สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง

Developments of High Voltage Divider Kits



โดย

นาย จีรสิทธิ์ ชัยประภา
นาย ณรงค์ ทิมทอง
นาย ต่อสกุล โอภิธากรณ์
นาย ทิวา ขุนเที่ยง

วพ.
จ5631
2551

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.104190.....
วัน,เดือน,ปี.....30 ต.ค. 2552

b.....12101850.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง

Developments of High Voltage Divider kits

โดย

นาย จีรสิทธิ์ ชัยประภา

นาย ณรงค์ ทิมทอง

นาย ต่อสกุล โอภิธากรณ์

นาย ทิวา ขุนเที่ยง

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช

รศ.ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง

ผู้จัดทำ

1. นาย จีรสิทธิ์ ชัยประภา
2. นาย ณรงค์ ทิมทอง
3. นาย ต่อสกุล โอภิธากรณ์
4. นาย ทิวา ขุนเที่ยง

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง

นาย จีรสิทธิ์ ชัยประภา
นาย ณรงค์ ทิมทอง
นาย ต่อสกุล โอภิธากรณ์
นาย ทิวา ขุนเที่ยง
ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอในหัวข้อการพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง โดยได้ทำการออกแบบและศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของชุดทอลองการแบ่งแรงดันสูงด้านต่าง ๆ ได้แก่ ผลของขนาดตัวต้านทานและขนาดของตัวเก็บประจุต่อผลตอบสนองรูปขั้น รูปแบบการต่อตัวต้านทานหน่วงแบบต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุและลักษณะของผลตอบสนองรูปขั้นเมื่อชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูงเกิดความเหนี่ยวนำค่าต่าง ๆ ทั้งในภาคแรงสูงและแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of High Voltage Divider Kits

Mr. Jeerasit Chaiprapa
Mr. Narong Timthong
Mr. Torsakun Opitakorn
Mr. Tiwa Kunteang
Asst.Prof. Norasage Pattanadech Advisor
Assoc.Prof.Dr. Anantawat Kunakorn Advisor
2008

ABSTRACT

This Thesis presents the development of high voltage divider kits which are designed and used to study about characteristics of the divider. Effects of various resistances and capacitances due to unit step responses are discussed. A damped resistance is used in the capacitance voltage divider in different forms for better unit step responses. Inductances in high voltage part and the low voltage part are added.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร และผศ.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำตลอดจนพี่นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาต่อเนื่องสำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยเป็นอย่างมาก

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำเสมอมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ..... I

ABSTRACT.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VI

สารบัญตาราง.....XIV

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ชื่อโครงงาน.....1

1.2 ความสำคัญของปัญหา.....1

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....1

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในงานวิจัย.....1

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....2

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์.....4

2.1 ส่วนนำ.....4

2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....4

2.3 วงจรพื้นฐานแรงดันอิมพัลส์.....6

2.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด.....8

2.4.1 ผลตอบสนองรูปขั้น.....8

2.4.2 สเกลแฟกเตอร์.....13

2.5 โวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ.....16

2.5.1 วงจรสมมูลทั่วไป.....17

2.5.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน.....17

2.5.3 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ.....19

2.6 การต่อแมทชิ่งภาคแรงต่ำของระบบวัด.....22

บทที่ 3 การออกแบบการทดลองชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง.....25

3.1 คุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....25

3.2 การออกแบบการทดลอง.....28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.1 ออกแบบชุดทดลองแบ่งแรงดันสูงแบบความต้านทานล้วน.....28
3.2.2 ออกแบบชุดทดลองแบ่งแรงดันสูงชนิดตัวเก็บประจุ.....32

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....38
4.1 วงจรการทดลอง.....38
4.1.1 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานล้วน.....40
4.1.2 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานและเกิดความเหนี่ยวนำ
ในระบบ.....41
4.1.3 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ.....42
4.1.4 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R ขนาน.....43
4.1.5 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R อนุกรม.....44
4.1.6 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดความเหนี่ยวนำ.....45
4.1.7 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดความเหนี่ยวนำ
กระจาย R ขนาน.....46
4.1.8 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดความเหนี่ยวนำ
กระจาย R อนุกรม.....47
4.2 กราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ.....48

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....119
5.1 สรุปผลการทดลอง.....119
5.2 ปัญหาที่พบ.....121
ภาคผนวก.....123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์....4

2.2 แรงดันอิมพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา....6

2.3 วงจรพื้นฐานของระบบทดสอบแรงดันทั่วไป....6

2.4 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด....8

2.5 วงจรผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน....10

2.6 นิยามของผลตอบสนอง....12

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α / T_x 12

2.8 ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่มีต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน....14

2.9 ภาพสเกตของค่าเก็บประจุสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ....15

2.10 ภาพสเกตของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ....16

2.11 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์....17

2.12 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน....18

2.13 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ....19

2.14 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณ....20

2.15 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ....21

2.16 วงจรสมมูลสำหรับการต่อแมทชิ่งสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ....23

2.17 ภาพสเกตซ์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ....24

3.1 ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนฟิล์ม....25

3.2 โพลิเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ฟิล์ม....26

3.3 เคเบิล RG-8....27

3.4 เคเบิล RG-11....27

3.5 ตัวต้านทานสมคู่ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ....28

3.6 ตัวต้านทานสมคู่ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวต้านทาน....28

4.1 วงจรการทดลอง....38

4.2 Unit Step Generator....39

4.3 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานล้วน....40

4.4 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานและเกิดค่าความเหนี่ยวนำในระบบ....41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ.....42
4.6 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R ขนาน.....43
4.7 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R อนุกรม.....44
4.8 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ..45
4.9 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ
กระจาย R ขนาน.....46
4.10 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ
กระจาย R อนุกรม.....47
4.11 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11(มีค่า impedance = 75Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่.....48
4.12 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω(matching ผิด).....49
4.13 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω(matching ถูก).....50
4.14 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ปรับ input impedance ของ oscilloscope เป็น 50 Ω.....51
4.15 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-11).....52
4.16 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8(มีค่า impedance = 50Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่.....53
4.17 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω(matching ผิด).....54
4.18 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω(matching ถูก).....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.19 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่าง ๆ(เคเบิล RG-8).....56

4.20 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11(มีค่า impedance = 75 Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่.....57

4.21 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด).....58

4.22 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก).....59

4.23 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่าง ๆ(เคเบิล RG-11)..... 60

4.24 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8(มีค่า impedance = 50 Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่.....61

4.25 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด).....62

4.26 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω 63

4.27 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่าง ๆ(เคเบิล RG-8).....64

4.28 เปรียบเทียบ R_1 = 1 MΩ กับ R_1 = 10 kΩ 65

4.29 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ต่อสายเคเบิลที่มีอิมพิแดนซ์ต่างกัน 2 สาย จาก RG-8 ไป RG-11.....66

4.30 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ต่อสายเคเบิลที่มีอิมพิแดนซ์ต่างกัน 2 สาย จาก RG-11 ไป RG-8.....66

4.31 เปรียบเทียบ สายRG-8, RG-8 ไป RG-11 , RG-11ไป RG-8.....67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.32 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH.....68

4.33 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH.....69

4.34 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH.....70

4.35 ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH.....71

4.36 เปรียบเทียบกรณีมีค่าความเหนี่ยวนำและไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....72

