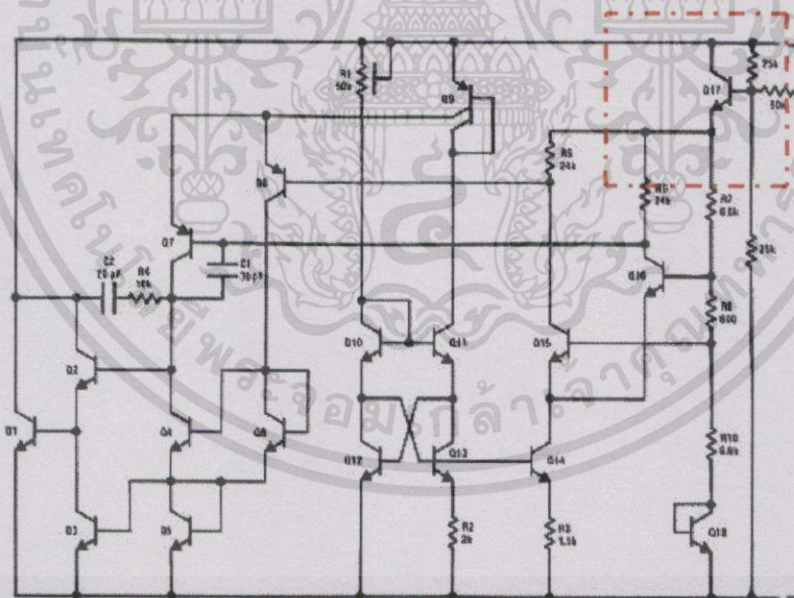


รูปที่ 3.3 วงจรพื้นฐาน ไอซีกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

จากวงจรพื้นฐานชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน สามารถวิเคราะห์การไบอัสทรานซิสเตอร์ของวงจรภายในไอซี LM336H ดังรูปที่ 3.4 ให้สัมพันธ์กับ VRCAL การวิเคราะห์วงจรกับอุปกรณ์ รูปที่ 3.5 เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและเพิ่มเสถียรภาพแรงดันตกคร่อมที่ตัวไอซี IC1 ให้ได้แรงดันอ้างอิงที่ต้องการ

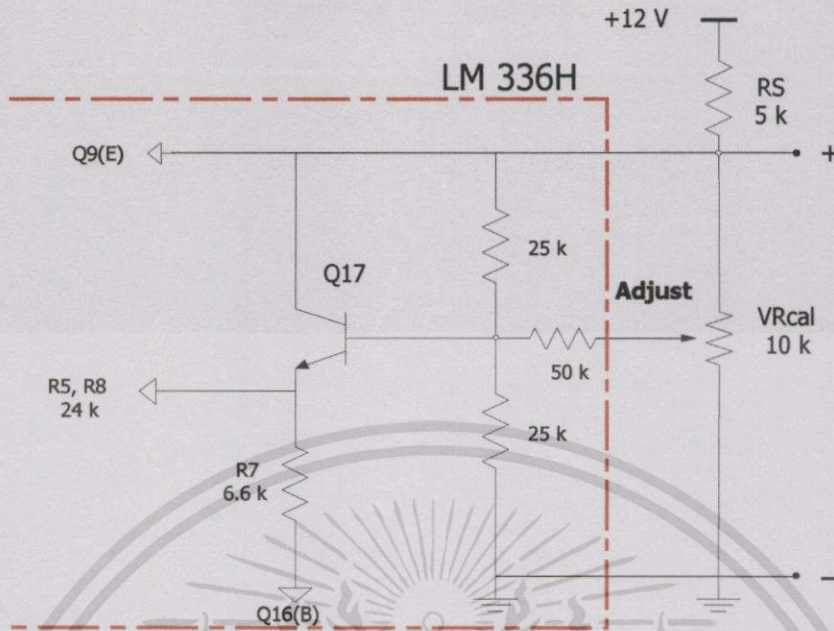
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะของไอซี LM 336H แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง [12]

Parameter	Conditions	LM336B-5.0 LM336-5.0			Units
		Min	Typ	Max	
Reverse Breakdown Voltage	$T_A=25^\circ\text{C}$, $I_R=1\text{ mA}$ LM136-5.0/LM236-5.0/LM336-5.0	4.8	5.00	5.2	V
	LM136A-5.0/LM236A-5.0, LM336B-5.0	4.90	5.00	5.1	V
Reverse Breakdown Change With Current	$T_A=25^\circ\text{C}$, $600\ \mu\text{A}\leq I_R\leq 10\text{ mA}$		6	20	mV
Reverse Dynamic Impedance	$T_A=25^\circ\text{C}$, $I_R=1\text{ mA}$, $f = 100\text{ Hz}$		0.6	2	Ω
Temperature Stability (Note 4)	V_R Adjusted 5.00V $I_R=1\text{ mA}$, (Figure 2) $0^\circ\text{C}\leq T_A\leq 70^\circ\text{C}$ (LM336-5.0) $-25^\circ\text{C}\leq T_A\leq +85^\circ\text{C}$ (LM236-5.0) $-55^\circ\text{C}\leq T_A\leq +125^\circ\text{C}$ (LM136-5.0)		4	12	mV mV mV
Reverse Breakdown Change With Current	$600\ \mu\text{A}\leq I_R\leq 10\text{ mA}$		6	24	mV
Adjustment Range	Circuit of Figure 1		± 1		V
Reverse Dynamic Impedance	$I_R = 1\text{ mA}$		0.8	2.5	Ω
Long Term Stability	$T_A=25^\circ\text{C}\pm 0.1^\circ\text{C}$, $I_R=1\text{ mA}$, $t = 1000\text{ hrs}$		20		ppm

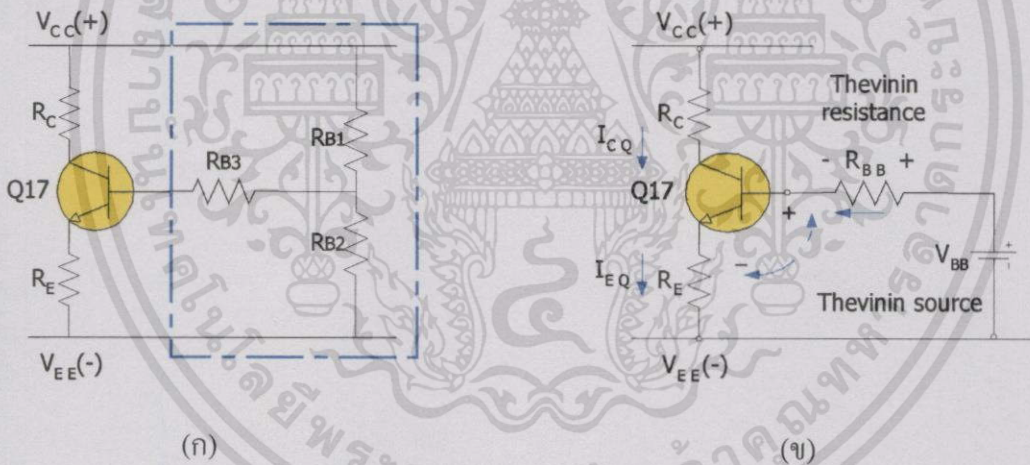


รูปที่ 3.4 วงจรภายในของไอซี LM 336H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การวิเคราะห์ห้วงจรส่วนการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานของไอซี LM336H



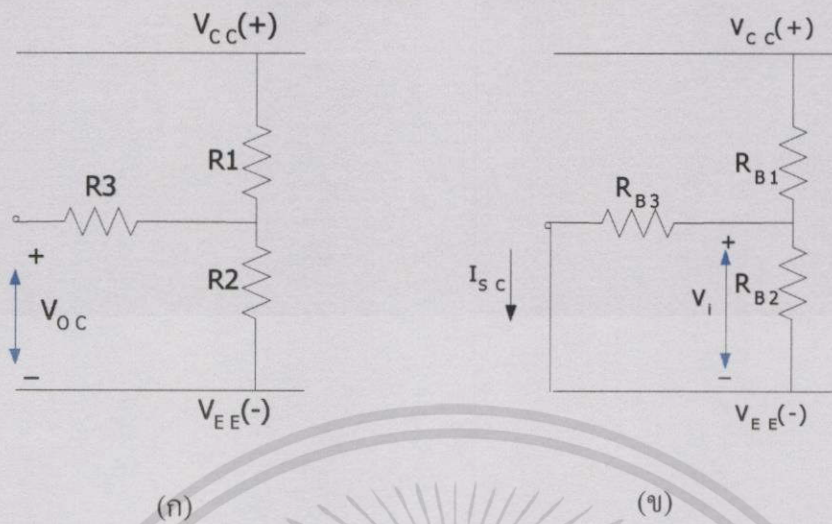
รูปที่ 3.6 (ก) การวิเคราะห์ห้วงจรค่าไบอัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

(ข) การวิเคราะห์ห้วงจรแบบเสมือนเทวินิน

รูปที่ 3.6 (ก) เป็นการวิเคราะห์ห้วงจรหาค่าไบอัสกระแสตรงของไอซี LM336H ชนิดซีเนอร์ ไดโอดแทนด้วยวงจรเสมือนเทวินิน (Thevenin's equivalent circuit) ดังรูปที่ 3.6 (ข) ให้ V_{BB} และ V_{OC} เป็นแรงดันเทวินิน

$$V_{BB} = V_{OC} = \frac{(V_{CC} - V_{EE})R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 (ก) และ 3.7 (ข) การหาค่าความต้านทานไบอัสของวงจรเสมือนเทวินิน

การหาค่า R_{BB} ค่าของ V_i วงจรรูปที่ 3.7 (ข) จะเป็นดังนี้

$$V_i = \frac{(V_{CC} - V_{EE})(R_{B3} // R_{B2})}{R_{B1} + (R_{B3} // R_{B2})} \quad (3.2)$$

ความต้านทานเทวินิน: $R_{BB} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$

$$R_{BB} = \frac{(V_{CC} - V_{EE})R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \times \frac{R_{B3}}{V_i} \quad (3.3)$$

$$= \frac{R_{B2}R_{B3}(R_{B1} + \frac{R_{B3}R_{B2}}{R_{B3} + R_{B2}})}{R_{B1} + R_{B2}(\frac{R_{B3}R_{B2}}{R_{B3} + R_{B2}})} \quad (3.4)$$

$$R_{BB} = R_{B1} // R_{B2} + R_{B3} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

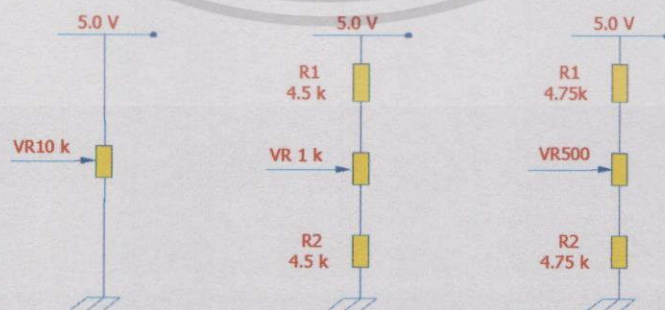
เมื่อได้ค่าของ V_{BB} และ R_{BB} แล้วสามารถหาค่ากระแส I_{BQ} โดยเขียนสมการแบบเคลวิน(Kelvin's equivalent circuit : KVL) จากรูปที่ 3.6 (ข) เมื่อ

$$V_{EE} + V_{BB} - V_{EE} = R_{BB} I_{BQ} + V_{BE} + R_E I_{BQ} \quad (3.6)$$

หาค่า I_{CQ}

$$I_{CQ} = \frac{\beta_0 (V_{BB} - V_{BE})}{R_{BB} + (\beta_0 + 1)R_E} \quad (3.7)$$

เมื่อสามารถกำหนดกระแสไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ Q17 ของไอซี LM 336H ประมาณ 1 มิลลิแอมป์ ได้แล้วให้มาพิจารณาค่าความต้านทาน V_{RCAL} ค่า 10 กิโลโอห์ม ที่ทำหน้าที่ปรับกระแสไบอัสและแบ่งแรงดันที่ขา Adjust ของไอซี LM336H หากว่ากำหนดกระแสไบอัสหรือแรงดันตกคร่อม V_{RCAL} ให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณขี้น้อยหรือละเอียดมากเท่าใดก็จะทำให้ได้แรงดันอ้างอิงที่เอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรืออ่านได้ละเอียดมากเท่านั้น จากหลักการนี้สามารถนำมากำหนดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานที่เอาท์พุทคือตั้งแต่ 100 ไมโครโวลต์ จนถึง 10 ไมโครโวลต์ ด้วยการขยายความละเอียดในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าให้อ่านได้ละเอียดมากยิ่งขึ้นจากตัวต้านทาน V_{RCAL} ตัวอย่างเช่นกำหนดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเอาท์พุทเท่ากับ 5 โวลต์ ใช้ V_{RCAL} ขนาด 10 กิโลโอห์ม เพื่อปรับให้ได้แรงดัน 5 โวลต์ เพียงเพิ่มค่าตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ที่มีค่าความผิดพลาด $\pm 1\%$ ให้มีการแบ่งแรงดันไฟฟ้าไบอัสอย่างสมมาตรกันดังรูปที่ 3.8 วิธีการดังกล่าวจะทำให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่เอาท์พุทมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยลงและเพิ่มเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของ VR500 ต่อบนมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ VR10k และ VR1k พิจารณาที่ VR500 อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อบนเท่ากับ 500 โอห์มต่อ 25 รอบ ส่วน VR10k และ VR1k อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อบนเท่ากับ 10k โอห์ม และ 1k โอห์มต่อ 25 รอบตามลำดับ



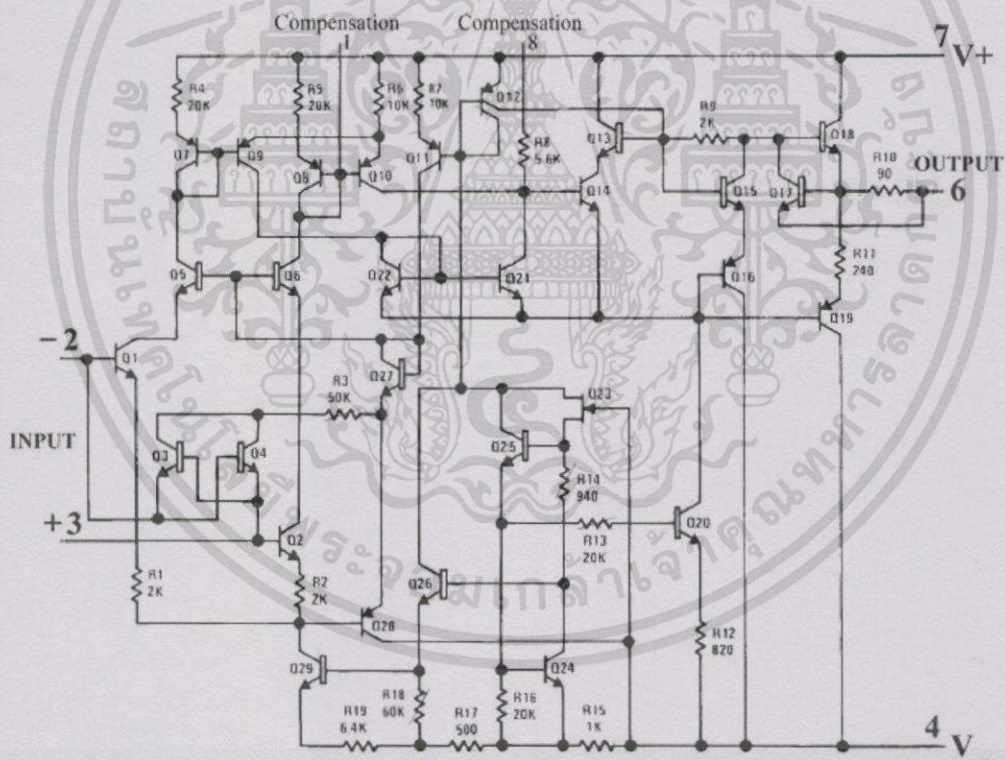
รูปที่ 3.8 เทคนิคการเพิ่มความไวการปรับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเอาท์พุทช่วง $10 \mu\text{V}$ ถึง $100 \mu\text{V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานนี้ให้เอาท์พุทที่ 0.5 และ 0.509 โวลต์ ก็ออกแบบเช่นเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 5 โวลต์ เพียงแต่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมตัวต้านทานแบ่งแรงดันของการลดระดับแรงดันไฟาลงจาก 5 โวลต์ ให้ได้ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เท่ากับ 0.5 และ 0.509 โวลต์ โดยลำดับ ด้วยวิธีแบ่งแรงดัน โดยการเพิ่มชุดแบ่งแรงดันขึ้นมาอีกชุดหนึ่งแต่ใช้หลักการขยายสเกลการปรับความละเอียดเหมือนกัน

3.2 การออกแบบวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า

ภายในวงจรรวมของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าใช้ไอซี LM308 รูปที่ 3.9 เป็นแบบตัวถังโลหะช่วงอุณหภูมิทำงานตั้งแต่ $0 - 70^{\circ}\text{C}$ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไอซี LM308 ได้ตั้งแต่ ± 18 โวลต์ ค่าคริปท์ต่ำมาก ด้วยค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิ $3 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$



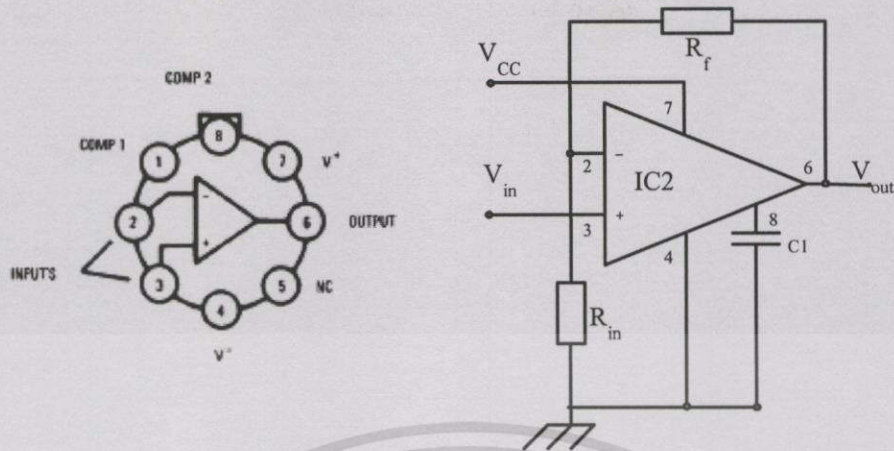
รูปที่ 3.9 วงจรภายในของไอซี LM308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเฉพาะของไอซีออปแอมป์ LM308 ขยายแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน[13]

Parameter	Condition	LM308			Units
		Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$		2.0	7.5	mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.2	1	nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1.5	7	nA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$	10	40		M Ω
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.3	0.8	mA
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 15\text{V}$ $V_{OUT} = \pm 10\text{V}, R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	25	300		V/mV
Input Offset Voltage				10	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage			6.0	30	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current				1.5	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current			2.0	10	pA/ $^\circ\text{C}$
Input Bias Current				10	nA
Supply Current	$T_A = +125^\circ\text{C}$				mA
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15\text{V}, V_{OUT} = \pm 10\text{V}$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	15			V/mV
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15\text{V}, R_L = 10\text{ k}\Omega$	± 13	± 14		V
Input Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	± 14			V
Common Mode Rejection Ratio		80	100		dB
Supply Voltage Rejection Ratio		80	96		dB

การออกแบบวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้เอาต์พุตแบบแรงดันต่างแยกชุด วงจรชุดนี้จะขยายแรงดันที่ได้จากชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงได้แก่ 0.5, 0.509 และ 5 โวลต์ โดยทำอัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าหรือแบบทวีแรงดัน ซึ่งประกอบด้วยภาคขยายที่แยกส่วน 3 ชุดด้วยกันได้แก่ 1.0, 1.018 และ 10 โวลต์ อุปกรณ์ประเภทออปแอมป์ที่ใช้ในการออกแบบได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์วัดที่ตอบสนองความถี่ต่ำ ชุดขยายสัญญาณ และบัฟเฟอร์ วงจรพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งาน ได้ประเภท voltage follower ดังรูปที่ 3.10 เป็นวงจรพื้นฐานออปแอมป์ เมื่อเกรนหรืออัตราขยายของการวัดจะหาได้จากอัตราส่วนค่าตัวต้านทานอินพุต (R_{in}) และป้อนกลับ (R_f) กำลังขยายปราศจากการป้อนกลับก็จะมีกำลังขยายเข้าสู่อินพุต ถ้ากำลังขยายด้วยตัวป้อนกลับติดลบจะได้ว่า $-R_f/R_{in}$ จุดประสงค์หลักๆของวงจรมีก็คือปรับอัตราขยาย (gain) ให้เที่ยงตรง วงจรนี้ไม่ใช่ชุดขยายแรงดันในอุดมคติเพราะว่า R_{in} จะคิ่งกระแสดจากอินพุตเป็นเหตุผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดได้