4.37 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11(มีค่า impedance = 75Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่.....73

4.38 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด).....74

4.39 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก).....75

4.40 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ(เคเบิล RG-11).....76

4.41 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8(มีค่า impedance = 50Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่.....77

4.42 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด).....78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.43 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก).....79

4.44 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ(เคเบิล RG-8).....80

4.45 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่.....81

4.46 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด).....82

4.47 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก).....83

4.48 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ(เคเบิล RG-8).....84

4.49 เปรียบเทียบระหว่าง $C_1 \approx 40$ pF และ $C_1 \approx 100$ pF ใช้สาย RG-8
ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω 85

4.50 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH.....86

4.51 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH.....87

4.52 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH.....88

4.53 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH.....89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.54 เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำค่าต่าง ๆ.....90

4.55 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μ Hและภาคแรงต่ำ 1 μ H.....91

4.56 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μ Hและภาคแรงต่ำ 3 μ H.....92

4.57 เปรียบเทียบมี L ที่ LV และ HV อย่างละ 1 μ H กับ กับมี L ที่ LV 1 μ H.....93

4.58 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว กระจาย R 5 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว กระจาย R 5 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน.....94

4.59 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว กระจาย R 5 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว กระจาย R 5 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบอนุกรม.....95

4.60 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบอนุกรมและแบบขนาน.....96

4.61 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน15 ตัว กระจาย R 11 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว กระจาย R 10Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบอนุกรม.....97

4.62 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบอนุกรมR_1 = 5 kΩ กับ 11 kΩ 98

4.63 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว กระจาย R 10 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว กระจาย R 10 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน.....99

4.64 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบขนานR_1 = 5 kΩ กับ 11 kΩ 100

4.65 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน15 ตัว กระจาย R 750 Ω
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว กระจาย R 0.75 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน.....101

4.66 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบขนานR_1 = 5 kΩ , R_1 = 11 kΩ
กับ R_1 = 750 Ω 102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.67 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH.....103

4.68 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH.....104

4.69 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH.....105

4.70 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH.....106

4.71 เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำค่าต่างๆ.....107

4.72 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....108

4.73 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....109

4.74 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....110

4.75 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.76 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....112
4.77 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....113
4.78 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....114
4.79 ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω).....115
4.80 เปรียบเทียบระหว่างMIX R อนุกรม กับ MIX Rอนุกรม+LHV 3.....116
4.81 มี L ที่ HV 1 μH ไม่ได้MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน.....117
4.82 มี L ที่ HV 3 μH ไม่ได้MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน.....118
4.83 มี L ที่ LV 1 μH ไม่ได้MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน.....119
4.84 มี L ที่ LV 3 μH ไม่ได้MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน.....120

ภาคผนวก ก

ก.1 Metal Film Resistors.....124
ก.2 Wire Would Resistors.....125
ก.3 Metal Oxide Resistors.....125
ก.4 Paper Capacitor.....126
ก.5 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า.....127
ก.6 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค.....128
ก.7 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม.....129
ก.8 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลอิก.....130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

ก.9 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม....131
ก.10 ตัวเก็บประจุแบบฟิดทรู....131
ก.11 ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้....132
ภาคผนวกข
ข.1 R_1 1 MΩ ไม่มี L....133
ข.2 R_1 1 MΩ มี L ที่ด้านแรงสูง 1 μH 134
ข.3 R_1 1 MΩ มี L ที่ด้านแรงสูง 3 μH 135
ข.4 R_1 1 MΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 1 μH 136
ข.5 R_1 1 MΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 3 μH 137
ข.6 R_1 10 kΩ ไม่มี L....138
ข.7 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงสูง 1 μH 139
ข.8 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงสูง 3 μH 140
ข.9 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 1 μH 141
ข.10 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 3 μH 142
ข.11 C divider Mix R_1 5 kΩ แบบขนาน ไม่มี L 143
ข.12 C divider Mix R_1 5 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงต่ำ 1 μH 144
ข.13 C divider Mix R_1 5 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงต่ำ 3 μH 145
ข.14 C divider Mix R_1 5 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงสูง 1 μH 146
ข.15 C divider Mix R_1 5 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงสูง 3 μH 147
ข.16 C divider Mix R_1 10 kΩ แบบขนาน ไม่มี L....148
ข.17 C divider Mix R_1 10 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงต่ำ 1 μH 149
ข.18 C divider Mix R_1 10 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงต่ำ 3 μH 150
ข.19 C divider Mix R_1 10 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงสูง 1 μH 151
ข.20 C divider Mix R_1 10 kΩ แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงสูง 3 μH 152
ข.21 C divider Mix R_1 750 Ω ไม่มี L 153
ข.22 C divider Mix R_1 750 Ω แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงต่ำ 1 μH 154
ข.23 C divider Mix R_1 750 Ω แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงต่ำ 3 μH 155
ข.24 C divider Mix R_1 750 Ω แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงสูง 1 μH 156
ข.25 C divider Mix R_1 750 Ω แบบขนาน มี L ที่ด้านแรงสูง 3 μH 157
ข.26 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงสูง 1 μH 158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้าที่

ข.27 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 1 μH 159

ข.28 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 100 nH.....159

ข.29 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 10 nH.....160

ข.30 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 3 nH.....160

ข.31 R_1 10 kΩ มี L ที่ด้านแรงต่ำ 1 nH.....161

ภาคผนวก ค

ค.1 นิยามความผิดพลาดของการวัด.....180

ค.2 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....181

ค.3 ตัวอย่างค่าการวัดที่ได้จากการทดลอง.....181

ค.4 กราฟฮิสโตแกรมของการวัด 20 ครั้ง.....185

ค.5 แสดงความหมายค่าเฉลี่ยของการวัด (X bar) และเปอร์เซ็นต์ของค่าวัด ที่จะเป็นได้ในช่วง+/- k sigma 185

ค.6 ค่า The degree of freedom V = n-1.....187

ค.7 Rectangular Prabability Distribution.....188

ค.8 Triangular Distribution.....189

ค.9 U-Shape Prabability Distribution.....189

ค.10 Normal or Gaussian Prabability Distribution.....190

ค.11 วิธีการ Curve Fitting.....196

ค.12 การอ่านค่าระหว่างจุด.....199

ค.13 ความผิดพลาดจากตัวเลขเต็ม 201

ค.14 ผลของรีโซลูชั่น.....201

ค.15 แสดงการรบกวนจากกระแสวงรอบ (Loop Currents : Icm) และวิธีป้องกันด้วย Guard Connection.....202

ค.16 แสดงตัวนำไฟฟ้าพาดผ่านบริเวณที่มีความร้อน T1 , T2 , T3, T4.....203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 1.....2
1.2 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 2..... 3
ภาคผนวก ค
ค.1 แสดงตัวอย่างค่าความไม่แน่นอนในการวัดในรายงานผลสอบเทียบ ความต้านทาน 10 โอห์ม.....162
ค.2 ลักษณะประจำตัวของการกระจาย.....169
ค.3 แสดงตัวอย่างตัวคูณจากตาราง t-Distribution.....170
ค.4 การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด 178
ค.5 แสดงค่า k (ตัวคูณ) และเปอร์เซ็นต์ของค่าวัดที่จะเป็นไปได้ในช่วง +/- k sigma 186
ค.6 Student's t-distribution.....193
ค.7 ข้อมูลจาก Calibration Certificate.....195
ค.8 แสดง DC Voltage Specification ของ Fluke 8508A Reference Multimeter....197
ค.9 AC Voltage Specification ของ DMM รุ่น Fluke 8508A 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ชื่อโครงงาน

การพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง
(Developments of High Voltage Divider kits)

1.2 ความสำคัญของปัญหา

ในการศึกษาการออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ สามารถพัฒนาจากโวสเตจดิไวเดอร์ประเภทตัวเก็บประจุ หรือโวลเตจดิไวเดอร์ประเภทตัวต้านทาน ซึ่งในปัจจุบันนั้นถึงแม้ว่าการออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์นั้นได้มีการจัดทำกันอย่างแพร่หลายก็จริง แต่โวลเตจดิไวเดอร์ที่ได้ออกแบบมาส่วนใหญ่มักมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้น ประมาณ 1 – 3 ปี และประสิทธิภาพในการใช้งานอยู่ในระดับที่ไม่ค่อยเป็นที่น่าพอใจ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวได้ทางโครงงานจึงได้ออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบจำลองขึ้นมาเพื่อศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ที่ส่งผลต่อการวัด เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบพัฒนาปรับปรุงอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ในอนาคต

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1) เพื่อศึกษาทฤษฎีและวิธีการออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์เบื้องต้นโดยใช้ชุดจำลองโวลเตจดิไวเดอร์
2) เพื่อศึกษาแนวทางในการพัฒนาชุดจำลองโวลเตจดิไวเดอร์
3) เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับจัดสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ในอนาคตได้

1.4) ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองโครงสร้างและศึกษาผลของความต้านทานตัวเก็บประจุและความเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นองค์ประกอบของอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ โดยทดสอบด้วยสัญญาณรูปขั้นหนึ่งหน่วยที่ระดับแรงดันไม่เกิน 1 kV โดยทำการออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์ 3 แบบคือ

1. โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานล้วน
2. โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุล้วน
3. โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุที่มีการกระจายตัวต้านทานเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะสมบัติในการวัดแรงดันอิมพัลส์
   3.1 ความต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ
   3.2 ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะศึกษาว่าโวลเตจดิไวเดอร์แบบใดและลักษณะการจัดวางองค์ประกอบของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำแบบใดที่ทำให้โวลเตจดิไวเดอร์ที่ได้ปรับปรุงแก้ไขแล้วมีผลตอบสนองดีขึ้น หาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยใช้วิธีวัดค่าอิมพิแดนซ์ ศึกษาผลของค่าตัวเหนี่ยวนำต่อสัญญาณรูปขั้นที่ได้จากโวลเตจดิไวเดอร์แต่ละชนิด

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 1

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	พ.ศ. 2551				
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1.ศึกษางานวิจัยต่างๆและการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬ ▬ ▬			
2.ศึกษามาตรฐานต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬		
3.ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬
4.ศึกษาเรื่องความไม่แน่นอนของการวัดและคุณสมบัติของอุปกรณ์วัด			▬ ▬ ▬ ▬ ▬	▬ ▬ ▬ ▬ ▬	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 2

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	พ.ศ. 2551			พ.ศ. 2552		
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ทำการทดลองชุดทดลองแบ่งแรงดันสูงกรณีต่างๆ	———	———	———	- - -		
2. จำลองผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์		———	———	- - -		
3. แก้ไขและปรับปรุง			———	———		
4. สรุปและประเมินผลการทดลอง			———	———	- - -	
5. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์				———	———	———

——— แผนงาน - - - ดำเนินการจริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจทฤษฎีและหลักการสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์
2. สามารถใช้งานโวลเตจดิไวเดอร์ได้อย่างเหมาะสม
3. มีความรู้ในการออกแบบและสามารถออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์ได้อย่างเหมาะสม
4. มีความรู้ความเข้าใจในเรื่อง ความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty) และสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปปรับแก้ค่าที่ได้จากการวัด
5. มีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้าแรงสูง
6. ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

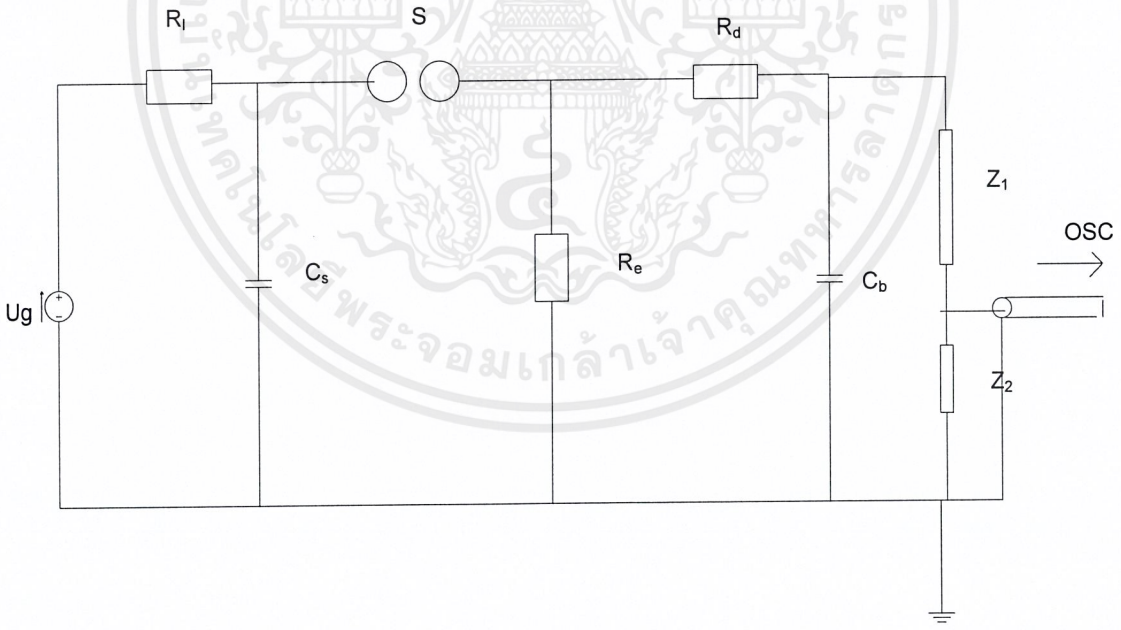
บทที่ 2
หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์

2.1 ส่วนนำ

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่ไม่เป็นคาบ เกิดขึ้นและหายไปอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงต้องใช้ระบบวัดที่มีความไวและคุณลักษณะเฉพาะ การวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในปัจจุบันอาจวัดได้ด้วยแกปทรงกลมและโวลเตจดิไวเดอร์ แต่การวัดด้วยแกปทรงกลมนั้นมักจะใช้เพียงเพื่อทำการปรับเทียบ (calibration) ระบบวัด ทั้งนี้เพราะว่าการวัดด้วยแกปทรงกลมเป็นการวัดค่ายอดเท่านั้น โดยไม่ทราบลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้โวลเตจดิไวเดอร์ในการวัด โดยอาศัยหลักการลดทอนแรงดันมาให้ต่ำพอด้วยอิมพิแดนซ์ แล้วใช้อุปกรณ์วัดหรือบันทึก เช่น โวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดและออสซิลโลสโคปที่ช่วยให้บันทึกรูปคลื่นได้