รูปที่ 3.10 การออกแบบวงจรขยายชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

แต่อย่างไรก็ตามสามารถที่จะกำหนด กระแสป้อนกลับให้กำลังขยายของ voltage follower ดังสมการที่ 3.8

$$[V_{out}/V_{in}] = 1 + R_f/R_{in} \quad (3.8)$$

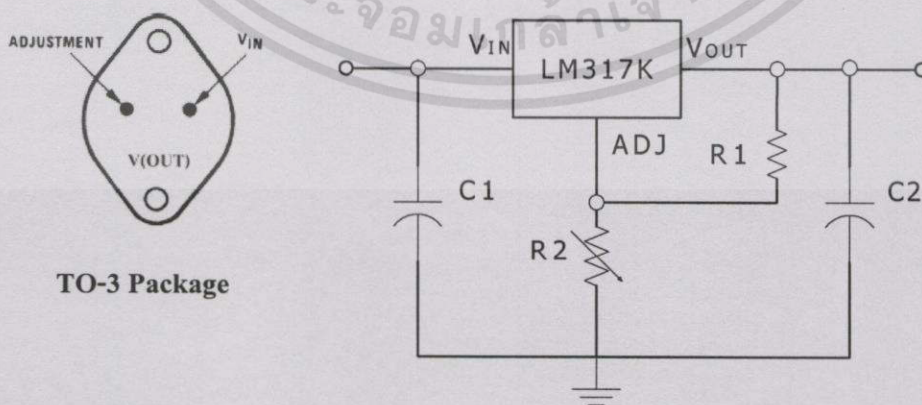
การออกแบบวงจรขยายแรงดันไฟฟ้านั้น เลือกใช้ตัวต้านทานป้อนกลับ (R_f) และ ความต้านทานอินพุท (R_{in}) มีค่าเท่ากับ 20 กิโลโอห์ม ค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ กับ ตัวตัวคาปาซิเตอร์ (C_1) ใช้เป็นแบนด์พาสฟิลเตอร์ (bandpass filter) 100 พิโคฟารัด

3.3 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulator Circuit)

วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบวงจรรวม LM317K ตัวถังแบบ TO-3 ดังรูปที่ 3.11 จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นประมาณ 16 โวลต์ ขนาดกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ แรงดันอินพุท (V_{in}) ผ่านตัวคาปาซิเตอร์ (C_1) กรองสัญญาณรบกวน ปรับแรงดันเอาท์พุทด้วยตัวโพลีเท็นซิโอมิเตอร์ (R_2) ปรับแรงดันให้ได้เอาท์พุทเท่ากับ 12 โวลต์ โดยมี R_1 เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง แล้วผ่านตัวคาปาซิเตอร์ (C_2) กรองสัญญาณรบกวนอีกครั้ง

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติเฉพาะของไอซี LM317K ควบคุมแรงดันไฟฟ้า[14]

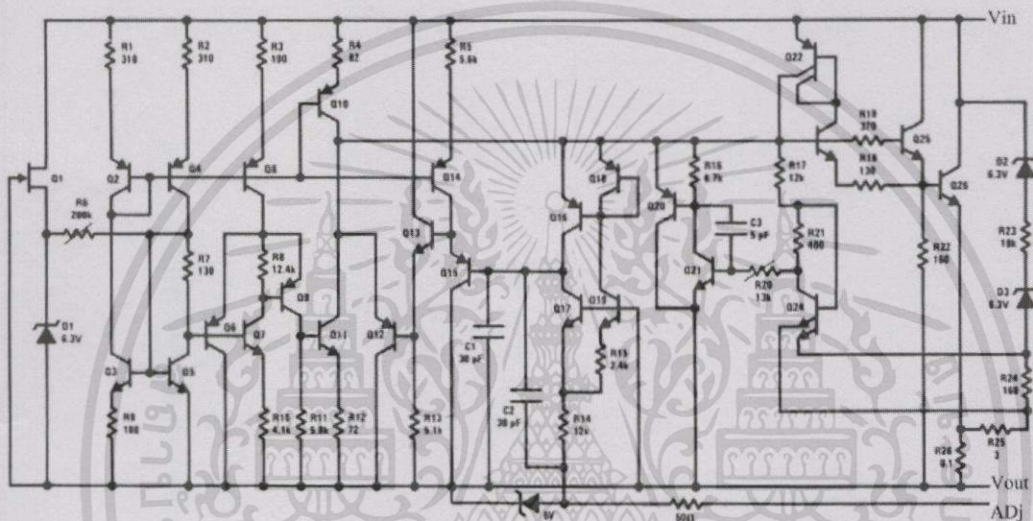
Parameter	Conditions	LM317A			LM317			Units		
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max			
Reference Voltage		1.238	1.250	1.262				V		
	$3V \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40V$, $10 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$, $P \leq P_{MAX}$	1.225	1.250	1.270	1.20	1.25	1.30	V		
Line Regulation	$3V \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40V$ (Note 4)		0.005	0.01		0.01	0.04	%/V		
			0.01	0.02		0.02	0.07	%/V		
Load Regulation	$10 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ (Note 4)		0.1	0.5		0.1	0.5	%		
			0.3	1		0.3	1.5	%		
Thermal Regulation	20 ms Pulse		0.04	0.07		0.04	0.07	%/W		
Adjustment Pin Current			50	100		50	100	μA		
Adjustment Pin Current Change	$10 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ $3V \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40V$		0.2	5		0.2	5	μA		
Temperature Stability	$T_{MIN} \leq T_J \leq T_{MAX}$		1			1		%		
Minimum Load Current	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40V$		3.5	10		3.5	10	mA		
Current Limit	$(V_{IN} - V_{OUT}) \leq 15V$ K, T, S Packages		1.5	2.2	3.4	1.5	2.2	3.4	A	
		H Package		0.5	0.8	1.8	0.5	0.8	1.8	A
		MP Package		1.5	2.2	3.4	1.5	2.2	3.4	A
	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40V$ K, T, S Packages			0.15	0.4		0.15	0.4	A	
		H Package		0.075	0.2		0.075	0.2	A	
		MP Package		0.55	0.4		0.15	0.4	A	
RMS Output Noise, % of V_{OUT}	$10 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ kHz}$		0.003			0.003		%		
Ripple Rejection Ratio	$V_{OUT} = 10V$, $f = 120 \text{ Hz}$, $C_{ADJ} = 0 \mu\text{F}$		65			65		dB		
	$V_{OUT} = 10V$, $f = 120 \text{ Hz}$, $C_{ADJ} = 10 \mu\text{F}$		66	80		66	80	dB		
Long-Term Stability	$T_J = 125^\circ\text{C}$, 1000 hrs		0.3	1		0.3	1	%		
Thermal Resistance, Junction-to-Case	K Package					2.3	3	$^\circ\text{C/W}$		
	MDT Package					5	15	$^\circ\text{C/W}$		
	H Package		12	15		12	15	$^\circ\text{C/W}$		
	T Package		4	5		4		$^\circ\text{C/W}$		
	MP Package		23.5			23.5		$^\circ\text{C/W}$		
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient (No Heat Sink)	K Package		35			35		$^\circ\text{C/W}$		
	MDT Package (Note 6)					92		$^\circ\text{C/W}$		
	H Package		140			140		$^\circ\text{C/W}$		
	T Package		50			50		$^\circ\text{C/W}$		
	S Package (Note 6)		50			50		$^\circ\text{C/W}$		



รูปที่ 3.11 วงจรชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า

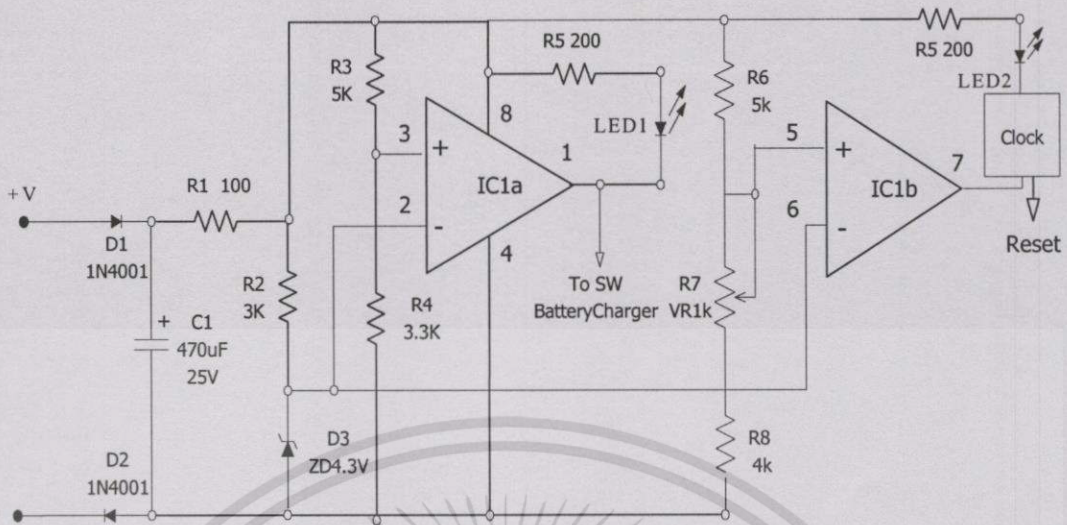
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์ไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้า LM317K ให้เป็น IC1 ทำหน้าที่ 2 ส่วน ส่วนแรกมีหน้าที่เป็นชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าและจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ส่วนที่สองทำหน้าที่ประจุแบตเตอรี่ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์เพื่อประจุแบตเตอรี่สำรอง (battery backup) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดซีลคัสต์ (sealed lead-acid battery type) ที่ไม่ต้องเติมน้ำกลั่นตลอดอายุการใช้งาน แบตเตอรี่นี้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้า ขนาด 12 โวลต์ ขนาด 1.2 แอมป์ จำนวน 2 ก้อน ต่อแบบขนานกันให้ได้กระแสเพิ่มขึ้นแต่แรงดันไฟฟ้าเท่าเดิม กระแสชาร์จ 750 มิลลิแอมป์



รูปที่ 3.12 วงจรภายในไอซี LM317K

จ่ายกระแสได้สูงสุด 1.2 แอมป์ โดยทั่วไปขณะทำการวัดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานจำเป็นต้องแยกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงให้เหลือเพียงแหล่งจ่ายจากแบตเตอรี่เท่านั้น เหตุผลก็เพื่อว่าจะได้กำจัดการกระเพื่อมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน



รูปที่ 3.13 ชุดแสดงระดับแรงดันไฟฟ้า

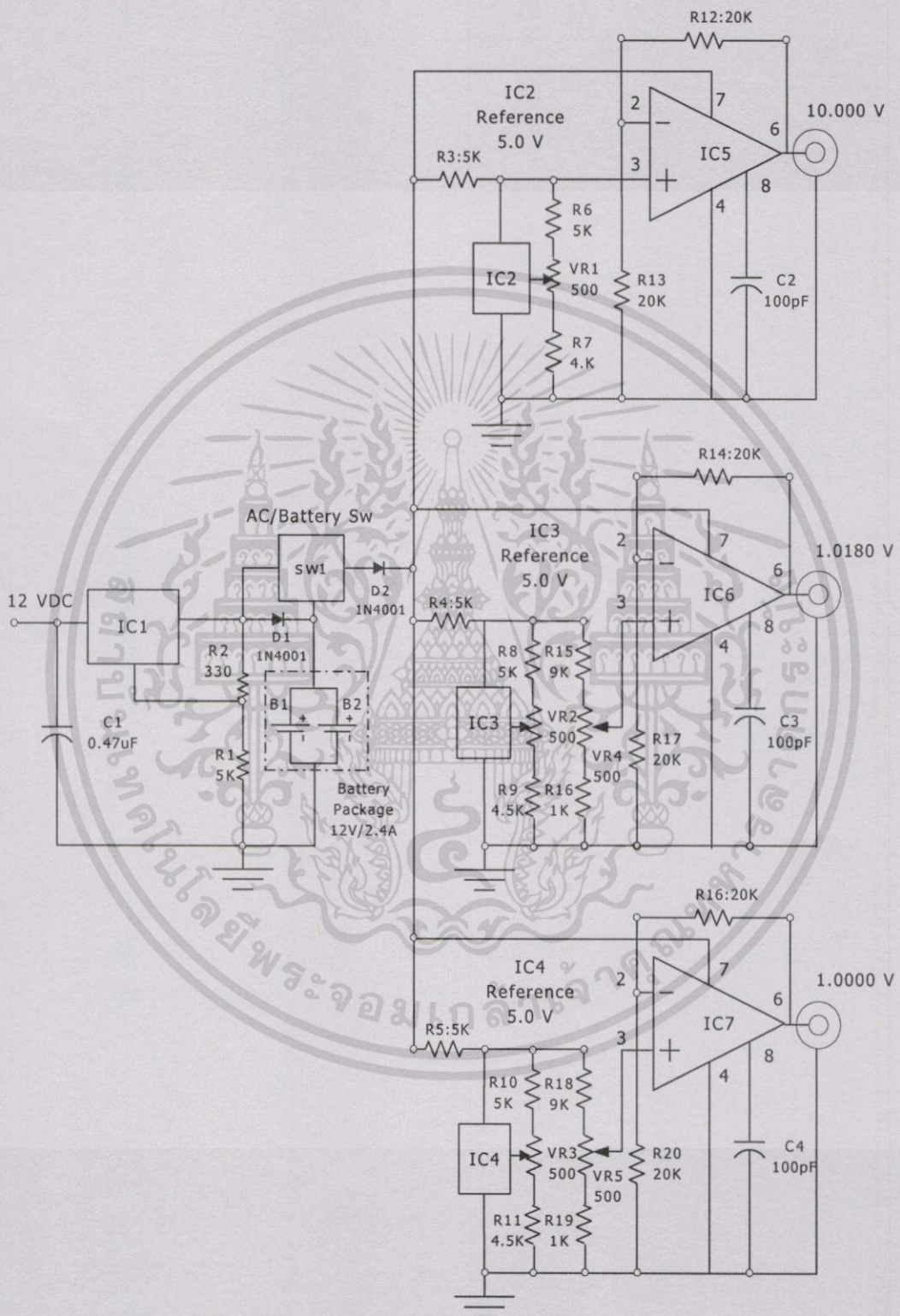
จากรูปที่ 2.13 เป็นวงจรที่ใช้หลักการเปรียบเทียบแรงดันของไอซี LM1458 แบบสองชุดในตัวเดียวกัน (dual integrate circuit) เริ่มจากส่วนแรก IC1a เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ตกลงเหลือ 11.5 โวลต์ ทำให้แรงดันตกคร่อมที่ขา 3 จะเท่ากับ 4.3 โวลต์ เนื่องจากผ่าน R3 และ R4 เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขา 2 เท่ากับขา 3 ทำให้ที่ขา 1 ของไอซี IC1a เป็นลบ หลอดไฟ LED1 สีแดง (BATT CHG) จะติดเพื่อแสดงสภาวะต้องการประจุแบตเตอรี่ แล้วเชื่อมต่อไปยังสวิตช์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (SW battery charger) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้เท่ากับ 12 โวลต์ อยู่ตลอดเวลา ส่วนที่สอง IC2b เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตกลง 10.5 โวลต์ กรณีปิดสวิตช์เพาเวอร์ทำให้แรงดันตกคร่อมที่ขา 5 จะเท่ากับ 4.3 โวลต์ เนื่องจากการแบ่งแรงดันด้วย R6, R7 และ R8 เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขา 2 เท่ากับขา 3 ทำให้ที่ขา 7 ของไอซี IC2b เป็นลบ ชุดสัญญาณนาฬิกาหรือ โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (monostable multivibrator) ก็จะทำให้หลอดไฟ LED2 สีแดง (INCAL) จะกระพริบเพื่อแสดงสภาวะ INCAL ซึ่งหมายถึง เตือนให้ทราบว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่เพียงพอ จะส่งผลให้เสถียรภาพของ MET-10VDC-II เปลี่ยนแปลงไป และเป็นการเตือนให้นำไปสอบเทียบมาตรฐานใหม่ทุกครั้งทีไฟแสดง INCAL ติด และจะต้องรีเซ็ตเมื่อเสถียรภาพให้คืนสู่สภาพเดิมสามารถนำมาใช้งานได้ตามปกติ เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เท่ากับ 12 โวลต์ หลอดไฟ LED1 และ LED2 ก็ดับ

3.4 การสร้างและหลักการทำงานของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

การออกแบบและสร้างวงจรแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานชุดMET-10VDC-II ดังรูปที่ 3.14 มีการออกแบบให้มีเอาต์พุตแยกจากกันอย่างอิสระ 3 ชุดด้วยกันคือขนาด 10, 1.018 โวลต์และ 1 โวลต์ โดยมีหลักการทำงานดังนี้ เริ่มต้นชุดแรกเป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์ แรงดันจากเบตเตอร์ที่อินพุต (Vin) ป้อนให้กับภาคกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง IC2 ไอซีเบอร์ LM336H มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิประมาณ 20 พีพีเอ็มต่อปี ที่อุณหภูมิ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส มีความเที่ยงตรงอย่างต่อเนื่องถึง $\pm 0.05\%$ ต่อปี หรือดีกว่า โดยผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแส R3 ค่าความต้านทาน 5 กิโลโอห์ม ชนิดเมทัลฟิล์ม (Metal film) มีค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันตั้งแต่ ± 100 พีพีเอ็มต่อองศาเซลเซียส ป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 1 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวไอซีกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงทั้งสามตัวจะถูกปรับระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวโพลีโพรพิลีน VR1 มีความต้านทาน 500 โอห์ม ชนิดปรับละเอียดได้ 25 รอบแบบมัลติเทิร์น(multi-turn) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน R6, R7 ค่าความต้านทาน 5.5 กิโลโอห์ม และ 5 กิโลโอห์ม ชนิดเมทัลฟิล์ม(Metal film) มีค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ โดยลำดับ ให้ได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 5 โวลต์ จากนั้นป้อนเข้าสู่ขา 3 ของ IC5 (LM308) เป็นไอซีภาคขยายแรงดันไฟฟ้าที่ต่อแบบนอนอินเวอร์ต ซึ่งต่อแบบทวีแรงดันทำให้แรงดันไฟฟ้าขา 6 ของ IC5 เพิ่มขึ้นสองเท่าตามอัตราส่วนของตัวต้านทานป้อนกลับต่อตัวต้านอินพุต (RF/R1) ค่าความต้านทาน 20 กิโลโอห์ม ชนิดเมทัลฟิล์ม(Metal film) มีค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ คือ R12/R13 กำหนดแรงดันไฟฟ้าขาออกขนาด 10 โวลต์ ต้องปรับระดับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ IC2 ให้ได้เท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (Vout) เท่ากับ 5 โวลต์

ส่วนที่สองและสามเป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1.018 มีหลักการในการออกแบบวงจรคล้ายกันกับในส่วนแรกจะแตกต่างก็เพียงแต่ชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง IC3 เท่านั้นและการออกแบบวงจรในส่วนที่สองและสามนี้จะแตกต่างไปจากชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานทั่วไปซึ่งเป็นแบบแบ่งแรงดันดังได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น ส่วนที่เพิ่มเติมประกอบด้วย R15 และ R16 ค่าความต้านทาน 9 และ 1 กิโลโอห์ม ตามลำดับค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ ต่ออนุกรมกับ VR4 ค่าความต้านทาน 500 โอห์ม ชนิดปรับละเอียดได้ 25 รอบ ซึ่งปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงขนาด 0.509 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับภาคขยายแรงดันเอาต์พุตด้วย IC6 ให้ได้แรงดันไฟฟ้าขนาด 1.018 โวลต์

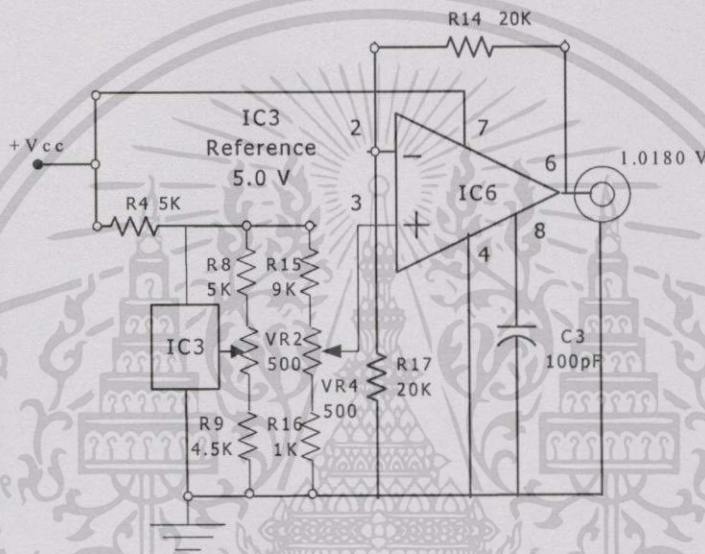
ส่วนที่สามการออกแบบขนาดแรงดันไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง IC4 เหมือนกับการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้าขนาด 1.018 โวลต์ ประกอบด้วย R18 และ R19 ค่าความต้านทาน 9 และ 1 กิโลโอห์ม ตามลำดับค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ ต่ออนุกรมกับ VR5 ค่าความต้านทาน 500 โอห์ม ชนิดปรับละเอียดได้ 25 รอบ ซึ่งปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงขนาด 0.5 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับภาคขยายแรงดันเอาต์พุตด้วย IC7 ให้ได้แรงดันไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์



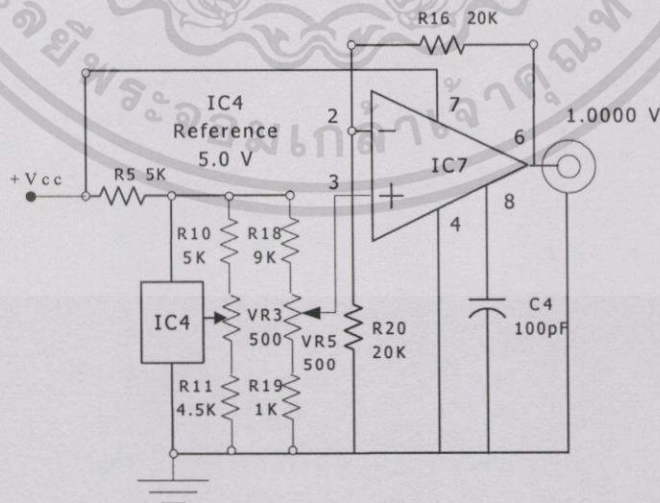
รูปที่ 3.14 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน MET - 10VDC - II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีกระแสต่ำกว่า 10 มิลลิแอมป์ ส่วนการกรองสัญญาณรบกวนนั้นใช้ตัวเก็บประจุ C1 ค่า 100 พิโคฟารัด ต่อกับขา 8 เป็นเบนด์พาสฟิลเตอร์ ด้วยคุณลักษณะเฉพาะของไอซี ออปแอมป์นี้จึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์พวกไบโพลาร์มาต่อพ่วงและความเสถียรภาพสูงของออปแอมป์ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าออปแอมป์ทั่วไป ดังนั้นค่าตัวต้านทานป้อนกลับจึงต้องมีค่าสูงกว่าปกติ สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวงจรนี้ก็คือไม่ควรต่อเข้ากับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า 10 กิโลโอห์ม และนอกจากนี้ยังมีชุดไฟฟ้าสำรอง (battery backup) ขนาด 12 โวลต์จ่ายให้กับ IC2 , IC3 และ IC4 เพื่อการทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกด้วย

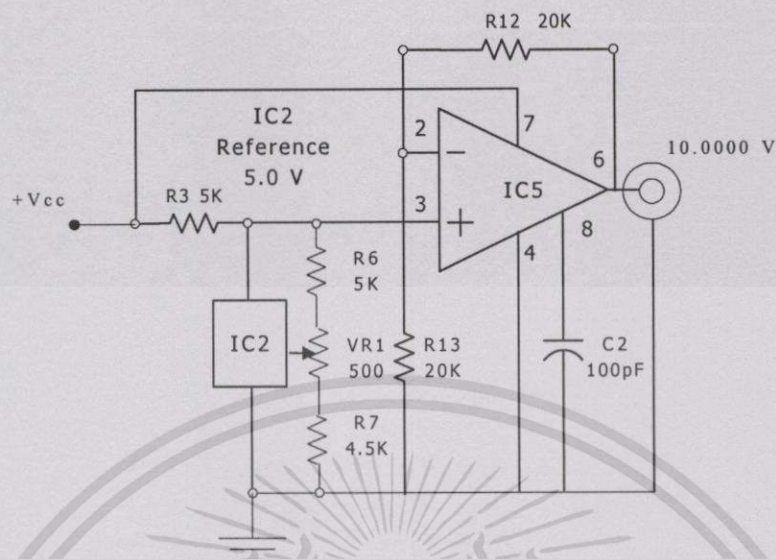


รูปที่ 3.15 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 1.0180 โวลต์ แบบซีเนอร์ไดโอด



รูปที่ 3.16 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 1.0000 โวลต์ แบบซีเนอร์ไดโอด

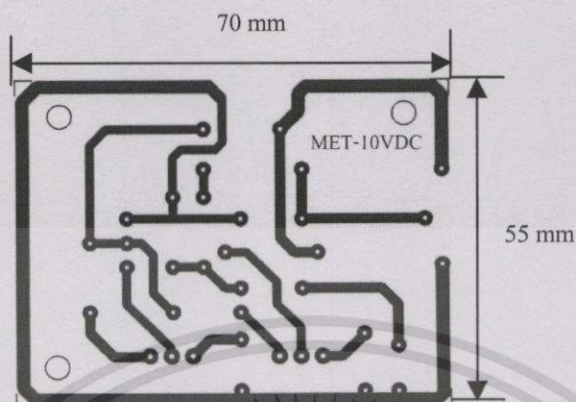
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์
แบบซีเนอร์ไดโอด

3.5 การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ อุปกรณ์ประกอบและตัวกล่อง

การออกแบบลายวงจรพิมพ์ของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานนับว่าเป็นส่วนสำคัญมากส่วนหนึ่ง เนื่องจากที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1, 1.018 และ 10 โวลต์ มีเสถียรภาพ 100 พีพีเอ็ม คอนข้างจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแวลดล่อม ได้แก่ อุณหภูมิ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสัญญาณรบกวนต่างๆ เป็นต้น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่างๆ เช่น ลักษณะการวางตัวอุปกรณ์ ตำแหน่งอุปกรณ์ ลักษณะลายทองแดง ขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์ และการเชื่อมต่อสายไฟ เป็นต้น รูปแบบการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานนี้ประกอบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ 3 แผ่นด้วยกัน มีขนาดกว้าง 55 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.18 เพื่อความสะดวกในการออกแบบด้วย ลายวงจรพิมพ์แบบเดียวกันทั้งหมด โดยกำหนดให้ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ของแผ่นวงจรพิมพ์ชุดแรงดันไฟฟ้าขนาด 10 โวลต์ ดังรูปที่ 3.19 (ก) ส่วนการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของแผ่นวงจรพิมพ์ชุดแรงดันไฟฟ้าขนาด 1 และ 1.018 โวลต์ จะเหมือนกันดังรูปที่ 3.19(ข) จะแตกต่างไปจากชุดแรงดันไฟฟ้าสองชุดแรกแต่ก็ใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบเดียวกัน ในการออกแบบเพื่อวางตำแหน่งอุปกรณ์ควรพิจารณาถึงลักษณะการวางว่าอุปกรณ์ต้องไม่ทำให้ขาอุปกรณ์บิดเบี้ยวหรือโค้งงอโดยไม่จำเป็นเพราะจะมีผลทำให้เกิดเทอร์มัลอีเอ็มเอฟเป็นสัคย์ตกคร่อมปริมาณหนึ่งเกิดขึ้น ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ควรหลีกเลี่ยงการ บิด หักพับ โค้ง งอ ของขาอุปกรณ์โดยไม่จำเป็น



รูปที่ 3.18 แผ่นวงจรพิมพ์ของชุด MET10-VDC-II ด้านลายทองแดง



(ก)

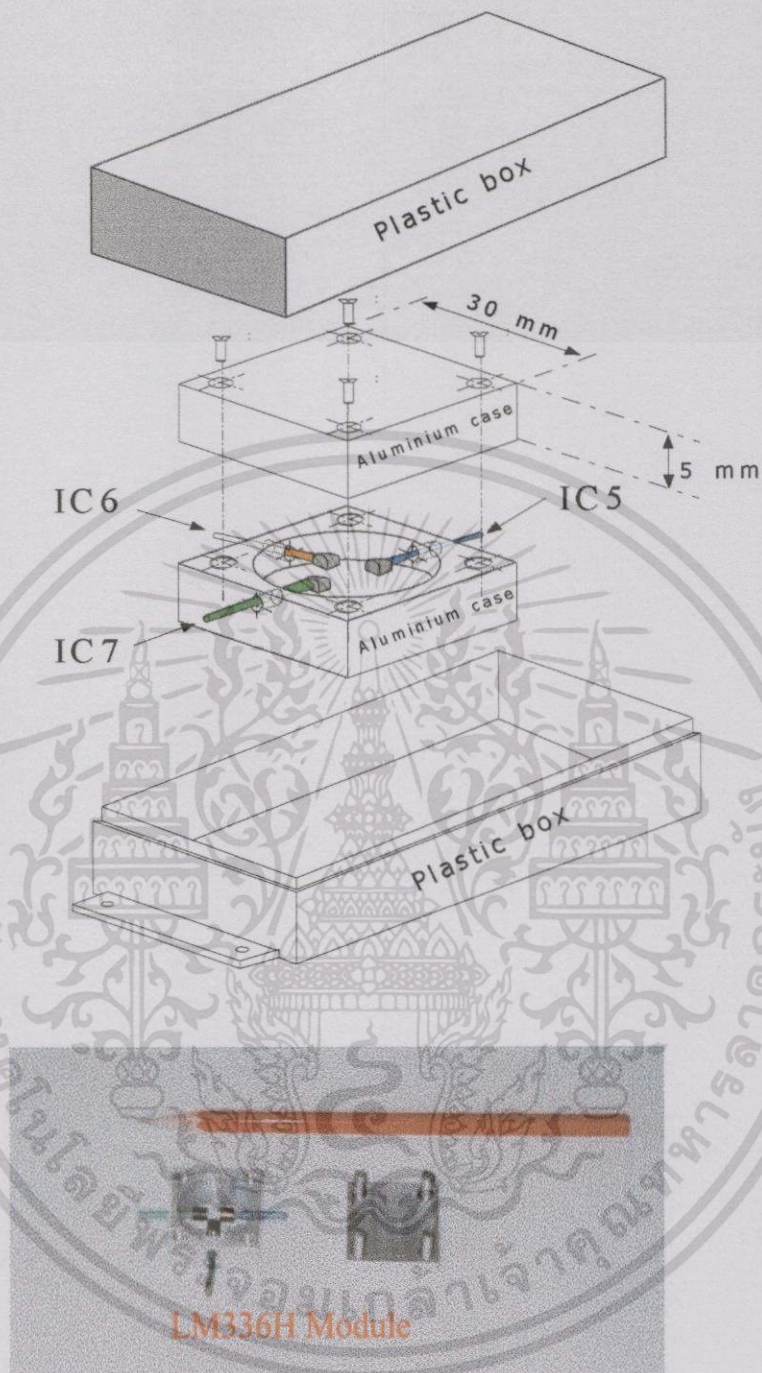
(ข)

รูปที่ 3.19 แผ่นวงจรพิมพ์และอุปกรณ์ของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (ก) ขนาด 10 โวลต์ และ(ข) ขนาด 1, 1.018 โวลต์

ในรูปที่ 3.20 แสดงอุปกรณ์ที่บรรจุไอซีกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน (LM336H) ทั้งสามตัว เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพให้กับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมากยิ่งขึ้น โดยออกแบบกล่องอลูมิเนียมบรรจุไอซี LM336H มิใช่เพื่อการระบายความร้อนและใส่ไว้ในกล่องพลาสติกอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งการออกแบบกล่องแบบสองชั้นมีวัตถุประสงค์ดังนี้ คือ

1. เพื่อรักษาเสถียรภาพต่อสภาวะอุณหภูมิของไอซี LM336H ให้มากขึ้น(กล่องพลาสติก)
2. เพื่อชิลด์ป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า(กล่องอลูมิเนียม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

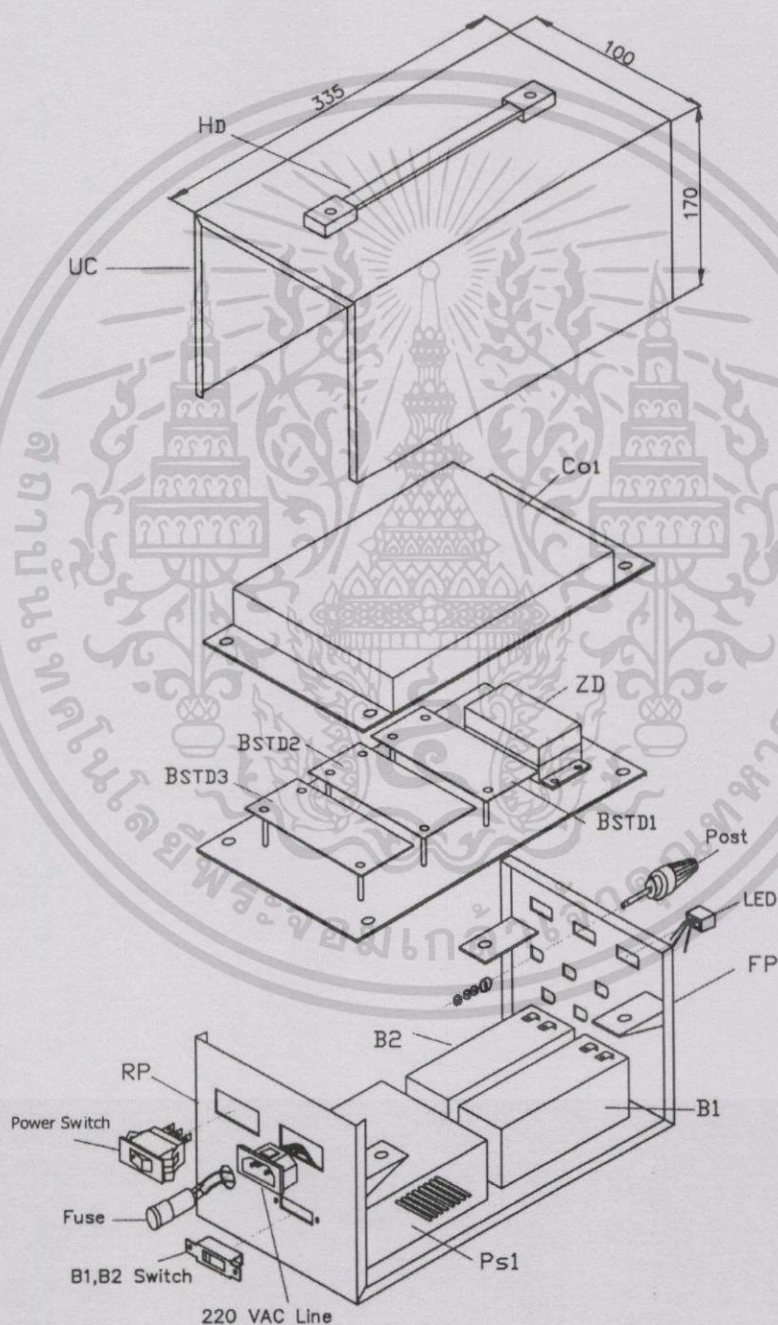


รูปที่ 3.20 กล่องบรรจุไอซีกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน (LM336H)

การออกแบบกล่อง ฝาครอบ และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ กล่องอลูมิเนียม (Aluminium case) ของไอซี LM336H โมดูล (LM336H module) เพื่อซีลชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานดังรูปที่ 3.21 มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าส่วนอื่นเช่นกัน เนื่องจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพในช่วง 100 ปีที่เอ็มนั้น ดังได้กล่าวมาแล้วว่าผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมค่อนข้างสูง การออกแบบตัวกล่องมีวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสงค์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเนื่องจากการแทรกสอดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นช่วงความถี่ต่ำหรือสูง เพื่อคงไว้ซึ่งความเสถียรภาพจากเทคนิคการชิลด์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจำเป็นต้องพิจารณาถึงชนิดของวัสดุ ขนาด รูปทรง และการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานนี้กล่องมีขนาด กว้าง x สูง x ลึก (100 x 170 x 335 มม.) ใช้แผ่นเหล็กหนา 0.6 มม. และฝาครอบอลูมิเนียม (CO1) เพื่อใช้สำหรับชิลด์ในส่วนของวงจรขนาด กว้าง x ยาว x สูง (95 x 300 x 40 มม.) หน้า 2 มม.