2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ในที่นี้จะหมายถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

โดยสัญลักษณ์ต่าง ๆมีความหมายดังนี้

U_g คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย

R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

Cs คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

S คือ สปาร์กแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Re คือ ความต้านทานหลังคลื่น

Rd คือ ความต้านทานหน้าคลื่น

Cb คือ ตัวเก็บประจุโหลด

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่สร้างจากวงจรทรานเซียนต์ RC และสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรสามารถเขียนเป็นฟังก์ชั่นทางเวลาได้ว่า [2]

$$U(t) = \frac{U_o}{k} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \quad (2.1)$$

หรือ

$$U(t) = A.[\, e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \quad (2.2)$$

โดยที่ α_1, α_2 คือรากของสมการ $S^2 + B_1 s + B_o = 0$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1}{2} \pm \sqrt{[\frac{B_1}{2}]^2 - B_o} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$B_o = \frac{1}{R_d R_e R_b C_s} \quad (2.4)$$

และ A คือค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ $\frac{U_o}{k} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}$

จึงเห็นได้ว่า สมการของแรงดันอิมพัลส์จะแปรตามเวลาและมีค่าคงตัวเวลาอยู่ที่ 2 ค่า คือ $\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ โดยค่าเวลาคงตัว $\frac{1}{\alpha_2}$ จะมีผลต่อช่วงหน้าคลื่น (T_1) และค่าคงตัวเวลา $\frac{1}{\alpha_1}$ จะมีผลต่อช่วงหางคลื่น (T_2)

ตามสมการ (2.5)

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2} \quad (2.5)$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (2.6)$$

เมื่อค่าคงที่ $k_1, k_2, \alpha_1, \alpha_2$ ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ในกรณีของรูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μs จะมีค่าคงที่ดังกล่าวเป็น [2]

$k_1 = 0.73$

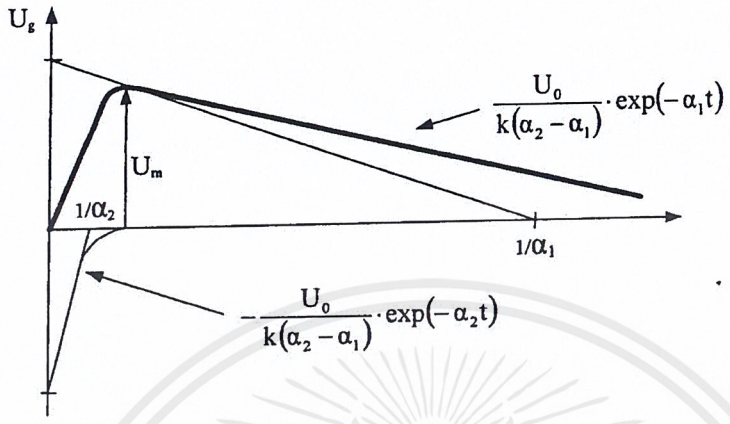
$k_2 = 2.96$

$1/\alpha_1 = 68.5$ μs

$1/\alpha_2 = 0.405$ μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

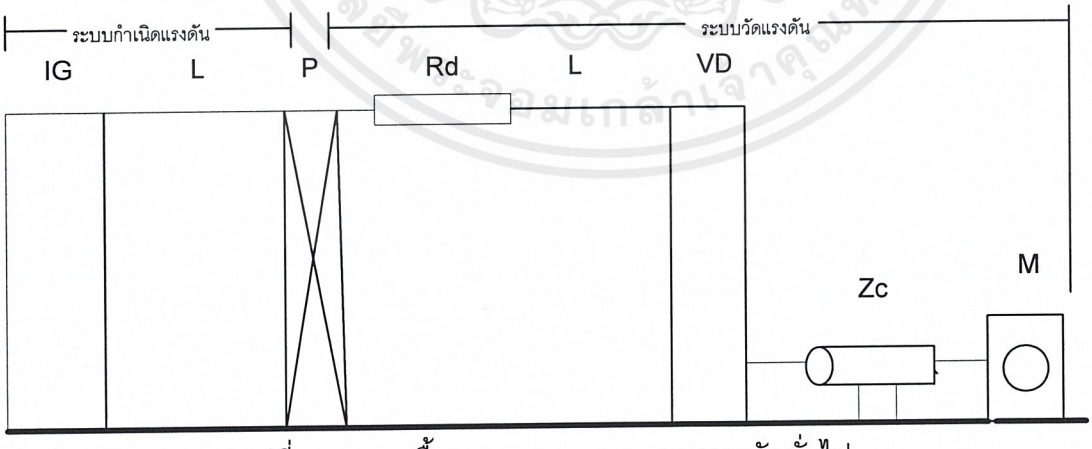
จะเห็นได้ว่าค่าคงตัวเวลา $\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ นั้นมีค่าแตกต่างกันประมาณ 168 เท่า ทำให้ค่าคงตัวเวลาช่วงหน้าคลื่นไม่มีผลกระทบต่อค่าแรงดันในช่วงหางคลื่นที่ค่าเวลามากๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา

2.3 วงจรพื้นฐานวัดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานการวัดแรงวัดอิมพัลส์จะประกอบด้วยสายนำ (L) ต่อจากจุดที่ต้องการวัดแรงสูง เช่น วัตถุทดสอบ P ซึ่งอาจมีความต้านทานหน่วง R_d อยู่ที่ต้นสายตัวนำหรือที่อิเล็กโทรดแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ VD เคเบิลวัด Z_c อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น M และระบบวัดจะต้องมีระบบสายดิน G ที่ดีดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของระบบทดสอบแรงดันทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 2.3 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1) ความต้านทานหน่วง Rd ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดิไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำซึ่งอาจต่อไว้ที่ต้นสายนำหรือที่อิเล็กโทรดแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ในกรณีที่สายนำมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงที่ต้นสายนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพิแดนซ์ของสายนำ จะหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพิแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายนำกับวงจรกำเนิดแรงดันและโวลเตจดิไวเดอร์

2) สายนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดิไวเดอร์ โดยทั่วไปโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องอยู่ห่างจากอุปกรณ์ทดสอบโดยความยาวของสายนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดิไวเดอร์ลง ขนาดของสายนำควรจะต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งจะเป็นคลื่นรบกวนต่อระบบวัดแรงดันได้ในวงจรทดสอบทั่วไป สายนำมักอยู่ในแนวระดับ ซึ่งเวลาคลื่นเดินทาง τ_L จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วแสง c เนื่องจาก $Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}$ และ $\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = \frac{\ell}{C}$ โดย L_L คือค่าความเหนี่ยวนำ C_L คือค่าเก็บประจุและ ℓ คือความยาวสายตัวนำ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้ว่า $Z_L = (\frac{\ell}{C})\, C_L$ ค่าเก็บประจุของสายนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่าสายนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง d วางอยู่สูง H เหนือระนาบดิน สมการหาค่าเก็บประจุของสายนำคือ

$$C_L = \frac{2\pi\varepsilon_o \ell}{A} \qquad (2.7)$$

โดยที่ $A = \ln(\frac{4H}{d}) - \ln\frac{1}{2}(1+\sqrt{1+2(\frac{H}{\ell})})$

เนื่องจาก $C = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ โดยที่ μ_0 และ ε_0 คือค่าเพอร์มีบิลิตีและค่าเพอร์มิตติวิตีของอวกาศตามลำดับ ดังนั้น จะได้ค่าเสิร์จอิมพิแดนซ์ของสายตัวนำเป็น

$$Z_L = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\, A \approx 60\, A \qquad (2.8)$$

3) โวลเตจดิไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้มีขนาดอยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4) เคเบิลวัดทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและลดการรบกวนจากสนานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (coaxial cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ

5) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น เป็นออสซิลโลสโคป อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชีลด์เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6) ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แถบโลหะบาง เช่น ทองแดงแผ่นบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันมีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันทั่วไปจะพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ผลตอบสนองรูปขั้น

2) สเกลแฟกเตอร์

2.4.1 ผลตอบสนองรูปขั้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (transfer characteristic) ของโวลเตจดิไวเดอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีนั้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลเตจดิไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบเฉื่อย(Passivecomponent) ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(S) \\ I_i(S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(S) & A_{12}(S) \\ A_{21}(S) & A_{22}(S) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_0(S) \\ I_0(S) \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

เมื่อ s คือตัวแปลงลาปลาซ

ในกรณีที่ $I_0 \approx 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชั่นถ่ายโอน (transfer function) ได้เป็น

$$H(s) = \frac{U_0(S)}{U_i(S)} = \frac{1}{A_{11}(S)} \tag{2.10}$$

ค่า H(s) จะแทนผลตอบสนองในเชิงความถี่ของระบบวัด ที่ความถี่ต่ำๆค่ายอดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นค่ายอดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่ค่ายอดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ± 3dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่าความถี่จำกัด (limit frequency) ดังนั้น ฟังก์ชั่นถ่ายโอนหนึ่งหน่วย(normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(o)}{A_{11}(s)} \tag{2.11}$$

เนื่องจากโวลเตจดิไวเดอร์มักจะมีสแกลแฟกเตอร์ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น การหาผลตอบสนองแอมปลิจูด/ความถี่ (amplitude/frequency response) จึงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีที่นิยมในทางปฏิบัติ คือ การหาผลตอบสนองรูปขั้น (step response) G(t) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชั่นถ่ายโอนเป็น

$$G(t) = L^{-1}[\frac{1}{s}H(s)] \tag{2.12}$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออก เมื่อทราบแรงดันขาเข้า เมื่อทราบแรงดันขาเข้า $V_i(t)$ ใดๆได้จาก

$$V_0(t) = \int_0^t V_i(t-\tau).G(\tau).d\tau \tag{2.13}$$

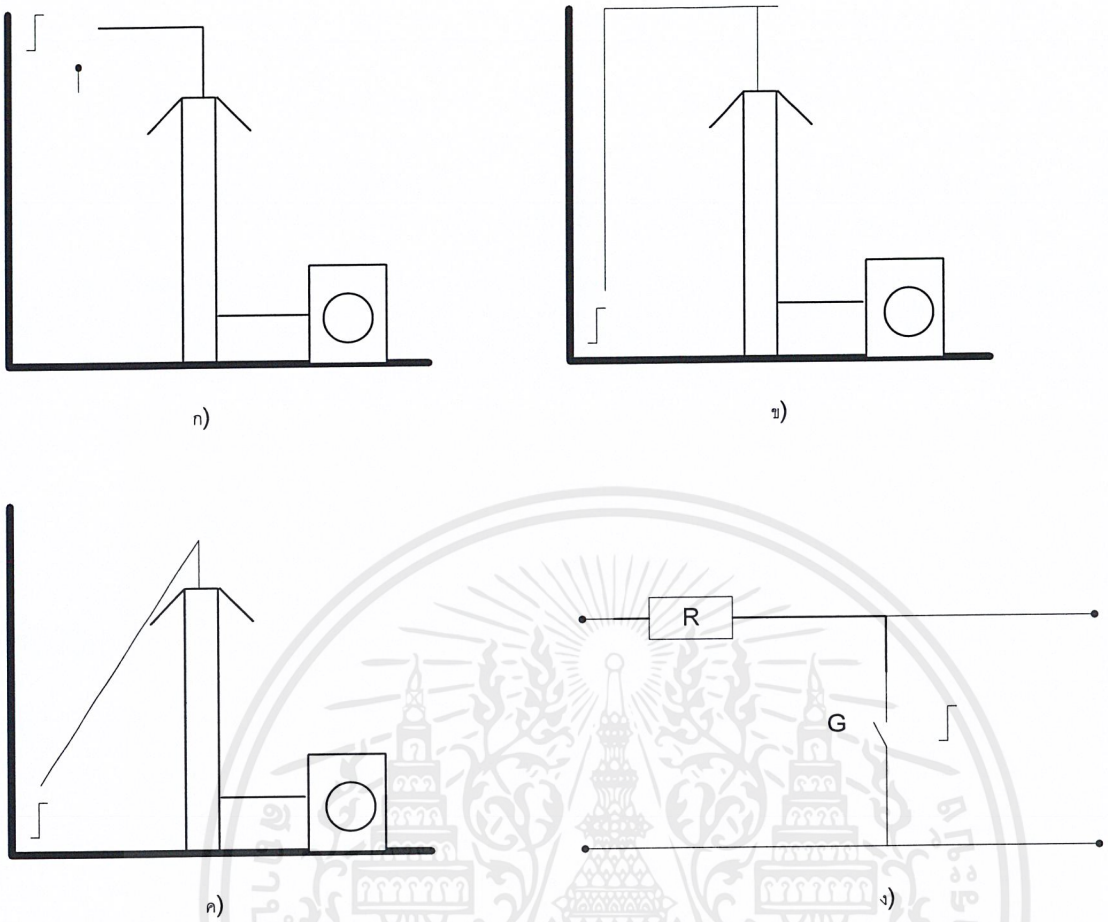
เมื่อ $V'_i(t-\tau)$ คืออนุพันธ์ของ $V_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชั่นถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังแสดงในสมการ(2.13)

$$T_N = \lim_{s\to 0}\left[\frac{1-h(s)}{s}\right] \tag{2.14}$$

โดยวงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขั้นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60-2(1994) แสดงไว้ในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)　　ข)

ค)　　ง)

รูปที่2.5 วงจรผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบการวัดแรงดันโดยที่ G คือแกปสร้างแรงดันรูปขั้น

วงจรที่มาตรฐานแนะนำไว้คือ วงจรในรูปที่ 2.5ก) และพารามิเตอร์ ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น มาตรฐานได้กำหนดนิยามไว้ดังนี้

1) พารามิเตอร์ผลตอบตนอง (response parameters) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นโดยวิธีที่กำหนด

2) จุดเริ่มต้นเสมือนของของผลตอบสนองรูปขั้น (virtual origrin of a step response, O_1) หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้น กรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่น จะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่งและใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น

3) ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ (normalized step response, g(t)) หมายถึง ผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่2.6ก)

4) อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น (step response intrigral) หมายถึง อินทิกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น g(t) (ดูรูปที่ 2.6ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(t) = \int_{O_1}^{\tau} (1 - g(\tau))\, d\tau \qquad (2.15)$$