รูปที่ 3.21 กล่องใส่ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน MET-10VDC-II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

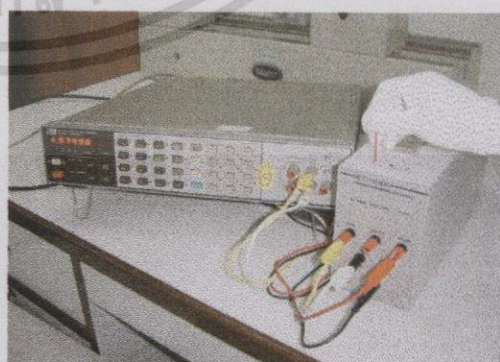
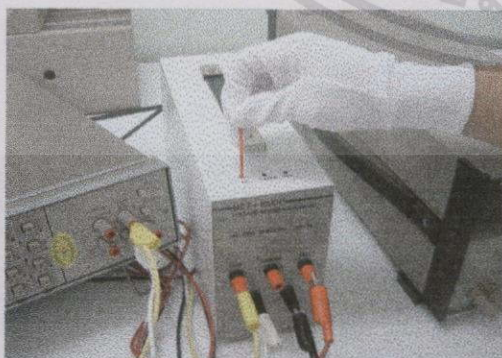
รายละเอียด ตำแหน่ง และ ชื่ออุปกรณ์ใช้อธิบายรูปที่ 3.21

Layout, Case & Dimensions of MET-10VDC (WxHxD:100x170x335mm)

B1: Battery 1(12V/1.2A)	Co1: PCB Cover and Shield
B2: Battery 2(12V/1.2A)	FP : Font panel
Ps1: Power supply and voltage Regulator	RP : Rear panel
ZD: Zener diode module(ZD1, ZD2, ZD3)	HD: Handle
BSTD1: 1.0 VDC standard board	UC: Upper cover
BSTD2: 1.018 VDC standard board	LED: LED indicator
BSTD3: 10 VDC standard board	Post: Output terminal

3.6 การปรับตั้งชุด MET-10VDC-II

การปรับตั้งชุด MET-10VDC-II เป็นสิ่งสำคัญก่อนที่นำไปใช้งานและเป็นสิ่งจำเป็นหลังจากประกอบเสร็จแล้ว ก่อนที่จะทำการทดสอบเสถียรภาพชุดMET-10VDC-II นั้นให้ใช้ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง $5\frac{1}{2}$ หลัก หรือดีกว่า ในการทางปฏิบัติใช้ HP3456A ปรับตั้งที่ตัวต้านทาน VR1, VR2 และ VR3 ซึ่งทำการปรับที่บริเวณด้านบนฝาครอบของ MET-10VDC-II ดังรูปที่ 3.22 ระบุค่าที่ 1.0, 1.018 และ 10 โวลต์ ของชุด MET-10VDC-II ให้แรงดันเอาต์พุตอ่านได้ 1.00000, 1.01800 และ 10.0000 โวลต์ โดยลำดับ ปรับให้อ่านได้ละเอียดถึง 10 ไมโครโวลต์ หรือละเอียดกว่าเท่าที่จะทำได้ ขั้นตอนก่อนทำการปรับควรควบคุมสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 23 องศาเซลเซียส มีความแปรปรวน ± 1 องศาเซลเซียส และ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ มีความแปรปรวน ± 5 เปอร์เซ็นต์ ในระยะแรกจะต้องทำการปรับอยู่เป็นประจำทุกวันและเปลี่ยนระยะเป็นวันเว้นวัน ต่อจากนั้นปรับสัปดาห์ละครั้งจนสังเกตเห็นว่าค่าที่อ่านได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 100 พิพีเอ็ม จึงหยุดทำการปรับ สามารถนำไปทดสอบเสถียรภาพเพื่อใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.22 การปรับตั้งชุด MET-10VDC-II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (MET10-VDC-II) ตามขอบข่ายที่กำหนดไว้ในบทที่ 1 สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นวิธีการทดสอบที่มีสัมพันธ์ร่วมกับเวลา ได้แก่ การทดสอบความเสถียรภาพของชุด MET10-VDC-II และส่วนที่สองเป็นการทดสอบที่มีความสัมพันธ์กับสภาวะแวดล้อม ได้แก่ การทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ สัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งหากว่าชุด MET10-VDC-II สามารถทำงานที่มีเสถียรภาพและภายใต้สภาวะแวดล้อมดังกล่าวได้ดีนั้นก็หมายถึงความแม่นยำโดยตรงของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน การทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อดังนี้

1. การทดสอบความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้า
2. การทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะแวดล้อม
3. การทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้าภายใต้สัญญาณรบกวนหรือEMC
 - 3.1 เรดิเอตเต็ด อิมิตชัน (Radiated Emission)
 - 3.2 เรดิเอตเต็ด อิมมูนิตี (Radiated Immunity)
 - 3.3 เพาเวอร์ แมกเนติก ฟิวลด์ อิมมูนิตี (Power magnetic field immunity)
4. การทดสอบค่ารีปเปลชของชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า
5. การสอบเทียบมาตรฐาน
 - 5.1 การสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้า
 - 5.2 การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์

4.1 การทดสอบความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

การทดสอบเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานเป็นวิธีที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางไฟฟ้าใช้ติดตามสังเกตความเปลี่ยนแปลงและความคงที่ สม่ำเสมอของปริมาณแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันตลอด (อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 55 ± 5 %) ความสัมพันธ์ของความเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานจะอยู่ในรูปของพีพีเอ็ม (part per million : ppm) ต่อคาบเวลา (period of time) ซึ่งคาบเวลาของเสถียรภาพแบ่งออกเป็น 2 ช่วงระยะเวลาคือ เสถียรภาพระยะสั้น (short term stability) คือช่วงเวลา 30 วัน หรือ 1 เดือน และเสถียรภาพระยะยาว (long term stability) คือช่วงเวลา 90 วัน หรือ 1 ปี ในทางปฏิบัติความเสถียรภาพระยะยาวสั้นจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเท่าใดนักจากกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่ามีความเสถียรภาพดี เมื่อเปรียบเทียบกับความเสถียรภาพระยะยาว จากตัวอย่างการวัดค่าความเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด 10 โวลต์ ค่าความเสถียรภาพระยะสั้นเท่ากับ 0.3 พีพีเอ็ม/เดือน และ ค่าความเสถียรภาพระยะยาวเท่ากับ 3 พีพีเอ็ม/ปี เป็นต้น

4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

การทดสอบเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบความเสถียรภาพของชุด MET-10VDC-II และขั้นตอนที่สองเป็นการทดสอบความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดัน โดยการทดสอบเสถียรภาพทั้งช่วงระยะเวลาสั้นตั้งแต่ 27 กุมภาพันธ์ ถึง 28 มีนาคม 2545 (29 วัน) และช่วงระยะเวลายาว ตั้งแต่ 27 กุมภาพันธ์ ถึง 15 มิถุนายน 2545 (90 วัน) ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ปัจจุบันการวัดความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานสะดวกและมีความแม่นยำยิ่งขึ้น นอกจากจะใช้วิธีการเปรียบเทียบกับชุดแรงดันไฟฟ้าที่มีความเสถียรภาพมากกว่าแล้ว ปัจจุบันนิยมใช้ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ขนาดอ่านได้ละเอียดตั้ง 5 ½ หลักไปจนถึง 7 ½ หลักหรือเรียกได้ว่าระดับนาโนโวลต์มิเตอร์ มีความแม่นยำดีกว่า 5 พีพีเอ็ม เชื่อมต่อโดยตรงกับ MET-10VDC-II แล้วติดตามค่าการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง

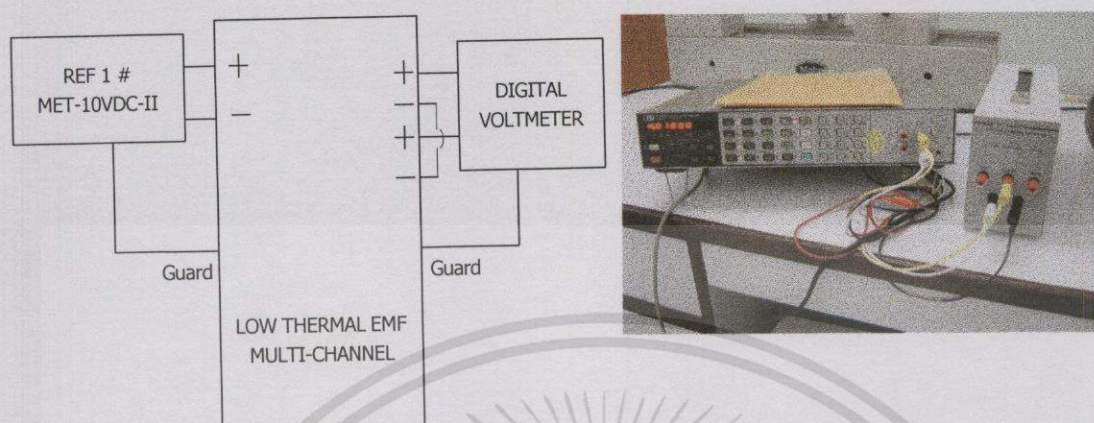
1. เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบการทดสอบ

- Low Thermal lead wires (Ponoma)
- Low Thermal Scanner (Data proof หรือ AVSC)
- Digital Voltmeter 5 ½ digits (HP 3456A) [15] หรือ 7 ½ digits (Agilent 34420A) [16]
- Multi-Function Calibrator (Fluke 5500A) [17]

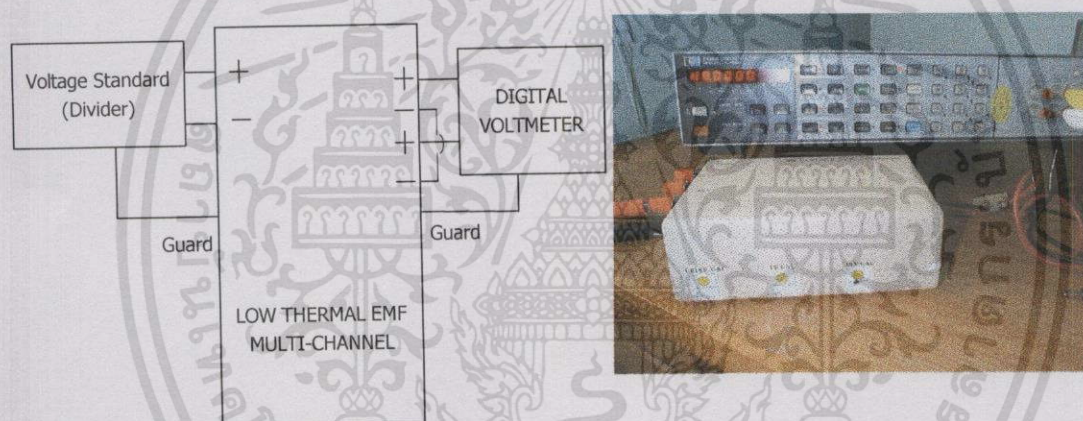
การทดสอบความเสถียรภาพชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานมีขั้นตอนดังนี้ การทดสอบเสถียรภาพเลือกใช้ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ (digital voltmeter : DVM) ของบริษัทอิวิตเต็ดแพ็คการ์ด รุ่น HP3456A ร่วมกับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าชนิดเทอร์มอลอีเอ็มเอฟต่ำ (low thermal scanner) อ่านค่าความผิดพลาด (error)

2. ขั้นตอนการเตรียมก่อนการทดสอบ การติดตั้งเครื่องมือต่างๆ

จากการทดสอบเสถียรภาพของชุด MET-10VDC-II รูปที่ 4.1 และชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดัน รูปที่ 4.2 เป็นการทดสอบร่วมกับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า เพื่อทดสอบเสถียรภาพโดยพิจารณาจากค่าผิดพลาด (error) และค่าการวัดซ้ำ (repeatability) ด้วยวิธีการวัดโดยตรงเข้ากับเทอร์มินัลชนิด low thermal EMF ของเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า และทำการวัดจำนวน 20 ครั้ง ($n = 20$) ช่วงระยะเวลา 1 เดือน โดยวัดอย่างต่อเนื่องทั้งแบบขั้วปกติ (forward : FWD) และวัดแบบกลับขั้ว (reverse : REV) ในการวัดแบบขั้วปกติ และวัดแบบกลับขั้วมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดค่าเทอร์มอลอีเอ็มเอฟที่ขั้วต่อสายไฟ แล้วจับบันทึกผลการสอบเทียบ และจำเป็นต้องต่อการ์ดระหว่างชุด MET-10VDC-II กับดิจิตอลโวลต์มิเตอร์เพื่อลดค่าผิดพลาดเนื่องจากคอมมอนรีเจคชัน (common mode rejection) ทุกครั้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การทดสอบเสถียรภาพชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (MET-10VDC-II)



รูปที่ 4.2 การวัดเสถียรภาพชุดแรงดันไฟฟ้าแบบแบ่งแรงดัน

4.1.2 ผลการทดสอบเสถียรภาพ

จากผลของการเปรียบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งาน (MET-10VDC-II) ด้วยเครื่องสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมาคำนวณตามสมการที่ 4.1 [18] ข้างล่างนี้

$$E_x = E_{STD} + \frac{1}{2}(E_{FWD} - E_{REV}) \quad (4.1)$$

เมื่อ E_x : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัด (โวลต์)

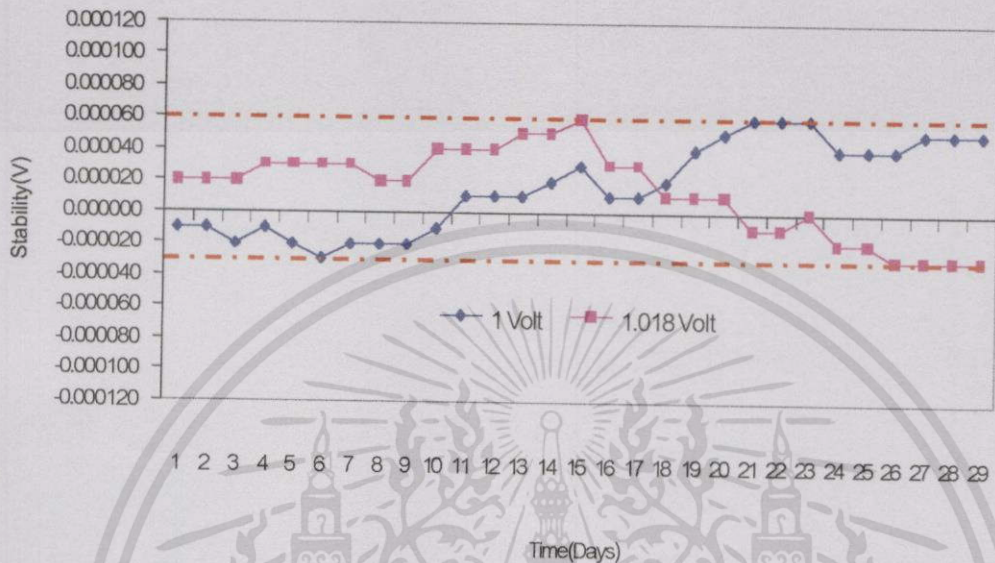
E_{STD} : ค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

E_{FWD} : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดแบบขั้วปกติ (โวลต์)

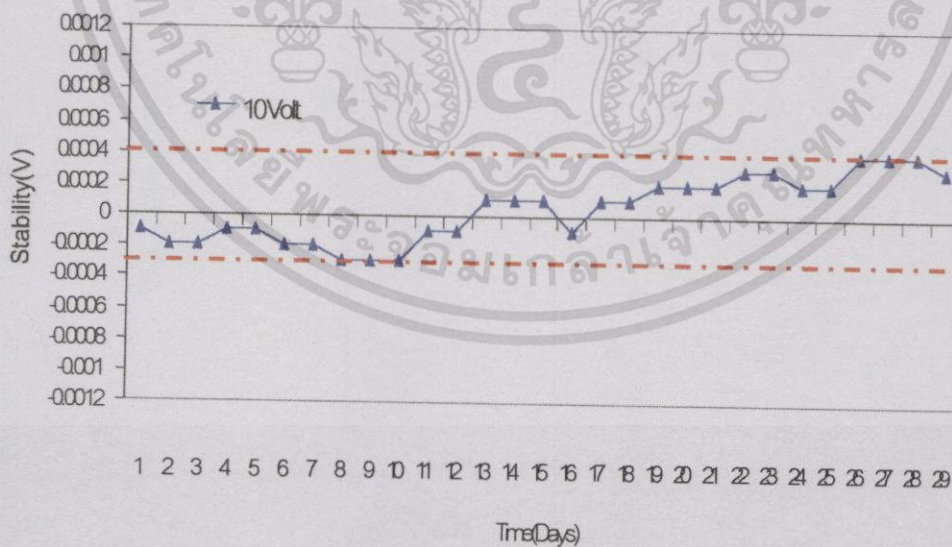
E_{REV} : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดแบบกลับขั้ว (โวลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบเสถียรภาพของชุดMET-10VDC-II ขนาด 1, 1.018 โวลต์ และ 10 โวลต์ ดังกราฟรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 โดยลำดับ ส่วนผลการทดสอบเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดันขนาด 1, 1.018 โวลต์ และ 10 โวลต์ เป็นดังกราฟรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 โดยลำดับ

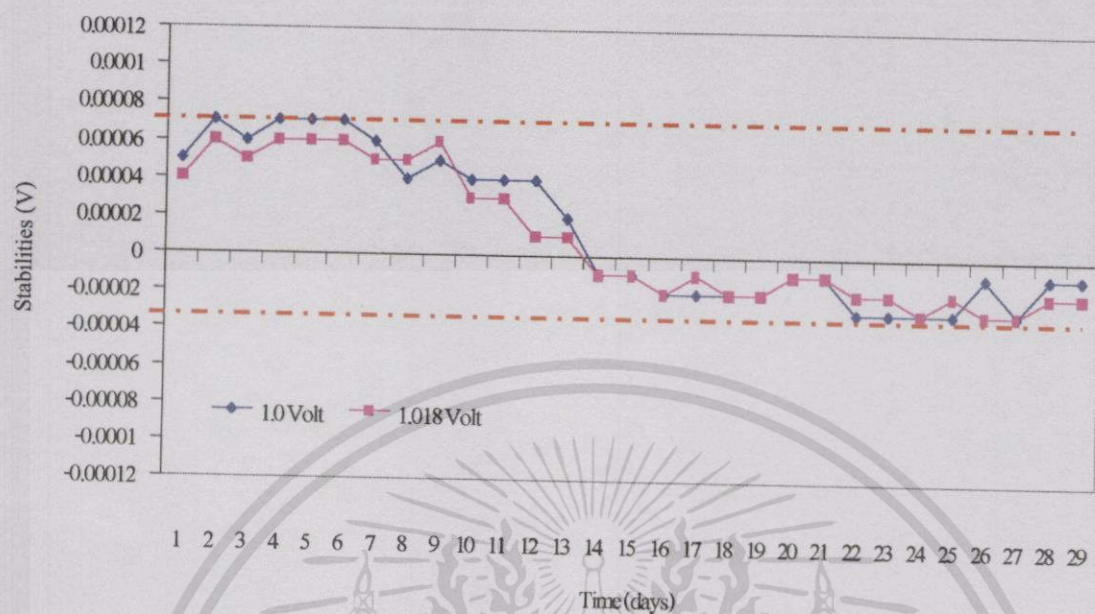


รูปที่ 4.3 ความเสถียรภาพของชุดMET-10VDC-II ขนาด 1 และ 1.018 โวลต์

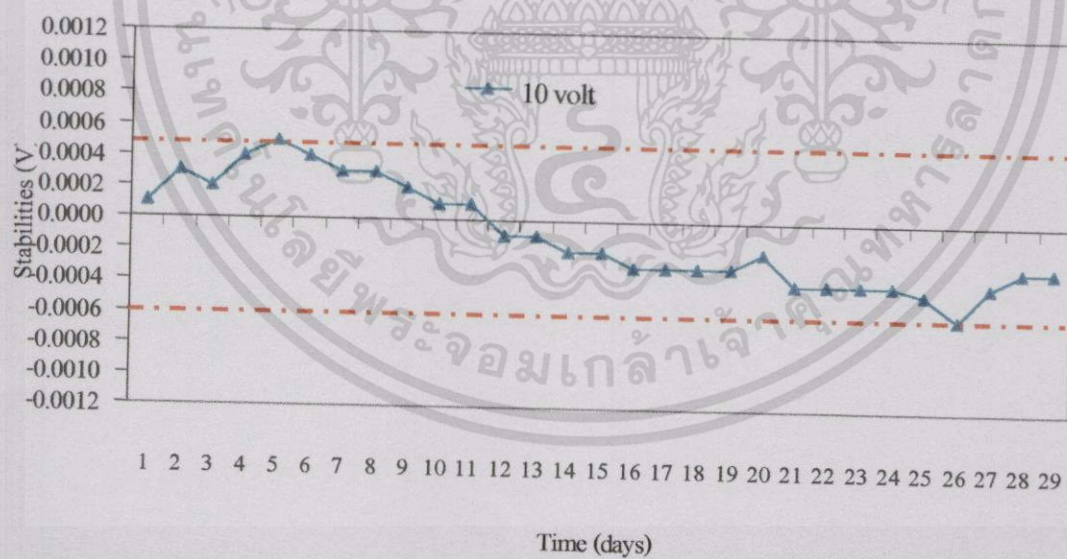


รูปที่ 4.4 ความเสถียรภาพของชุดMET-10VDC-II ขนาด 10 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดันขนาด 1 และ 1.018 โวลต์

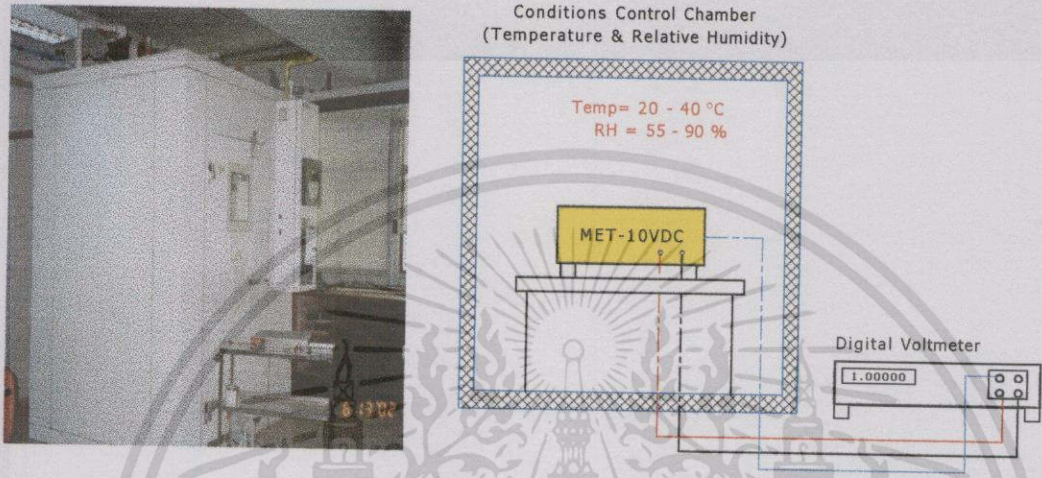


รูปที่ 4.6 ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดันขนาด 10 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