5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง (experimental response time, T_N) หมายถึงค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{max}

$$T_N = T(t_{max}) \qquad (2.16)$$

6) เวลาตอบสนองบางส่วน (partial response time, T_α) หมาถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7) เวลาตอบสนองเศษเหลือ (residual response time, $T_R(t_i)$) หมาถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอิทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{max}$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) \qquad (2.17)$$

8) ส่วนพุ่งเกิน (overshoot, β) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย g(t) ที่เกินหนึ่งหน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (initial distortion time, T_0) หมายถึงพื้นที่ที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์, ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย g(t) เส้นตรงที่ใช้หา O_1

10) เวลาเข้าสู่ภาวะคงตัว (settling time, t_s) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองเศษเหลือ $T_R(t_i)$ มีค่าน้อยกว่า 2% ของ t

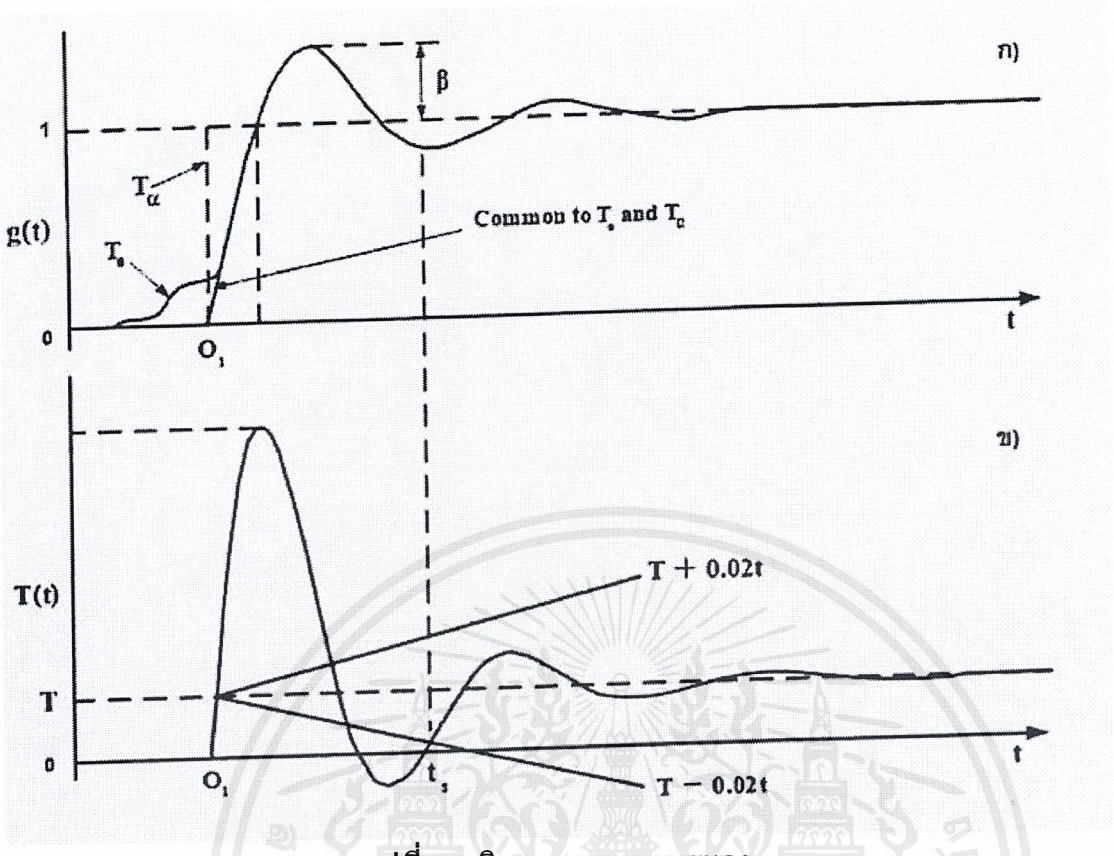
$$\left|T_N - T_{(t)}\right| < 0.02 t_s \qquad (2.18)$$

สำหรับทุกๆค่าของ t ในช่วง

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่ได้ระบุที่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ดังนี้

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่น ที่ค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วนพุ่งเกิน β และเวลาตอบสนองบางส่วน T_α ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า β และ T_α / T_1 จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรเงาของรูปที่2.7

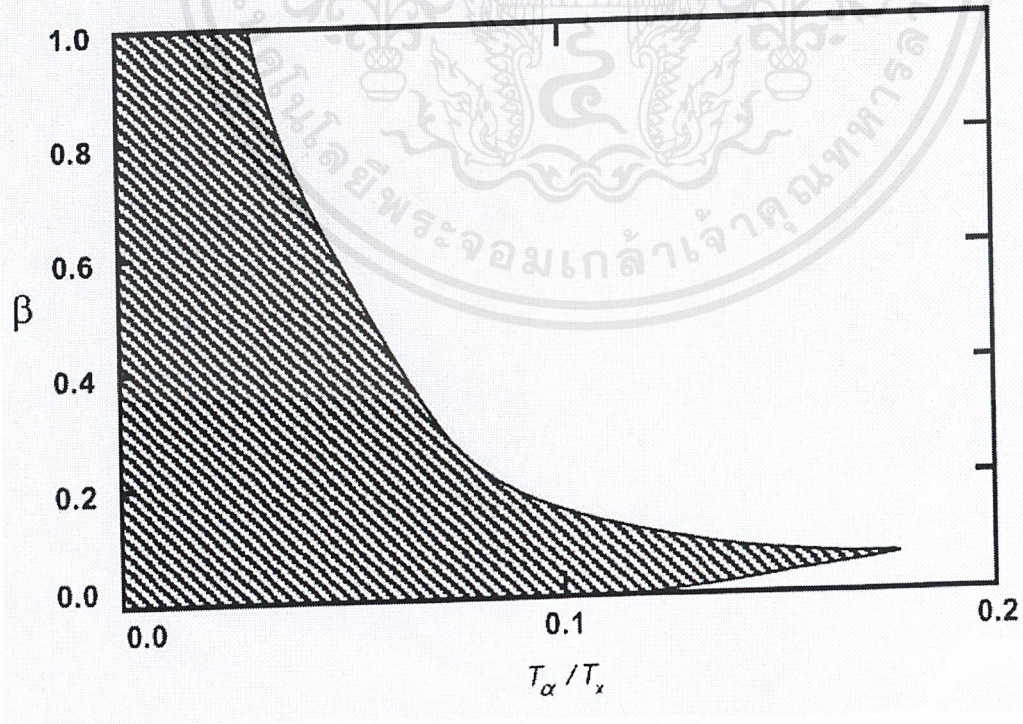
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 นิยามของผลตอบสนอง

ก) เมื่อเทียบกับ g(t)

ข) เมื่อเทียบกับ T(t)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α / T_x

โดยที่ T_x คือเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่การวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาคลื่นตัด T_c พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

-เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

$$T_\alpha - 0.03T_c \le T_N \le 0.03T_c \qquad (2.19)$$

-เวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวควรมีค่า

$$t_s \le T_c \qquad (2.20)$$

-เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_0 \le 0.005T_c \qquad (2.21)$$

2.4.2 สเกลแฟกเตอร์

2.4.2.1 ความหมายของสเกลแฟกเตอร์

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [4] ได้นิยามไว้ดังนี้

"สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า"