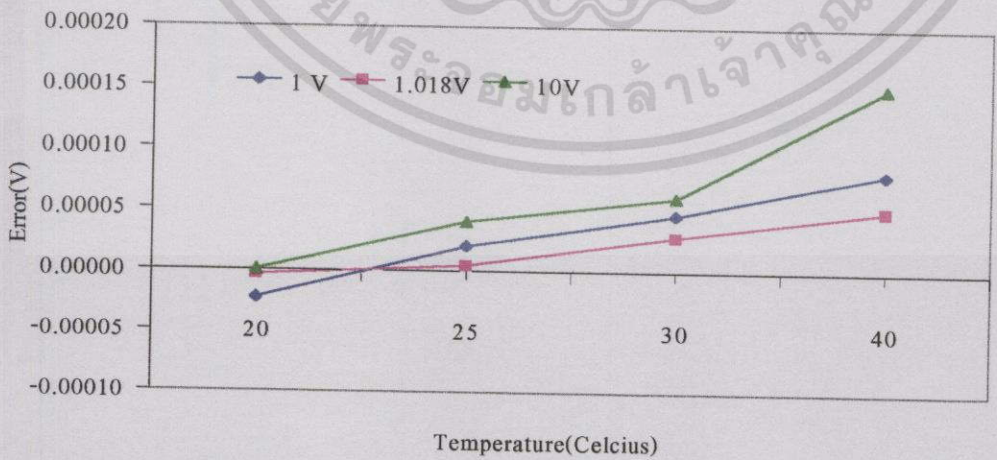
4.2 การทดสอบเสถียรภาพภายใต้สภาวะแวดล้อม

การทดสอบสภาวะแวดล้อมเป็นเงื่อนไขหนึ่งซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานเพราะว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอุปกรณ์ที่พาสซีฟและแอ็คทีฟ



รูปที่ 4.7 การวัดเสถียรภาพของ MET-10VDC-II ภายใต้สภาวะแวดล้อม

การทดสอบเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานภายใต้สภาวะแวดล้อม ทดสอบในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20 – 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ ตั้งแต่ 55 – 90 เปอร์เซ็นต์ โดยติดตั้ง MET – 10VDC-II ไว้ในตู้ควบคุมสภาวะอุณหภูมิสามารถปรับตั้งอุณหภูมิใดๆช่วงความแปรปรวน ± 0.1 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.7 ทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 1.0, 1.018 และ 10 โวลต์ วัดทั้งชั่วปกติและสลับขั้วไฟฟ้า ด้วยดิจิตอลโวลต์มิเตอร์อ่านได้ละเอียด 5 ½ หลัก ผลดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ทดสอบเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานภายใต้สภาวะแวดล้อมช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่ 20 – 40 องศาเซลเซียส

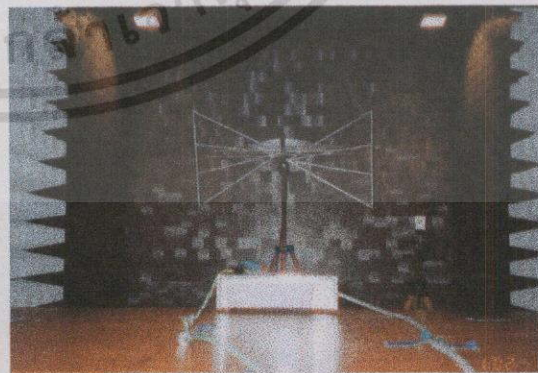
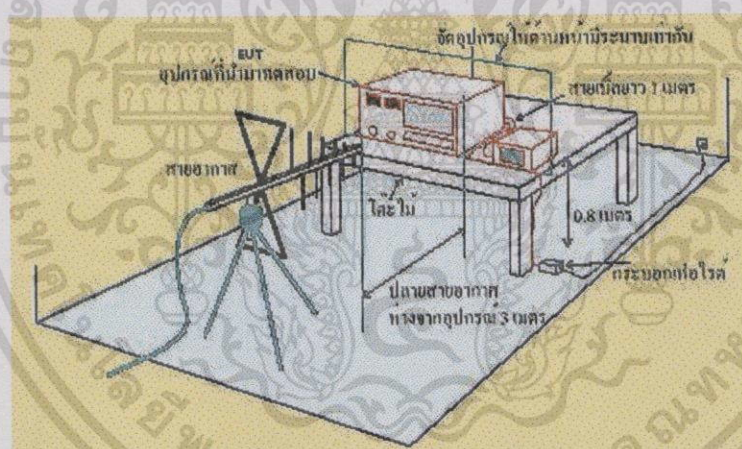
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานภายใต้สภาวะสัญญาณรบกวนหรือEMC

เป็นการทดสอบการได้รับสัญญาณรบกวนจากภายนอกและการสร้างหรือปล่อยสัญญาณรบกวนแพร่กระจายออกจากชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน สัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (ElectroMagnetic Compatability: EMC) มีอิทธิพลต่อเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูงและระดับแรงดันปริมาณน้อยๆ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล EN6000100-45 ประกอบด้วย การทดสอบ 3 การทดสอบด้วยกัน ซึ่งการทดสอบทั้ง 3 หัวข้อนี้ได้รับความร่วมมือจากสถาบันทดสอบเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical and Electronic Products Testing Center : PTEC)

4.3.1 การทดสอบ Radiated Immunity

การทดสอบการได้รับสัญญาณรบกวนแบบเรดิเอตเต็ด อิมมูนิตี (radiated immunity) หรือเรียกว่า RI นี้ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 61000-4-3/1995(ฉบับแก้ไขปี ค.ศ. 1998) กำหนดให้ทดสอบความแรงของสัญญาณที่ระดับ 1 V/m, 3 V/m และ 10 V/m ทั้งแนวสายอากาศแบบตั้งและแบบนอน



รูปที่ 4.9 การทดสอบ Radiated Immunity กับ MET-10VDC-II ที่ระดับความแรงของสัญญาณขนาด 3 V/m และ 10 V/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ radiated immunity เริ่มต้นให้ติดตั้งอุปกรณ์ที่จะทดสอบดังรูปที่ 4.9 เครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกติดตั้งอยู่ในห้องที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาได้ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ทดสอบ Radiated Emission (RE) ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้ทำการทดสอบกับสายอากาศทั้งแนวตั้ง (vertical) และแนวนอน (horizontal)

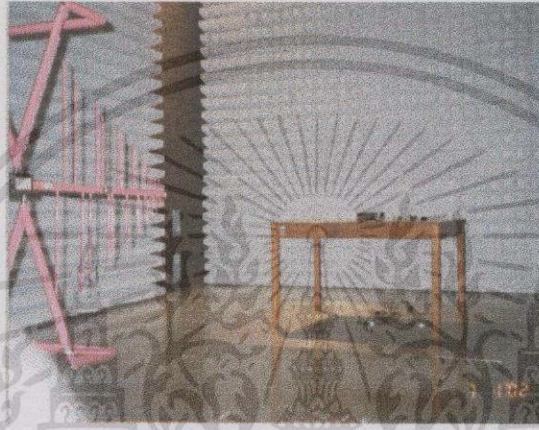
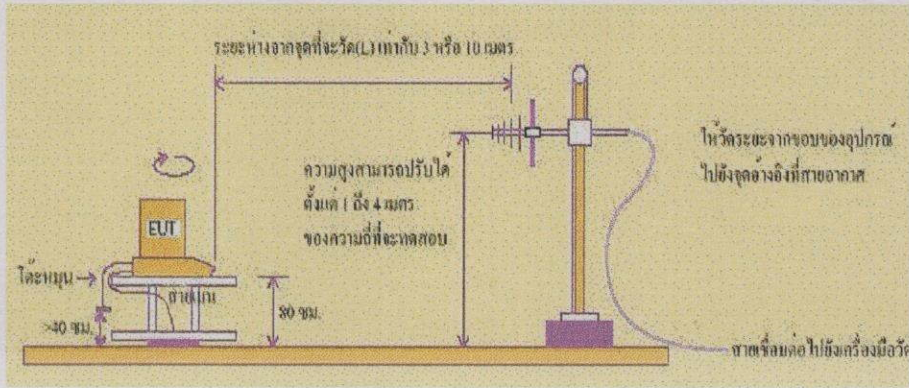
การพิจารณาระดับความแรงของสัญญาณที่ทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งานของเครื่องมือต่างๆ ที่ระดับความแรงของสัญญาณเท่ากับ 1 V/m และ 3 V/m เป็นการทดสอบการได้รับสัญญาณรบกวนจากเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดสัญญาณ ซึ่งพบตามบ้านอยู่อาศัยและภาคอุตสาหกรรมขนาดเบา (light Industrial) ส่วนการทดสอบที่ระดับความแรงของสัญญาณเท่ากับ 10 V/m เป็นการทดสอบการได้รับสัญญาณรบกวนจากเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดสัญญาณ ซึ่งพบตามภาคอุตสาหกรรมหนัก (heavy Industrial) ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30MHz ถึง 1GHz

ตารางที่ 4.1 การทดสอบ Radiated Immunity กับ MET-10VDC-II ที่ระดับความแรงของสัญญาณขนาด 3 V/m ที่ย่านความถี่ 30MHz ถึง 1GHz

No.	Direction	Polarize	DC. Out	Polarity Measurement	Max.	Min
1	Front	V	10V	+	10.00055	10.00051
2	Front	V	10V	-	-10.00054	-10.00057
3	Front	H	10V	+	10.00055	10.0005
4	Front	H	10V	-	-10.00055	-10.00057
5	Front	V	1V	+	0.99993	0.999927
6	Front	V	1V	-	-0.99994	-0.999944
7	Front	H	1V	+	0.999937	0.99993
8	Front	H	1V	-	-0.999935	-0.99994

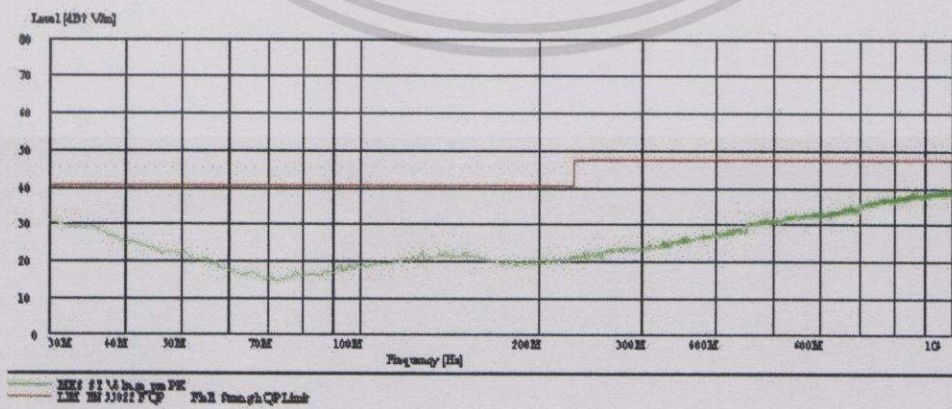
4.3.2 การทดสอบ Radiated Emission

เป็นการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไปขณะทำงานอยู่ว่ามี การแพร่กระจายสัญญาณรบกวนหรือคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามากน้อยเพียงใด ตามเอกสารมาตรฐาน EN55022 โดยมีข้อกำหนดไว้ว่าการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าต้องไม่มากกว่า 40 dB ย่านความถี่ตั้งแต่ 30MHz - 220MHz และ 50 dB ย่านความถี่ตั้งแต่ 220MHz - 1GHz ดังรูปที่ 4.10 เป็นการทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของชุด MET-10VDC-II ภายในห้องที่ได้รับการออกแบบเพื่อทดสอบ radiated emission โดยเฉพาะ



รูปที่ 4.10 การทดสอบ Radiated Emission

ขั้นตอนการทดสอบจัดเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ดังแผนผังรูปที่ 4.10 ภายใต้ห้องที่ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกชนิดพิเศษ EUT (MET-10VDC-II) วางอยู่บนโต๊ะที่หมุนได้รอบตัวขณะทำการทดสอบสายอากาศจะรับเอาสัญญาณที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่ทดสอบแล้วแสดงผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ภายใต้โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปก็จะแสดงผลออกมาให้เห็นว่าอุปกรณ์นั้นๆ มีการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนตลอดย่านความถี่ 30MHz - 1GHz ว่าเกินที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ ผลที่ได้แสดงกราฟรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบ Radiated Emission

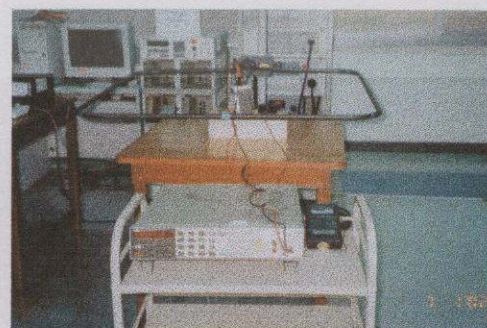
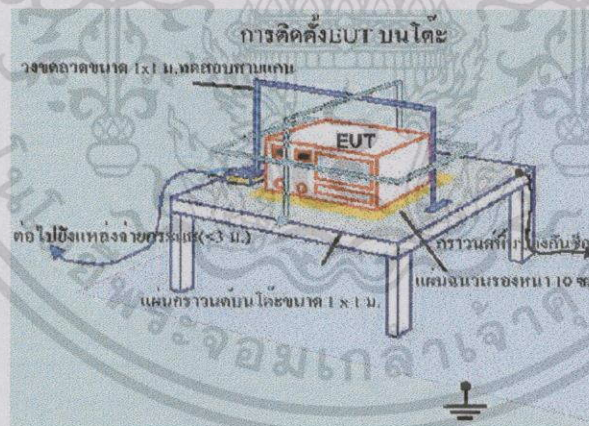
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การทดสอบเพาเวอร์แม็กเนติกฟิลด์ (Power Magnetic Field)

การทดสอบเพาเวอร์แม็กเนติกฟิลด์ (power magnetic field :PMF) เป็นการทดสอบภายใต้สนามแม่เหล็ก ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-8/1993 (Power frequency magnetic field)

ตารางที่ 4.2 แปลงหน่วยของสนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้า

Magnetic fields		
1 Gauss = 100 μ Tesla = 79.55 A/ m		
A/m	mG	μ Tesla
1	12.57	12.57
3	37.71	3.77
10	126	12.57
30	377	37.71
G		
100	1.257	126
300	3.771	377
100710	12.57	1257



รูปที่ 4.12 การทดสอบผลอันเนื่องมาจาก power magnetic field กับ MET-10VDC-II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ MET-10VDC-II รูปที่ 4.12 เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กทำการทดสอบ 3 แกน (X, Y และ Z) ด้วยกัน ในแนวตั้งฉากกับขดลวดทั้ง 3 ขดลวดเท่านั้น โดยกำหนดกระแสไฟฟ้าในการทดสอบตามตารางที่ 4.2 สำหรับการทดสอบนี้ใช้กระแสไม่เกิน 3 แอมแปร์ต่อเมตร (A/m) ปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดจะสัมพันธ์กันกับขนาดและพื้นที่ของตัวอย่างด้วย ระยะเวลาในการป้อนกระแสเพื่อทดสอบเพาเวอร์แม็กเนติกฟิลด์นั้นประมาณ 1-3 วินาทีและบันทึกผลของแรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบของแต่ละแกน ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเพาเวอร์แม็กเนติกฟิลด์

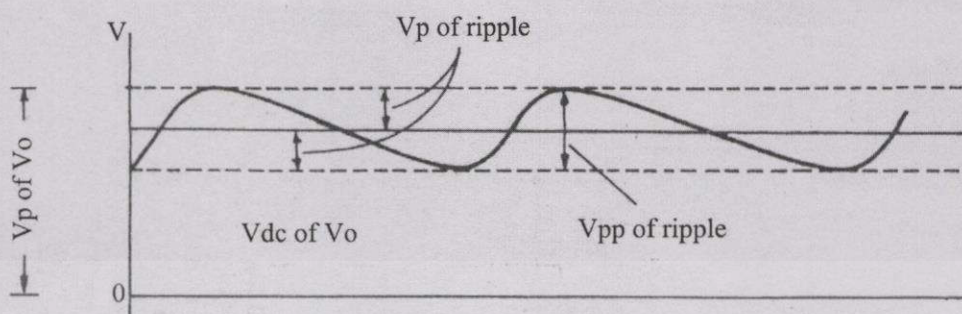
หน่วย: โวลต์

Axis	Output	Reading		Mean
		Lower	Upper	
X	1	0.999955	0.999965	0.99996
	10	10.00034	10.00036	10.0003
Y	1	0.999945	0.999959	0.99995
	10	10.00039	10.00042	10.0004
Z	1	0.999912	0.999922	0.99992
	10	10.00022	10.00031	10.0003

4.4. การทดสอบริปเปิ้ลแฟคเตอร์

การวัดทดสอบความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือเรียกว่า ริปเปิ้ล (ripple) รูปที่ 4.13 ของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าและวงจรประจุแบตเตอรี่และสิ่งที่สามารถบอกได้ว่าสัญญาณไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเรียกว่า ริปเปิ้ลแฟคเตอร์ (ripple factor) ถ้าค่าริปเปิ้ลแฟคเตอร์น้อยแสดงว่าสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงมีความเรียบมากหมายถึงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงมีการเปลี่ยนแปลงน้อย วัตถุประสงค์ในการทดสอบปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงก็เพราะว่าพิจารณาผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

โดยทั่วไปค่าริปเปิ้ลแฟคเตอร์พิจารณาจากความสัมพันธ์เชิงอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกแบบกระแสสลับกับ แรงดันขาออกกระแสตรงค่าพิก-ทูป-พิก (peak to peak : V_{p-p}) ของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.13 ค่าริปเปิ้ลของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การทดสอบค่าริปเปิ้ลนี้เป็นการทดสอบทั้งวงจรเรียงกระแสของภาคจ่ายไฟและชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าของชุดMET-10VDC-II เพื่อทดสอบค่า V_{p-p} ซึ่งเป็นค่าริปเปิ้ลของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำมาพิจารณาความเหมาะสมในการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ การวัดริปเปิ้ลใช้เครื่องดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ขนาด 7 1/2 หลัก จำนวน 20 การวัดต่อครั้ง จำนวน 3 ครั้ง ผลการทดสอบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าริปเปิ้ลของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของชุดMET-10VDC-II

No.	V_{p-p} (mV)	SD (mV)	Max (mV)	Min (mV)	Mean (mV)
1	4.77	1.45	12.5	12.49	12.499
2	5.34	1.788	12.493	12.488	12.49
3	4.59	1.47	12.487	12.482	12.485

ตารางที่ 4.5 ค่าริปเปิ้ลวงจรเรียงกระแสของชุดMET-10VDC-II

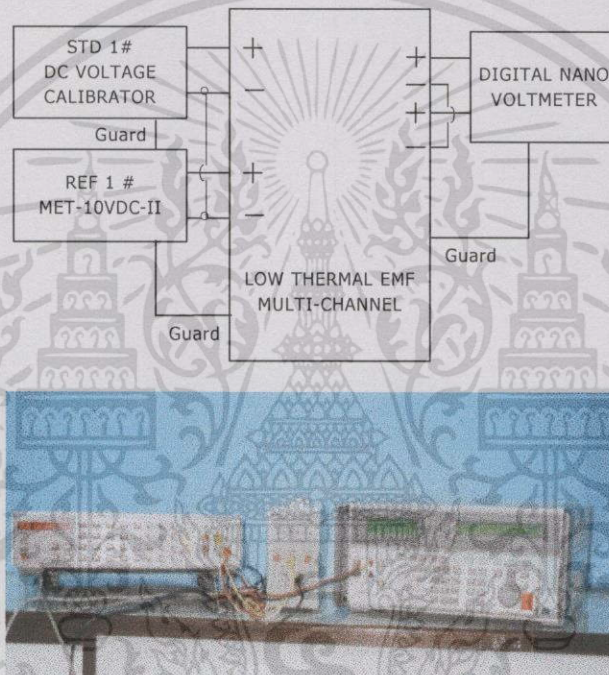
No.	V_{p-p} (mV)	SD (mV)	Max (mV)	Min (mV)	Mean (mV)
1	71.07	20.64	35.8	35.47	35.43
2	35.85	8.32	35.46	35.43	35.42
3	120.9	30.78	35.64	35.52	35.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การสอบเทียบมาตรฐาน

4.5.1 การสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

การสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานหรือ MET-10VDC-II เป็นการสอบเทียบมาตรฐานกับชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (DC voltage calibrator) ของบริษัทฟลูค จำกัด รุ่น 5500A และดิจิตอลนาโนโวลต์มิเตอร์ ของบริษัทอิลเลนท์เทคโนโลยี จำกัด รุ่น 34420A ที่ค่าระบุ 1, 1.018 และ 10 โวลต์ จำนวน 20 ครั้ง ณ ห้องปฏิบัติการควบคุมสภาวะอุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 % โดยติดตั้งเครื่องตามรูปที่ 4.14 ค่ารวมค่าที่ถูกต้องและค่าความไม่แน่นอนดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.14 การสอบเทียบชุด MET-10VDC-II ด้วยชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐาน

ตารางที่ 4.6 ผลการสอบเทียบชุด MET-10VDC-II

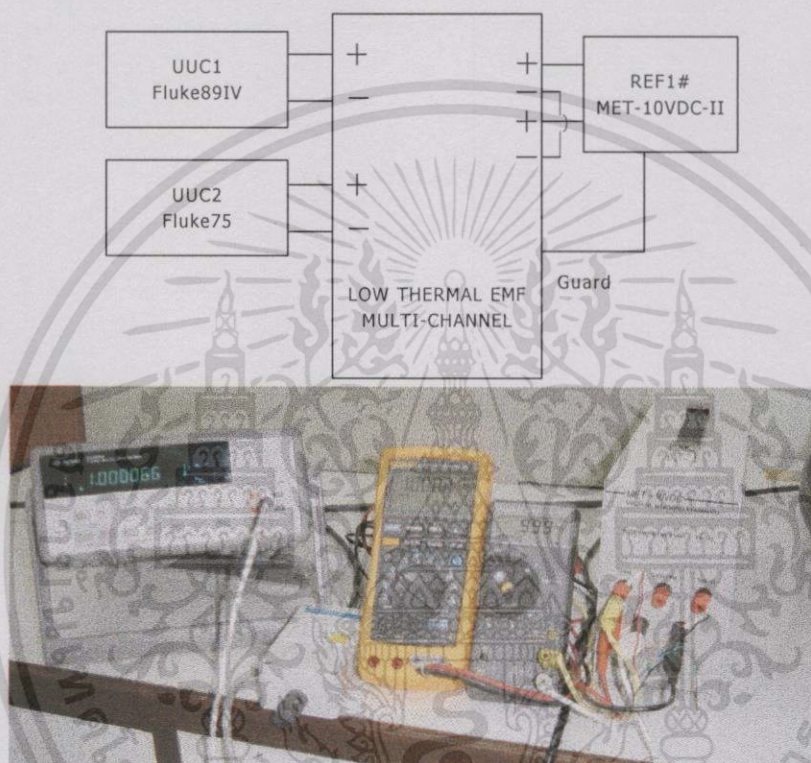
Nominal value (V)	Correct value (V)	Uncertainty (V)
1.0	1.00001	± 0.00002
1.018	1.01801	± 0.00002
10.0	10.0001	± 0.0001

การประเมินค่าความไม่แน่นอน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($k = 2$) และองศาอิสระ (V_{eff}) เข้าสู่ อินฟินิตี้เป็นการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์

การทดสอบความสามารถของชุดMET-10VDC-II โดยให้การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดไวน้เบรชั่นมิเตอร์ (vibration meter) และการวัดอุณหภูมิ ด้วยการกำหนดให้ชุดMET-10VDC-II เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน สอบเทียบที่ขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์ ให้ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ Fluke 89 IV (UUC1) และ ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ Fluke 75 (UUC2) ติดตั้งเครื่องมือตามแผนผังรูปที่ 4.15 ส่วนผลการสอบเทียบเป็นไปตามตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.15 แผนผังการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์

ตารางที่ 4.7 ผลการสอบเทียบ UUC1

Nominal value (V)	Correct value(V)	Uncertainty (V)
	UUC1	
1.0	0.9992	± 0.0006
1.018	1.0178	± 0.0006
10.0	9.9996	± 0.0007

การประเมินค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($k = 2$) ขนาดแรงดันไฟฟ้า 1, 1.018 และ 10 โวลต์ องศาอิสระ (V_{eff}) เข้าสู่อินฟินิตี้เป็นการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการสอบเทียบ UUC2

Nominal value (V)	Correct value(V)	Uncertainty (V)
	UUC2	
1.0	0.999	± 0.001
1.018	1.017	± 0.001
10.0	9.990	± 0.001

การประเมินค่าความไม่แน่นอน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($k = 2$) และองศาอิสระ (V_{eff}) เข้าสู่ อินฟินิตี้เป็นการแจกแจงแบบปกติ

4.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบและความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน การสอบเทียบและทดสอบความเสถียรภาพชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน โดยพิจารณาแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนของระบบทั้งหมด

ตารางที่ 4.9 การประเมินค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบ MET-10VDC-II ที่ 1, 1.018 โวลต์

Type	Source of uncertainty	Value (V)	Dist.	Divisor	U_i (V)	C_i	V_{eff}
U_A	Repeatability ($n = 20$)	0.00000027	Normal	1	0.00000027	1	19
U_{B1}	Standard calibration	0.0000130	Normal	2	0.00000650	1	∞
U_{B2}	Resolution of calibrator	0.0000005	Rect.	$\sqrt{3}$	0.00000028	1	∞
U_{B3}	Digital voltmeter(DVM)	0.0000130	Rect.	$\sqrt{3}$	0.00000750	1	∞
U_{B4}	Resolution of DVM	0.0000005	Rect.	$\sqrt{3}$	0.00000028	1	∞
U_{B5}	Tempco	0.0000824	Rect.	$\sqrt{3}$	0.00000028	1	∞
U_C	Combined uncertainty	-	-	-	0.000010	-	∞
U_r	Expanded uncertainty (kU_C)		Normal	$k = 1.96$	0.000025	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 การประเมินค่าความไม่แน่นอนความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1 โวลต์

Type	Source of uncertainty	Units	Value	Distribution	Divisor	U _i (V)	C _i	V _{eff}
U _A	Repeatability	V	0.0000014	Normal	1	0.0000014	1	19
U _{B1}	Specification of digital voltmeter	V	0.0000050	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.0000029	1	∞
U _{B2}	Resolution of digital voltmeter	V	0.0000050	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.0000029	1	∞
U _{B3}	Thermal EMF	V/°C	0.0000005	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.00000029	1	∞
U _{B4}	Tempco	V/°C	0.00000020	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.00000012	1	∞
U _C	Combined uncertainty (U _c)	-	-	-	-	0.0000043	-	2690
U _r	Expanded uncertainty (kU _c)	-	-	k = 1.96	-	0.0000085	-	-

ตารางที่ 4.11 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1.018 โวลต์

Type	Source of uncertainty	Units	Value	Distribution	Divisor	U _i (V)	C _i	V _{eff}
U _A	Repeatability	V	0.0000018	Normal	1	0.0000018	1	19
U _{B1}	Specification of digital voltmeter	V	0.0000050	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.0000029	1	∞
U _{B2}	Resolution of digital voltmeter	V	0.0000050	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.0000029	1	∞
U _{B3}	Thermal EMF	V/C	0.0000005	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.00000029	1	∞
U _{B4}	Tempco	V/C	0.00000020	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.00000012	1	∞
U _C	Combined uncertainty (U _c)	-	-	-	-	0.0000044	-	1122
U _r	Expanded uncertainty (kU _c)	-	-	k = 1.96	-	0.0000088	-	-

ตารางที่ 4.12 การประเมินค่าความไม่แน่นอนความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์

Type	Source of uncertainty	Units	Value	Distribution	Divisor	U _i (V)	C _i	V _{eff}
U _A	Repeatability	V	0.0000410	Normal	1	0.0000410	1	29
U _{B1}	Specification of digital voltmeter	V	0.0000050	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.0000029	1	∞
U _{B2}	Resolution of digital voltmeter	V	0.0000050	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.0000029	1	∞
U _{B3}	Thermal EMF	V/°C	0.0000005	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.00000029	1	∞
U _{B4}	Tempco	V/°C	0.00000020	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.00000012	1	∞
U _C	Combined uncertainty (U _c)	-	-	-	-	0.0000041	-	29.58
U _r	Expanded uncertainty (kU _c)	-	-	k = 2.04	-	0.0000842	-	

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมีอยู่หลายอย่างด้วยกัน แต่หัวข้อทดสอบในบทที่ 4 เป็นการทดสอบที่ครอบคลุมและสอดคล้องกับการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมากที่สุดเพื่อให้ได้ค่าเสถียรภาพ 100 พีพีเอ็มต่อเดือนหรือดีกว่า จากผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การทดสอบความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

ผลการทดสอบเสถียรภาพของชุด MET-10VDC-II ตารางที่ 5.1 เห็นได้ว่าที่แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 1, 1.018 และ 10 โวลต์ มีค่าความเสถียรภาพ เท่ากับ 60 และ 52 พีพีเอ็มต่อเดือนตามลำดับ และชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดัน ตารางที่ 5.2 มีค่าความเสถียรภาพ เท่ากับ 76 และ 68 พีพีเอ็มต่อเดือน เมื่อเปรียบเทียบความเสถียรภาพที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 1 และ 1.018 โวลต์ของชุด MET-10VDC-II มีเสถียรภาพดีกว่าชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดัน ส่วนความเสถียรภาพที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 10 โวลต์ของชุด MET-10VDC-II เท่ากับ 44 พีพีเอ็มต่อเดือน และของแบบแบ่งแรงดันเท่ากับ 46 พีพีเอ็มต่อเดือน ไม่มีความแตกต่างกันเท่าไร สาเหตุเนื่องมาจากใช้หลักการเดียวกัน ความเสถียรภาพของทั้งสองแบบอยู่ช่วง 100 พีพีเอ็มต่อเดือน

ตารางที่ 5.1 เสถียรภาพของชุด MET-10VDC-II

MET-10VDC-II			
Nominal value (V)	1	1.018	10
Average (V)	1.00002	1.01801	10.0000
Stability (ppm/month)	60	52	44

ตารางที่ 5.2 เสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบแบ่งแรงดัน

Divider			
Nominal value (V)	1	1.018	10
Average (V)	1.00003	1.01801	9.9999
Stability (ppm/month)	76	68	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะแวดล้อม

ผลการทดสอบค่าความผิดพลาดของชุดMET-10VDC-II ภายใต้สภาวะแวดล้อม อุณหภูมิช่วง 20-40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 55 เปอร์เซ็นต์ ดังกราฟรูปที่ 4.8 การทดสอบแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความผิดพลาดและเสถียรภาพ แต่ยังคงอยู่ในช่วงการใช้งาน และยอมรับได้ที่ 100 พีพีเอ็มต่อเดือน แต่ค่าความผิดพลาดจะสูงขึ้น

5.1.3 ทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้าภายใต้สัญญาณรบกวนหรือEMC

การทดสอบ EMC กับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ตามมาตรฐานสากล IEC ของกลุ่มยุโรปตามหัวข้อต่อไปนี้

1. เรดิเอตเต็ด อิมิตชั่น (Radiated Emission)

ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไปรบกวนขณะทดสอบ MET-10VDC-II ทำงานนั้น ดังกราฟรูปที่ 4.11 ตลอดย่านความถี่ 30MHz - 1GHz ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดไว้ว่าระดับความแรงของสัญญาณรบกวนต้องไม่เกิน 50 dB หรือ V/m ผลการทดสอบผ่านเนื่องจากมีการจ่ายกระแสที่เอาท์พุทต่ำ และชิลด์ที่ดีจะช่วยลดการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กได้อย่างดี

2. เรดิเอตเต็ด อิมมูนิตี (Radiated Immunity)

ผลการทดสอบความทนทานต่อการรบกวนจากสนามแม่เหล็กอื่นจะมีผลกระทบกับเสถียรภาพของ MET-10VDC-II ได้ที่ระดับความแรงสัญญาณ 2 ช่วงด้วยกันคือ 3V/m สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเบา หรือตามห้องปฏิบัติการ และ 10 V/m สำหรับอุตสาหกรรมหนัก แต่การทดสอบดังตารางที่ 4.1 ที่ระดับความแรง 3V/m สรุปผลได้ว่าผ่านการทดสอบเพราะค่าความเสถียรภาพอยู่ในช่วง 100 พีพีเอ็มต่อเดือน

3. เพาเวอร์ แมกเนติกฟิลด์ อิมมูนิตี (Power magnetic field immunity)

ผลการทดสอบการทำงานของ MET-10VDC-II สนามแม่เหล็กอาจจะมีผลกระทบกับเสถียรภาพของ MET-10VDC-II ดังตารางที่ 4.3 ระดับความแรงสัญญาณ คือ 3 A/m สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเบา หรือตามห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบทั้งสามแกน(X, Y, Z) สรุปผลว่าผ่านการทดสอบเพราะความเสถียรภาพอยู่ในช่วง 100 พีพีเอ็มต่อเดือน

5.1.4 ทดสอบค่ารีปเปลของชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบในหัวข้อนี้พิจารณาระดับของรีปเปล (Vp-p) ของไฟฟ้ากระแสตรง ดังตารางที่ 4.4 สามารถบอกระดับของรีปเปลของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าและประจุแบตเตอรี่ที่ดีควรมากกว่า 5 มิลลิโวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารีปเปลของวงจรเรียงกระแสธรรมดาทั่วไป ตารางที่ 4.5 จะมีการเปลี่ยนแปลงของความเรียบของไฟฟ้ากระแสตรงค่อนข้างสูง

5.1.5 สอบเทียบมาตรฐาน

ผลการสอบเทียบชุด MET-10VDC-II กับเครื่อง DC voltage calibrator ผลเป็นไปตาม ตารางที่ 4.6 จะได้ว่าค่าความถูกต้องขนาดแรงดันไฟฟ้า 1, 1.018 และ 10 โวลต์ เท่ากับ 1.00001 ± 0.00002 , 1.01801 ± 0.00002 และ 10.0001 ± 0.0001 โวลต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการสอบเทียบ UUC1 และ UUC2 กับ ชุด MET-10VDC-II ผลการสอบเทียบตามตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 ขนาดแรงดันไฟฟ้า 1, 1.018 และ 10 โวลต์ เท่ากับ 0.999 ± 0.001 , 1.017 ± 0.001 และ 9.990 ± 0.001 โวลต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

5.2 วิจัยผลการทดลอง

จากผลการเปรียบเทียบความเสถียรภาพที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 1 และ 1.018 โวลต์ ของชุด MET-10VDC-II แบบเทคนิคแรงดันต่างแยกชุดที่มีเอาต์พุตแยกจากกัน โดยสิ้นเชิง กับ ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบเทคนิคแบ่งแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแบบแรงดันต่างแยกชุดจะมีความเสถียรภาพดีกว่าแบบชนิดแบ่งแรงดันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแบบเทคนิคแรงดันต่างแยกชุดเอาต์พุตจะเป็นอิสระต่อกันกับเอาต์พุตที่ขนาด 10 โวลต์ ดังกราฟรูปที่ 4.3 และ 4.4 ส่วนแบบชนิดแบ่งแรงดันเอาต์พุตขนาด 1 และ 1.018 โวลต์ จะแปรเปลี่ยนตามแรงดันเอาต์พุตขนาด 10 โวลต์ ดังกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 กันซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเสถียรภาพระยะยาวของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานอีกด้วย

การทดสอบ Radiated immunity, Power magnetic field และ Radiated emission ซึ่งทดสอบเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนกับชุด MET-10VDC-II การทดสอบสัญญาณรบกวนโดยทั่วไปเพียงครั้งเดียวก็สามารถบอกได้ว่าผ่านหรือไม่ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทดสอบต่อเนื่องในระยะเวลายาวนานได้เพราะการทดสอบมีค่าใช้จ่ายสูงมาก

และการทดสอบการทำงานของชุด MET-10VDC-II ภายใต้สัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหัวข้อการทดสอบ Radiated Immunity ยังไม่เหมาะสมกับสภาพความแรงสัญญาณรบกวนของสนามแม่เหล็กที่ 10 V/m ซึ่งเป็นความแรงของสัญญาณรบกวนที่สภาวะแวดล้อมประเภทอุตสาหกรรมหนัก (heavy industry) เพราะเนื่องจากผลการทดลองที่ความแรงสัญญาณ 10 V/m ไม่ผ่านการทดสอบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

ความเสถียรภาพระยะยาวของชุด MET-10VDC-II ไม่ได้นำมาแสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากผลจากการทดสอบในช่วงเวลา 90 วัน มีค่ามากกว่า 100 พีพีเอ็ม เมื่อเข้าสู่ช่วง 45 - 60 วัน สาเหตุจากคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ทั้งแอ็คทีฟ (active device) และพาสซีฟ (passive device) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพะอย่างยิ่ง อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ดังนั้นถ้าเป็นไปได้ควรเลือกอุปกรณ์ที่มีค่าเสถียรภาพระยะยาวที่ดียิ่งขึ้น ได้แก่ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานทางทหารหรือมิลิทารี เกรด (military grade) สัมประสิทธิ์เนื่องจากอุณหภูมิของตัวต้านทาน หรืออุปกรณ์ต่างๆที่มีค่าต่ำและใกล้เคียงกันเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นเพื่อให้ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานดี จึงไม่ควรใช้เทคนิคแบ่งแรงดันเพราะทำให้ความเสถียรภาพที่ขึ้นตรงต่อกันแปรเปลี่ยนตามกันไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ladkrabang Engineering Journal, Volume 16, No. 3, **Multi-Channel Automated Voltage Standard Comparison Equipment**, W.Chinchusak, September 1999.
- [2] การออกแบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์ สำหรับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน, ประชุมวิชาการ EECON ครั้งที่ 24, นายวันชัย ชินชูศักดิ์, ตุลาคม 2544.
- [3] **Philosophy in Practice**, Fluke Corporation, USA., Second Edition, (ISBN 0-9638650-0-5) 1994.
- [4] **ISO/IEC 17025**, General requirement for the competence of testing and calibration laboratories, First edition 1999-12-15(E).
- [5] **Instruction Manual "732A DC Reference Standard"** John Fluke Mfg. Co., Inc. USA, P/N788414, May 1986.
- [6] John P. Bentley, **Principle of Measurement Systems**, Third Edition, M.C. Longman Group Limited, (ISBN 0-582-23779-3), 1995.
- [7] R. Hoffman Conrad, **Mini Metrology Lab**, Electronics Now Magazine, P.35-68, March 1996.
- [8] Steve Spang, **Calibration Philosophy in practice**, Fluke Method of comparison of resistor, chapter 5 pp.16-20.
- [9] Henry W. Ott, **Noise Reduction Techniques in Electronic System**, Second Edition, 1998, USA.
- [10] **ISO/TAG4**, Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement(GUM), January 1993.
- [11] **Assessment of Uncertainties of Measurement** (for calibration and testing laboratories), RR Cook 1999, ISBN0-909307-46-6, ACN 004 379 748, Published by National Association of Testing Authorities.
- [12] **LM336-5.0 5.0V Reference Diode**, National Semiconductor, June 1999.
- [13] **LM308 Operational Amplifiers**, National Semiconductor, December 1994.
- [14] **LM317A/LM317, 3-Terminal Adjustable Regulator**, National Semiconductor, May 2001.
- [15] **Instruction manual of digital voltmeter**, HP 3456A
- [16] **Instruction manual of Nanovoltmeter**, Agilent 34420A, Agilent technology.
- [17] **Instruction manual of DC voltage calibrator**, Fluke 5500A, John Fluke Mfg. Co., Inc. USA,
- [18] **Instruction manual of sensitive digital voltmeter**, model 182, Keithley instrument Inc., 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

Students' t-distribution

ตาราง ก Value of $t_p(V)$ from the t-distribution for degree of freedom V that defines an interval $-t_p(V)$ to $+t_p(V)$ that encompasses the fraction p of the distribution

Degree of Freedom(V)	Fraction p in percent					
	68.27 ^(a)	90	95	95.45 ^(a)	99	99.73 ^(a)
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.8
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

(a) For a quantity z described by a normal distribution with expectation μ_i and standard deviation σ , the interval $\mu_i \pm k\sigma$ encompasses $p = 68.27, 95.45$ and 99.73 percent of the distribution for $k = 1, 2$ and 3 respectively.

คุณลักษณะเฉพาะของชุดMET-10VDC-II

Output Voltage : 1 volt, 1.018 volt and 10 volt

Transfer uncertainty : at 20 – 23 ° C

Output	Time interval	
	30days	90days
10V	44 ppm	> 100 ppm
1V	60 ppm	> 100 ppm
1.018V	52 ppm	> 100 ppm

Output Current : 8 mA (Load impedance $\geq 10k\Omega$)

Size(HxWxD) : 170 x 100 x 335 mm

Weight : 4.7 kg

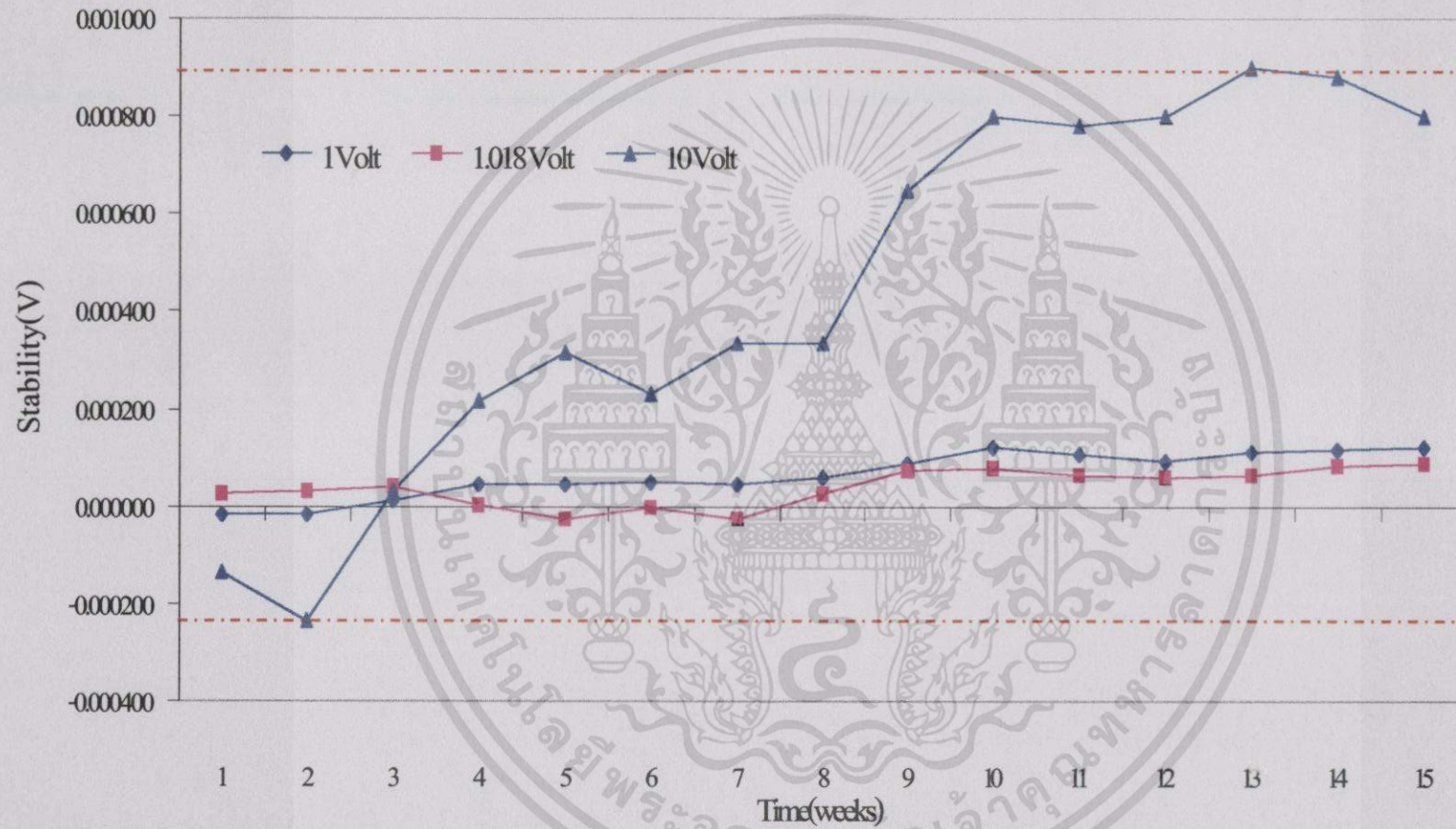
Internal Battery : 12V x 2 , gelled-electrolyte sealed lead acid

Typical Battery Life : 24 hrs (20 ° C)

Operating Temperature : 20 – 40 ° C

Voltage Power Supply : 220 VAC/50Hz , 500 mA

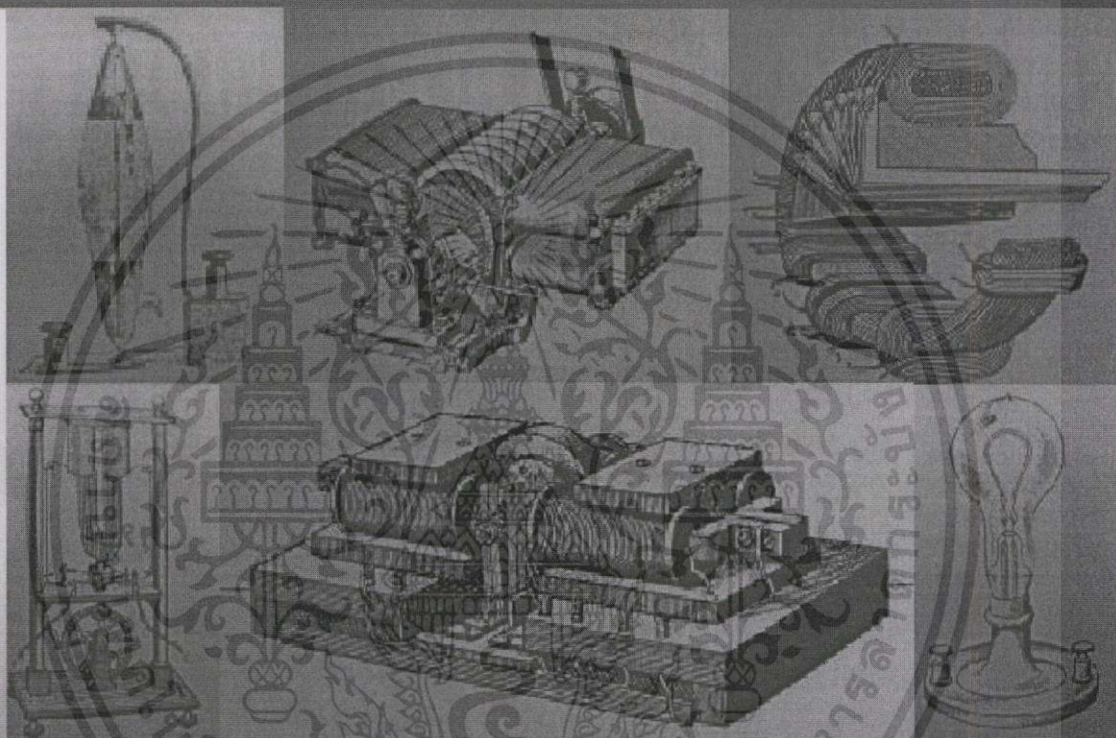
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1. ความเสถียรภาพระยะยาว (long term stability) ช่วงระยะเวลา 15 สัปดาห์ (27 กุมภาพันธ์ - 15 มิถุนายน 2545)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



22 - 23 พฤศจิกายน 2544

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24
The 24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)
22 - 23 พฤศจิกายน 2544
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายชื่อบทความ และหมายเลขบทความอ้างอิงใหม่ (แยกตามสาขาบทความ)

มติที่ประชุมคณะกรรมการประชุมวิชาการ EECON-24 ครั้งที่ 4/2544 19 ต.ค. 2544

สาขาบทความ CT

ระบบควบคุมและการวัดคุม (Control and Instrument)

CT-A 22 พฤศจิกายน 2544 (13.00 - 15.00 น.) Oral Presentation

CT01 บทความดีเด่น

เครื่องตรวจวัดขนาดสูงสุดแบบทันทีสำหรับสัญญาณรูปไซน์โวลเตจเฟส
An Instantaneous Peak Detector for the Multiphase Sinusoidal Signals

วรรณภา ยาค่า อัจฉรวรรณ เนืองนิคย์ วิวัฒน์ ภิรานนท์ จริยา เลิศจรสอร่วมดี วิชา แสงพิสิทธิ์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

CT02 วงจร RMS สำหรับสัญญาณขาอินพุตที่แรงดันต่ำโดยใช้ขาบอดี้

Low Voltage RMS for Sinusoidal Signals by Body-Driven

เอกสิทธิ์ คำสง พลผดุง ผดุงกุล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

CT03 การประมาณอินซูลินที่ภายนอก่างกายโดยใช้โมเดลของ Bergman

Exogenous Insulin Input Estimation Using Bergman's Minimal Model

ฉัตรชัย เนตรพิศาลวนิช

มหาวิทยาลัยมหิดล

CT04 วงจรแปลงสัญญาณ RMS เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรขยาย CMOS Class AB ที่สามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้

An Integrable CMOS-Based True RMS-to-DC Converter Using Class AB Amplifier.

ชนิษฐา แก้วแดง เฉลิมภักดิ์ ฟองสมุทร เกียรติศักดิ์ คมวิษระ วัลลภ สุระท่าพลธร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

CT05 เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่มีการปรับแก้ไขเนนซ์การบิด

Nonlinear Stability of a System Precompensated for Torsional Resonance

กองพันธ์ อารีรักษ์ สราวดี สุจิตจร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

CT06 การออกแบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์สำหรับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

The Design of Voltage Working Standard for The Voltage Standard Comparison Equipment

วันชัย ชินชูศักดิ์ วิชา ทิพย์สุวรรณพร วิริยะ กองรัตน์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

CT-B 23 พฤศจิกายน 2544 (09.00 – 10.40 น.) Oral Presentation

CT07 การออกแบบตัวควบคุมเชิงเอนกประสงค์สำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว

Multi-Objective Control Design for One-Link Flexible Robot Arm

วทีญญู กล้ายสงคราม เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CT08 การออกแบบตัวควบคุมป้อนไปหน้าร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วย CDM สำหรับกระบวนการระดับ

Feedforward Controller Design Incorporating PI Controller Designed by CDM for Level Processes

คนุพล คำปัญญา ถาวร เญจนราสุทธิ จงกล งามวิวิทย์ Noriyuki Komine

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Tokai University

CT09 การกู้วงรอบถ่ายโอนสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว

Loop Transfer Recovery for One-Link Flexible Robot Arm

ธูาปนา นามประดิษฐ์ เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CT10 การออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพระบบควบคุม ทากางิ-ซูกะโน ฟัซซี่พีดี+ไอ

Design and Stability Analysis of a Takagi-Sugeno Fuzzy PD+I Control System

อรรถพล กัณหเวก จงกล งามวิวิทย์ สุธี ผู้เจริญชนะชัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

CT11 การวิเคราะห์คงทนของการจัดโครงสร้างระบบควบคุมสำหรับแขนกลอ่อนตัวข้อต่อเดียว

Robust Analysis of Control System Configurations on One-Link Flexible Robot Arm

อนันต์ พันธุ์พิพัฒน์ไพบุลย์ เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CT-C 23 พฤศจิกายน 2544 (13.00 – 15.10 น.) Oral Presentation

CT12 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่แบบอ้อมโดยวิธีวางโพล

Design of Indirect Fuzzy Controller by Pole Placement

สุรกิจ เลิศอุดมสุข จงกล งามวิวิทย์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- CT13 การออกแบบตัวควบคุมความถี่เนื่องจากโหลดที่มีดัชนีสมรรถนะ H_{∞} ที่เชื่อถือได้สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหลายพื้นที่
Reliable H_{∞} Load-Frequency Controller Design for Multi-Area Power Systems
อดิรัญย์ กาญจนเหตุทัย มานพวงศ์ สายสุวรรณ
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- CT14 การระบุเอกลักษณ์ระบบสองมวลเฉื่อยที่ปรากฏรีโซแนนซ์การบิด ด้วยวิธีการค้นหาแบบดาบ
Identification of a Two-Inertia System with Torsional Resonance Using Tabu Search
ศราวุธ โพธิธา
มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
- CT15 การควบคุมแบบโครงสร้างเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้สูตรของแอกเคอร์มัน
Variable structure control based on Ackermann's formula
เกษม อุทัยไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
- CT16 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบหลายอัตราส่วน
A Controller Design for Multirate systems
เอกสิทธิ์ เปี่ยมบริบูรณ์ มานพ วงศ์สายสุวรรณ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- CT-P 23 พฤศจิกายน 2544 (11.00 – 12.00 น.) Poster Presentation
- CT17 การออกแบบโปรแกรมควบคุมเครื่องอ่านพิกัด 3 แกนด้วยแสงเลเซอร์
Design Program for Control 3-D Laser Digitizer
อาคม มณีคันโท พิเชษฐ ลิมสุวรรณ เอก ไชยสวัสดิ์ กวิน สนธิเพิ่มพูน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

การออกแบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์สำหรับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน The Design of Voltage Working Standard for The Voltage Standard Comparison Equipment

วันชัย ชินชูศักดิ์ วิชา ทิพย์สุวรรณพร และ วิริยะ กองรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทร.02-3267346 ต่อ 102, โทรสาร: 02-3267347 ต่อ 103, Email: s2061151@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานในระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์ สำหรับใช้กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีค่าผิดพลาดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนหรือเทอร์มอลอีเอ็มเอฟค่า ในการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานชนิดซีเนอร์ไดโอดเน้นเทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบสองขั้นที่ให้ปริมาณกระแสเอาต์พุตต่ำ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ามีความคงที่สม่ำเสมอและความเที่ยงตรงสูง ที่มีความเสถียรภาพดีกว่า $\pm 0.01\%$ หรือ 100 พีพีเอ็ม/เดือน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน นอกจากนี้สามารถใช้เป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานสำหรับห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

Abstract

This paper presents a process of design and making 10 DC voltage working standard for the voltage standard comparison equipment which is a low thermal voltage error. In this design of the zener diode voltage standard type emphasizes on the double voltage regulation technique with low current output in order to generate a high stable and precision voltage. Practically, It was found that its stability is better than 0.01% or 100 ppm/month. Hence this equipment is suitable for the voltage standard comparison equipment. Moreover the 10 DC voltage working standard can also be used for the electrical laboratory in industrials sector.

1. บทนำ

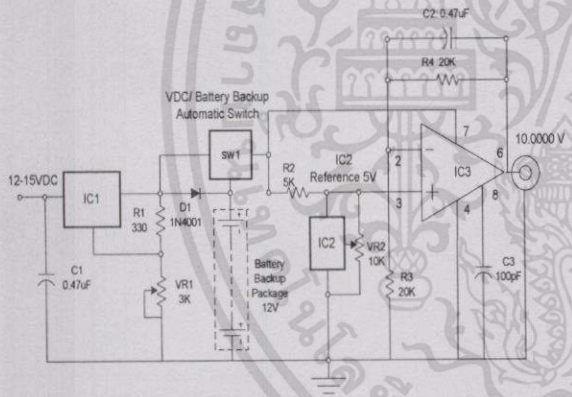
จากการออกแบบเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแชนแนล (Multi-Channel Automated Voltage Standard Comparison Equipment : AVSC)[1] ที่มีค่าเทอร์มอลอีเอ็มเอฟค่าซึ่งใช้เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงสูงกว่ากับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงต่ำกว่าหรือมาตรฐานระดับใช้งาน (working

standard) บทความฉบับนี้จะนำเสนอการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์ (10 DC voltage working standard : MET-10VDC) แบบซีเนอร์ไดโอด ซึ่งมีเสถียรภาพดีกว่า $\pm 0.01\%$ หรือ ± 100 พีพีเอ็ม/เดือน เพื่อใช้สอบเทียบมาตรฐานและตรวจสอบค่าผิดพลาดเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าสำหรับใช้ประจำห้องปฏิบัติการทั่วไปและงานที่ต้องการความถูกต้องไม่สูงมากก็มีความแม่นยำตั้งแต่ ± 100 พีพีเอ็ม ($\pm 0.01\%$) ขึ้นไปได้แก่ เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(ดิจิทัลโวลต์มิเตอร์) ขนาดตัวเลขแสดงผล 3½ หลัก ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีความแม่นยำตั้งแต่ ± 1000 พีพีเอ็ม หรือ มากกว่า $\pm 0.10\%$ และแบบอนาล็อกโวลต์มิเตอร์มีความแม่นยำมากกว่า $\pm 2\%$

2. หลักการทำงาน

ชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานขนาด 10 โวลต์ แบบซีเนอร์ไดโอด(MET-10VDC) ดังรูปที่ 1 ใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันแบบสองขั้นประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้ ส่วนแรกเป็นชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือโวลเตจเรกูเลเตอร์(Voltage Regulator) ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งชุดป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับภาคกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง(IC2) ภาคขยายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต(IC3) และนอกจากนี้ยังทำหน้าที่ประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นชุดไฟฟ้าสำรองอีกด้วย โดยใช้ไอซี IC1 เบอร์ LM317T ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ขนาด 12.0 โวลต์ โดยต่อร่วมกับตัวต้านทาน R1 ชนิดเมทัลฟิล์ม(Metal film) มีค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ ตัวต้านทานปรับค่าได้ VR1 มีค่าความต้านทาน 3 กิโลโห์มชนิดปรับละเอียดได้ 15 รอบแบบมัลติเทิร์น(multi-turn) ใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ได้ขนาด 12 โวลต์ ที่มีค่าผิดพลาดในช่วง $\pm 1\%$ หรือดีกว่า ส่วนที่สองเป็นชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงประกอบด้วย R2 ค่าความต้านทาน 5 กิโลโห์มค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ ป้อนกระแสไฟฟ้านขนาด 1 มิลลิแอมป์ให้กับ IC2 ใช้ไอซีเบอร์ LM336H ซึ่งเป็นชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงขนาด 5 โวลต์ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิประมาณ 20 พีพีเอ็ม/ปี ที่อุณหภูมิ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส ให้แรงดันไฟฟ้าที่มีความเที่ยงตรงอย่างต่อเนื่องถึง $\pm 0.05\%$ ต่อปี หรือดีกว่าจริงในรูปที่ 1 สามารถออกแบบให้ปรับแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 4 – 6 โวลต์ ด้วยตัวต้านทาน VR2 มีค่าความต้านทาน 10

กิโลโหม้ม ชนิดปรับละเอียดได้ 15 รอบ ซึ่งจะมีผลทำให้อินพุทของตัวกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมีความเสถียรภาพต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขนาดต่างๆ ได้ดี และส่วนที่สามเป็นภาคขยายแรงดันเอาท์พุทประกอบด้วย IC3 ใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ LM308H ที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงขนาด 5.0 โวลต์ จาก IC2 และต่อแบบทวีแรงดันไฟฟ้าให้ออกเป็นสองเท่าของแรงดันขาเข้าด้วยตัวต้านทาน R3 และ R4 มีค่าความต้านทานเท่ากันขนาด 20 กิโลโหม้ม ชนิดเมตลฟิล์มมีค่าผิดพลาด $\pm 1\%$ ต่อกันเป็นอัตราส่วน R3/R4 ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกมามีค่า 6 ของ IC3 ได้เป็น 10.0000 โวลต์ มีกระแสออกต่ำกว่า 10 มิลลิแอมป์ส่วนการกรองสัญญาณรบกวนนั้นใช้ตัวเก็บประจุ C2 ค่า 0.47 ไมโครฟารัด ต่อคร่อมกับตัวต้านทาน R4 ป้อนกลับ(feedback) และด้วยคุณลักษณะเฉพาะของไอซีออปแอมป์นี้จึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์พวกใบโพธิ์มาต่อพ่วงและความเสถียรภาพสูงของออปแอมป์ทำให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าออปแอมป์ทั่วไป ดังนั้นค่าตัวต้านทานป้อนกลับจึงต้องมีค่าสูงกว่าปกติ สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวงจรนี้ก็คือไม่ควรต่อเข้ากับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า 10 กิโลโหม้ม และนอกจากนี้ยังมีชุดไฟฟ้าสำรอง(battery backup) ขนาด 12 โวลต์จ่ายให้กับ IC2 และ IC3 เพื่อการทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกด้วย



รูปที่ 1 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์แบบซินเทโรไดโอด(MET-10VDC)

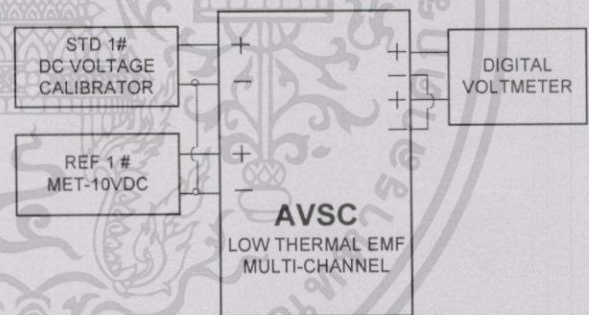
3. การทดลอง

การทดสอบชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC นี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบเสถียรภาพ(stability) กับเครื่องสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(DC voltage calibrator) โดยใช้ชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC ร่วมกับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า(AVSC) พิจารณาค่าผิดพลาด(error) และค่าการวัดซ้ำ(repeatability) ขั้นตอนที่สองเป็นการการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์(DVM) หรือเรียกว่า Unit Under Test : UUT และชุดจ่ายแรงดันชนิดควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือโวลเตจเรกูเลเตอร์กับชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC ด้วยเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.1 ทดสอบเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC

เริ่มจากวงจรการทำงานร่วมกันระหว่างชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC (รูปที่ 9 ในภาคผนวก) เป็นการทดสอบเสถียรภาพโดยพิจารณาจากค่าผิดพลาดและการวัดซ้ำ ด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (DC voltage calibrator) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ Fluke รุ่น 5500A[2] ที่ขนาดแรงดัน 10 โวลต์ ความไม่แน่นอน ± 13 พีพีเอ็ม ต่อเข้ากับเทอร์มินัลของเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC ดังแผนผังรูปที่ 2 และทำการวัดจำนวน 20 ครั้งช่วงระยะเวลา 1 เดือนโดยวัดอย่างต่อเนื่องทั้งแบบขั้วปกติ(forward : FWD) และวัดแบบกลับขั้ว(reverse : REV) แล้วจดบันทึกผลการสอบเทียบ สิ่งสำคัญก่อนที่จะทำการทดสอบเสถียรภาพชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC นั้นให้ใช้ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 5 $\frac{1}{2}$ หลัก หรือดีกว่า ปรับตั้งที่ตัวต้านทาน VR2 ของชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC ให้แรงดันเอาท์พุทขา 6 ของ IC3 อ่านได้ 10.0000 โวลต์(ให้อ่านได้ละเอียดถึง 100 ไมโครโวลต์)หรือดีกว่า และเพื่อให้มีเสถียรภาพมากขึ้นควรเลือกทำตามคำแนะนำดังนี้

1. สอบเทียบกับชุดแรงดันกระแสตรงมาตรฐานจากห้องปฏิบัติการระดับทุติยภูมิ(secondary standard laboratory) เพื่อปรับให้ค่าแรงดันให้ดีกว่า ± 100 ไมโครโวลต์ ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส



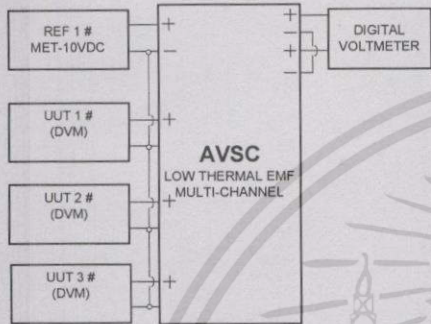
รูปที่ 2 แผนผังการเชื่อมต่อชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC เข้ากับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าVSC เพื่อทดสอบเสถียรภาพกับชุด DC Voltage Calibrator

2. ใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดอ่านได้ 5 $\frac{1}{2}$ หลัก เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้ดีกว่า ± 100 ไมโครโวลต์ ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส

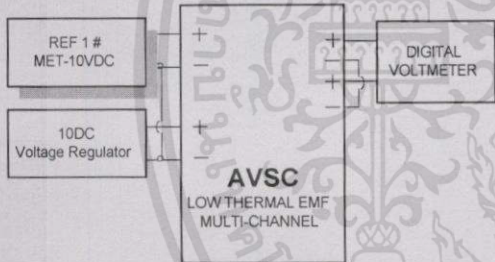
3.2 สอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์และชุดจ่ายไฟแบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า

การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ดังรูปที่ 3 และการสอบเทียบชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4 โดยสอบ

เทียบดิจิทัลโวลต์มิเตอร์และโวลเตจเร็กกูเลเตอร์ที่ขนาดแรงดัน 10 โวลต์ ตามลำดับ ด้วยชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC โดยวัดแบบขั้วปกติและวัดกลับขั้วเพื่อหาความผิดพลาดเฉลี่ย และค่าความไม่แน่นอน ทำเช่นเดียวกันกับในข้อ 3.1 ในการสอบเทียบนี้ให้ดิจิทัลโวลต์มิเตอร์ทั้งสามเครื่องเป็น UUT1, UUT2 และ UUT3 โดยลำดับ แล้วบันทึกผลการสอบเทียบเพื่อนำไปคำนวณผลค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนดังผลที่แสดงไว้ในข้อต่อไป



รูปที่ 3 การสอบเทียบดิจิทัลโวลต์มิเตอร์ด้วยชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC



รูปที่ 4 การสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์ด้วยชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC

4. ผลการทดลอง

จากผลของการสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC ด้วยเครื่องสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมาคำนวณตามสมการที่ 1[3] ข้างล่างนี้

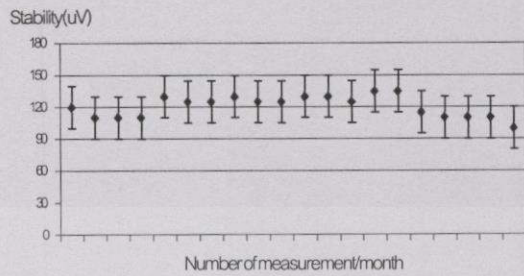
$$E_x = E_{STD} + \frac{1}{2}(E_{FWD} - E_{REV}) \quad (1)$$

เมื่อ E_x : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัด(โวลต์)

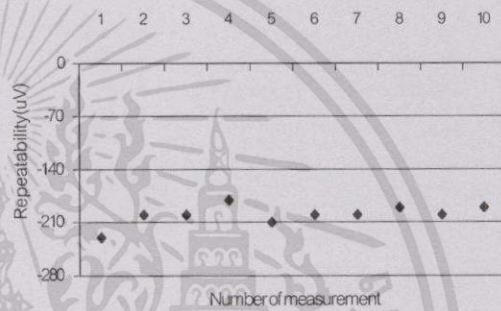
E_{STD} : ค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน(โวลต์)

E_{FWD} : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดแบบขั้วปกติ(โวลต์)

E_{REV} : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดแบบกลับขั้ว(โวลต์)



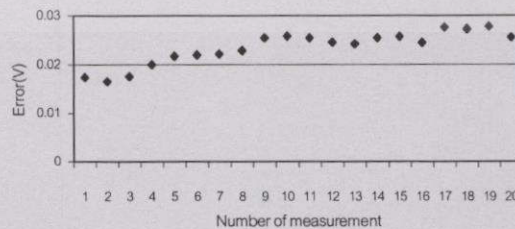
รูปที่ 5 ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC



รูปที่ 6 ความสามารถในการวัดซ้ำของชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC



รูปที่ 7 ค่าผิดพลาดของการสอบเทียบ UUT1, UUT2 และ UUT3



รูปที่ 8 ค่าผิดพลาดของการสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์

ผลที่ได้จากคำนวณตามสมการที่ 1 เมื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากการเปรียบเทียบกับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแล้วนำมาหาค่าผิดพลาดจากการวัดแสดงในลักษณะของความเสถียรภาพ(stability) ดังกราฟรูปที่ 5 แสดงความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(standard deviation) เท่ากับ 2 พีพีเอ็ม ค่าสูงสุดจากการวัดแบบปกติ 43 พีพีเอ็ม และวัดแบบกลับซ้ำ 64 พีพีเอ็ม ในรูปที่ 6 แสดงค่าความสามารถในการวัดซ้ำ(repeatability) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.3 พีพีเอ็ม ส่วนผลการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ UUT1, UUT2 และUUT3 ทั้งแบบซ้ำปกติและแบบกลับซ้ำดังรูปกราฟที่ 7 ค่าผิดพลาดของ UUT1 กับ UUT2 เท่ากับ 0.1% ส่วนค่าผิดพลาดของ UUT3 เท่ากับ 0.7% ค่าความไม่แน่นอน(uncertainty)ตามมาตรฐาน ISO/TAG4[4] เท่ากับ ± 0.02 โวลต์ และผลการสอบเทียบโวลต์จเร็กกูเลเตอร์ ดังกราฟรูปที่ 8 ค่าผิดพลาดเท่ากับ -0.024 โวลต์ ค่าความไม่แน่นอนของกรวัดเท่ากับ ± 0.02 โวลต์

5. บทสรุป

ผลสรุปการทดสอบเสถียรภาพและความสามารถในการวัดซ้ำชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC ที่เปรียบเทียบกับเครื่องสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง DC Voltage Calibrator พร้อมด้วยเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC ดังกราฟรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามหัวข้อที่ 4 การวัดจำนวน 20 ครั้ง ระยะเวลาต่อเนื่อง 1 เดือน ที่สภาวะอุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $55 \pm 5 \%$ ค่าผิดพลาดสูงสุด ทั้งการวัดแบบซ้ำปกติและแบบกลับซ้ำต่ำกว่า ± 100 พีพีเอ็มหรือ ± 1 มิลลิโวลต์ (เปรียบเทียบกับการจัดระดับมาตรฐานใช้งานเท่ากับ ± 100 พีพีเอ็ม) ที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2 พีพีเอ็ม ค่าแรงดันที่วัดได้เท่ากับ 9.99990 ± 0.00015 โวลต์

ส่วนการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ (UUT1, UUT2 และ UUT3) ดังกราฟรูปที่ 7 ด้วยชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าAVSC ได้ผลสรุปดังนี้ UUT1 เท่ากับ 9.99 ± 0.02 โวลต์ UUT2 เท่ากับ 10.01 ± 0.02 โวลต์ และUUT3เท่ากับ 9.93 ± 0.02 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามที่ผู้ผลิตระบุคือ 0.4% และ1% ตามลำดับและการสอบเทียบโวลต์จเร็กกูเลเตอร์ ดังกราฟรูปที่ 8 ได้ค่าแรงดัน 9.98 ± 0.02 โวลต์

ชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC จัดได้ว่าเป็นชุดแรงดันมาตรฐานมาตรฐานในระดับใช้งานได้จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้น นอกจากนี้จะใช้เป็นชุดอ้างอิงสำหรับสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการทั่วไปแล้ว ยังสามารถนำชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC นี้ไปประยุกต์ใช้สอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิ้ล และดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ได้อีกด้วยเพราะว่าใช้หลักการสอบเทียบเช่นเดียวกับการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1]. Ladkrabang Engineerng Journal, Volume 16, No. 3, Multi-Channel Automated Voltage Standard Comparison Equipment by W.Chinchusak, V. Tipsuwanpom, V. Kongratana and W. Piyarat , September 1999.
- [2]. Operation Manual of Multi-product Calibrator, Fluke 5500A, December 1994, REV.7, 4/1997
- [3]. J. Fluke, Instruction Manual of DC Reference Standard Mode 732A/732AN.
- [4]. ISO/TAG4, Guide to the expression of Uncertainty in measurement , January 1993.



ร.ศ. วิทยา พิษสุวรรณพร อาจารย์ระดับ 8 ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยการควบคุมระบบด้วยดิจิตอล



ผ.ศ. วิริยะ กองรัตน์ อาจารย์ระดับ 8 ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยออกแบบ PLC ประยุกต์ใช้ไมโครโปร

เซตเซอร์

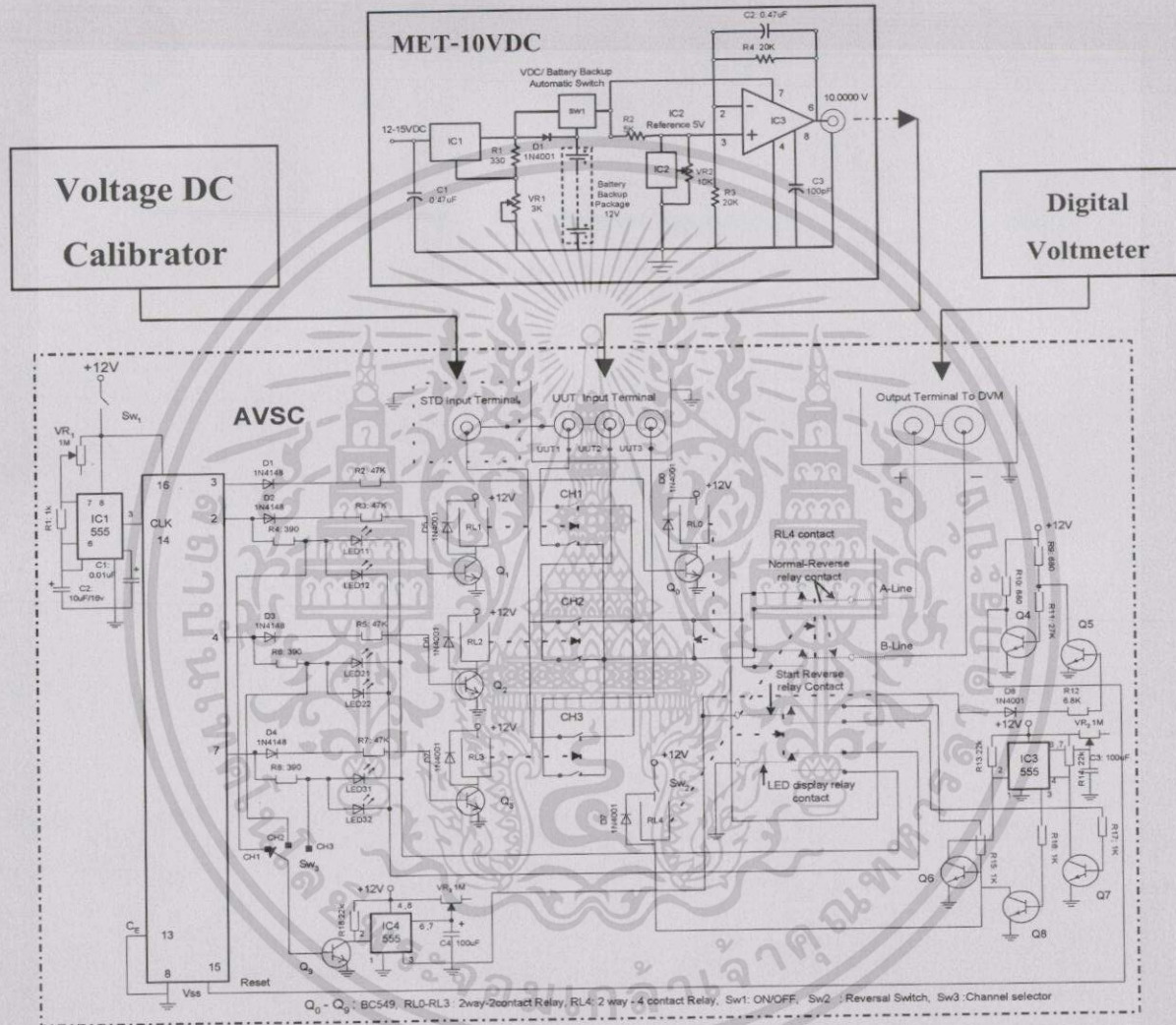


นายวันชัย จินสุศักดิ์ เกิดปี 2505 ได้รับปริญญาตรี วท.บ.(ฟิสิกส์)ปี 2529 รับราชการที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ ตั้งแต่ปี 2534-ปัจจุบัน บทความนี้เป็นผลงานชิ้นที่ 4 ซึ่งพัฒนาต่อจากงานวิจัยออกแบบเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า AVSC

7. ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (ECON-24) สจล. 22-23 พฤศจิกายน 2544

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหา 555 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



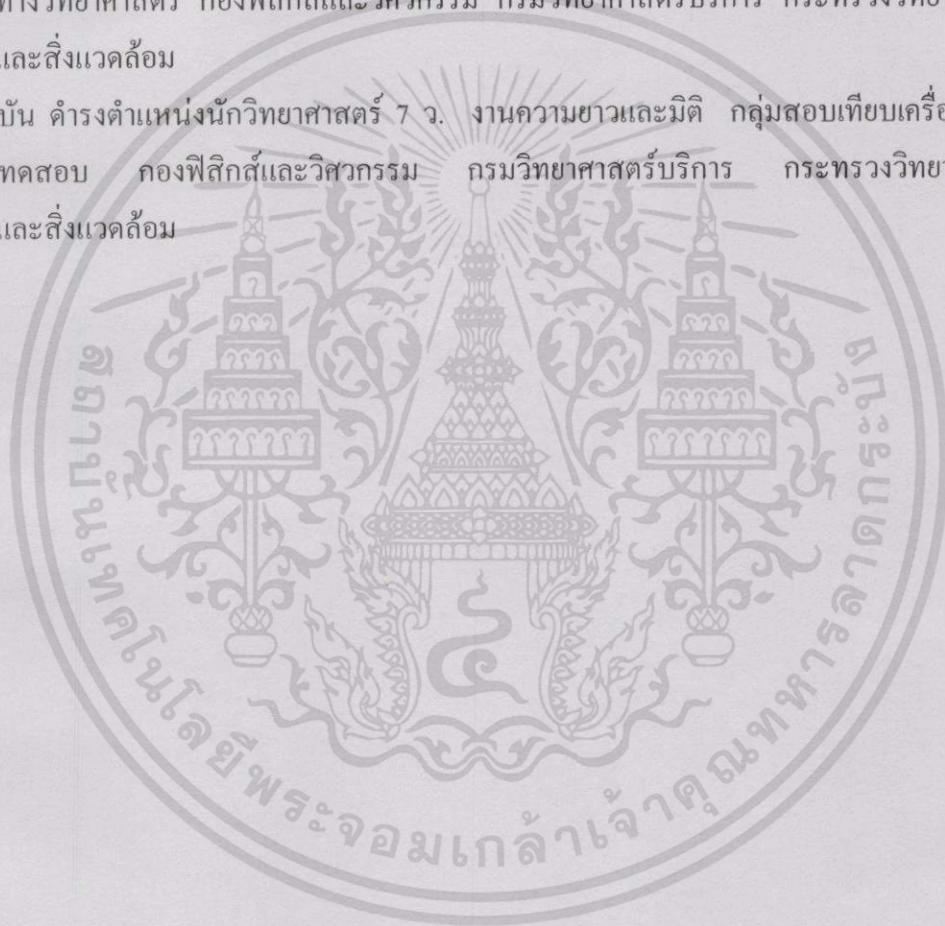
รูปที่ 9 การเชื่อมต่อชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้า(VDC Calibrator) ชุดแรงดันไฟฟ้าMET-10VDC และดิจิตอล โวลต์มิเตอร์ กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแชนแนล(AVSC)

ประวัติผู้เขียน

นายวันชัย ชินชูศักดิ์ เกิดวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2505 ที่จังหวัดอุทัยธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2529

เข้ารับราชการตำแหน่งนักอุดมศึกษา 3 ปี พ.ศ. 2532 กองอากาศเกษตร กรมอุดมศึกษา กระทรวงคมนาคม และโอนย้ายมารับราชการนักวิทยาศาสตร์ 3 ปี พ.ศ. 2534 โครงการพัฒนาระบบมาตรฐานวิทยาทางวิทยาศาสตร์ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7 ว. งานความยาวและมิติ กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัดวิเคราะห์ ทดสอบ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้