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ความไม่แน่นอน (uncertainty)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นจะต้องมีความไม่แน่นนอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน $\pm 3\%$

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน $\pm 5\%$

2) ความมีเสถียรภาพ (stability)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 1 ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

ในกรณีวัดค่ายยอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 3\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 การหาสเกลแฟกเตอร์

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ สามารถหาได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

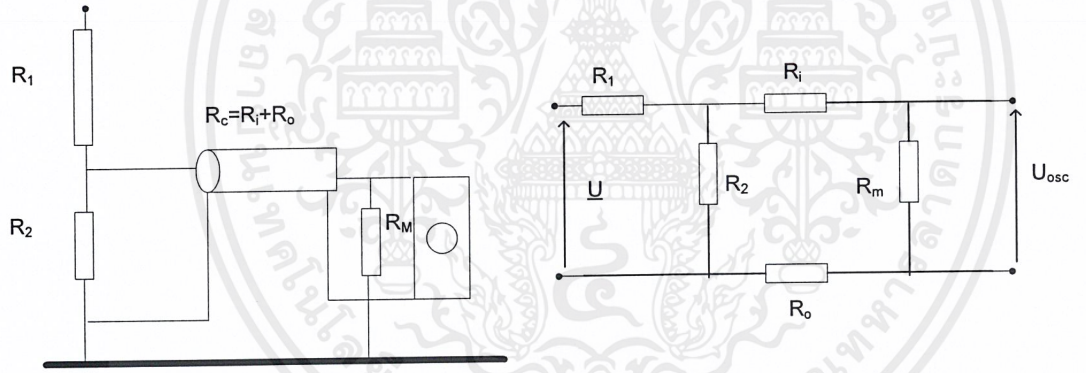
1) การวัดค่าแรงดันขาออกพร้อมกัน

2) ใช้วงจรบริดจ์

3) คำนวณค่าอิมพัลส์จากค่าอิมพิแดนซ์ที่วัดได้

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์โดยการใช้วิธีการคำนวณจากค่าอิมพิแดนซ์ที่วัดได้ มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้ให้ข้อแนะนำไว้ ดังนี้

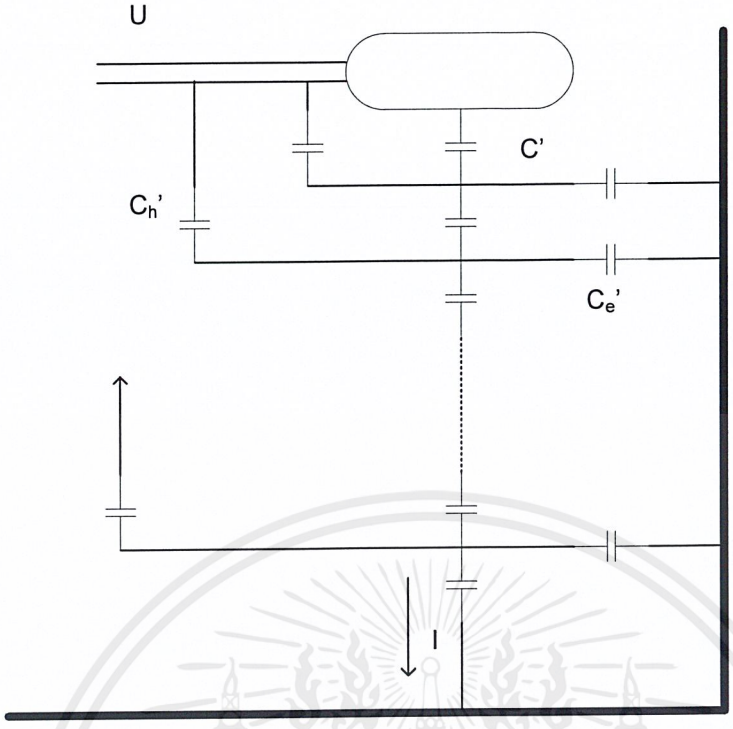
กรณีของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน ค่าความต้านทานของภาคแรงดันสูงและภาคแรงต่ำสามารถวัดได้โดยใช้แรงต่ำกระแสตรง ซึ่งอาจเป็น Wheatstone bridge หรือโอห์มมิเตอร์ที่มีค่าความแม่นยำสูง สำหรับเคเบิลวัดที่มีความยาวข่อนข้างมาก ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ (ตัวนำในชีลด์) จะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่าง R_2 และ R_M ซึ่งอาจจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม R_M ลดลง ดังนั้นแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนั้น ค่าความต้านทานของเคเบิลวัดควรนำมาพิจารณาด้วย



รูปที่ 2.8 ผลของความต้านทานของเคลเบิลวัดที่มีต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

ในกรณีของโวลเตอร์ดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ค่าประจุสเตรย์มีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์คือกระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ รูป 2.9 แสดงภาพสเกตช์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ซึ่งประกอบไปด้วยค่าเก็บประจุย่อย C' ต่ออนุกรมกันและมีค่าเก็บประจุสเตรย์ C_h' และC_e' ต่ออยู่ในจำนวนที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ภาพสเกตของค่าเก็บประจุสมมูล C_{eq} ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ในภาวะคงตัว สามารถหาค่าเก็บประจุสมมูล (equivalent capacitance) C_{eq} ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงได้จากสมการ 2.16

$$C_{eq} = \frac{I}{\omega U} \tag{2.22}$$

$$C_{eq} = C\frac{1+\frac{C_h}{4C}}{1+\frac{C_e}{6C}+\frac{C_h}{12C}} \tag{2.23}$$

โดยที่ $C = C/n$; $C_e = nC_e$; $C_h = nC_h$; $n >> 1$

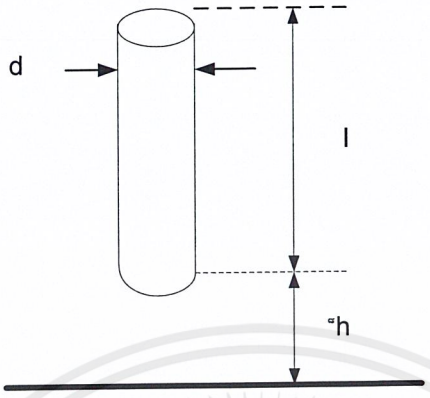
เนื่องจาก C_h มีค่าน้อยกว่า C_e มาก ดังนั้น C_{eq} จึงมีค่าน้อยกว่า C เสมอ และถ้าให้ $C_h = 0$ จะสามารถประมาณ C_{eq} ได้เป็น

$$C_{eq} = C\frac{1}{1+\frac{C_e}{6C}} \tag{2.24}$$

$$C_e = C(1-\frac{C_e}{6C}) \tag{2.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ C_e สามารถหาได้จากการคำนวณ [2] โดยสมมติให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นท่อโลหะทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบดังภาพสเกตในรูปที่ 2.10 ซึ่งสมาการที่ใช้หาค่าเก็บประจุคือ



รูปที่ 2.10 ภาพสเกตของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ

$$C_e = \frac{2\pi\pi\varepsilon}{\ln(\frac{2l}{d}\sqrt{\frac{4h+l}{4h+3l}})} \qquad (2.26)$$

เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าตัว C_h และ C_e ได้โดยตรงดังนั้น การวัดค่าเก็บประจุภาคแรงสูงควรจะวัดในตำแหน่งที่โวลเตจดิไวเดอร์ใช้งานจริง สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุหรือแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ค่าความเก็บประจุภาคแรงสูงอาจวัดได้โดยใช้ Schering bridge หรือ transformer ratio-arm bridge โดยไม่แนะนำให้ใช้ RLC bridge แรงต่ำเพราะสายวัดและค่าเก็บประจุสเตรย์จะถูกรวมเข้าไปในการวัด ซึ่งทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ได้ผิดพลาด นอกจากนี้ ค่าเก็บประจุของเคเบิ้ลวัดยังมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ซึ่งต้องนำมาคิดด้วย

2.5 โวลเตจดิไวเดอร์แบบต่าง ๆ

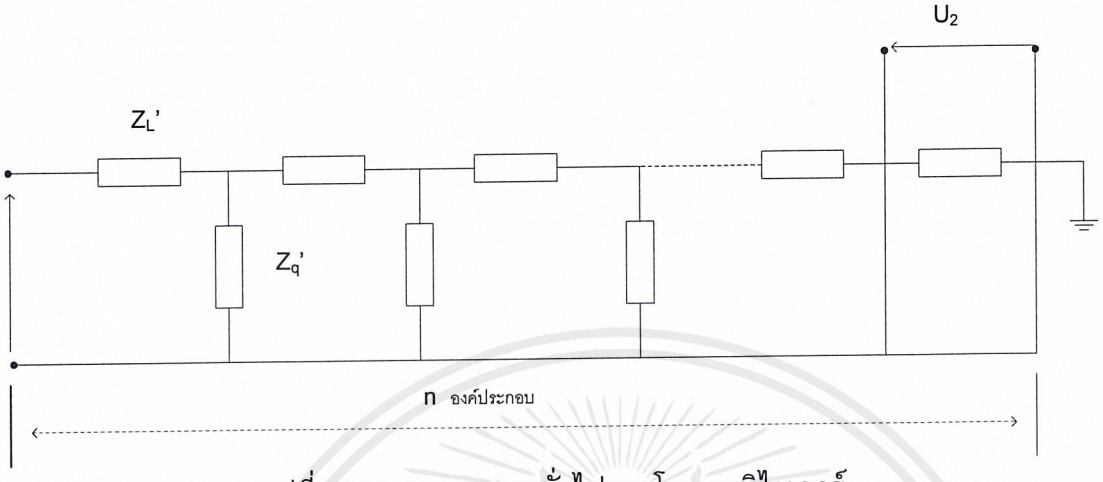
โวลเตจดิไวเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งของระบบวัด การออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องคำนึงถึงระดับแรงดันใช้งาน ชนิดของแรงดัน และค่าอิมพิแดนซ์ขาเข้า โวลเตจดิไวเดอร์ทั่วไปจะประกอบสร้างจากความต้านทานหรือตัวเก็บประจุหรือแบบผสมองค์ประกอบเหล่านี้จะติดตั้งอยู่ในกระบอกฉนวน ซึ่งความสูงจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของแรงดันที่ใช้งาน ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะใช้ระยะวาบไฟตามผิวหรือระยะฉนวน โดยเลือกใช้ระยะอาร์กตามผิวฉนวนเฉพาะ 2 ถึง 2.5 m/MV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.5.1 วงจรสมมูลทั่วไป

วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์จะประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยต่อกันในลักษณะเป็นลูกโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์

โดยองค์ประกอบย่อย Z_L จะแทนองค์ประกอบที่ต้องการสร้าง ซึ่งอาจเป็นค่าความต้ายาน R หรือค่าเก็บประจุ C หรือทั้งสองอย่าง ส่วนองค์ประกอบย่อย Z_q จะแทนค่าเก็บประจุสเตรย์ลงดิน C_e ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งค่าอิมพิแดนซ์รวมทั้งหมดสามารถหาได้จาก

$$ZL = \sum Z_L = nZL \tag{2.27}$$

$$Zq = \sum \left(\frac{1}{Z_q}\right)^{-1} = \frac{Z_q}{n} \tag{2.28}$$

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนหนึ่งหน่วยสามารถเขียนได้เป็น

$$h(s) = \frac{n.U_2}{U} = n\frac{\sinh\frac{1}{n}\sqrt{Z_1(s)/Z_q(s)}}{\sinh\sqrt{Z_1(s)/Z_q(s)}} \tag{2.29}$$

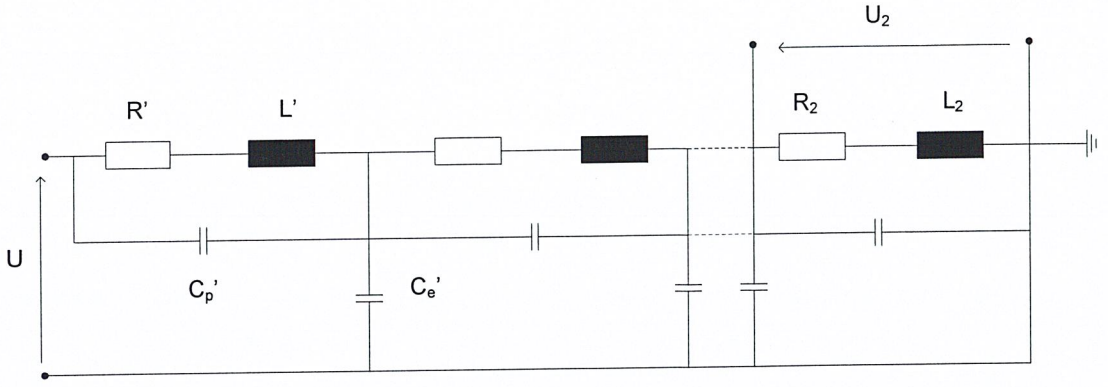
และผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยหาได้จาก

$$g(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s}h(s)\right] \tag{2.30}$$

2.5.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

รูปที่ 2.12 แสดงวงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยประกอบด้วยค่าความเหนี่ยวนำ L' ของค่าความต้านทาน R' ต่อขนานกับค่าเก็บประจุ C_p'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
104190



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

จากวงจรสมมูล สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ได้เป็น

$$h(s) = n\frac{\sinh\frac{1}{n}\sqrt{\frac{(R+sL).sC_e}{1+(R+sL).sC_p}}}{\sinh\sqrt{\frac{(R+sL)}{1+(R+sL).sC_p}}} \tag{2.31}$$

และจากสมการ 2.22 จะสามารถหาผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ได้เป็น

$$g(t) = 1 + 2e^{-at}\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k \frac{\cosh(b_k t)+\frac{a}{b_k}\sinh(b_k t)}{1+\frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2} \tag{2.32}$$

โดยที่ $a = R/2L$

$$b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2\pi^2}{LC_e[1+(\frac{C_p}{C_e})k^2\pi^2]}}$$

ในกรณีที่ค่าความต้านทานมีค่าสูงพอที่จะทำให้ค่า L/R มีค่าน้อยมากๆและ $C_p << C_e$ ซึ่งสามารถที่จะละผลของ L และ C_p ได้ดังนั้น จึงสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนหนึ่งได้เป็น

$$h(s) = n\frac{\sinh\frac{1}{n}\sqrt{sRC_e}}{\sinh\sqrt{sRC_e}} \tag{2.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ (2.20) จะสามารถหาผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยได้เป็น

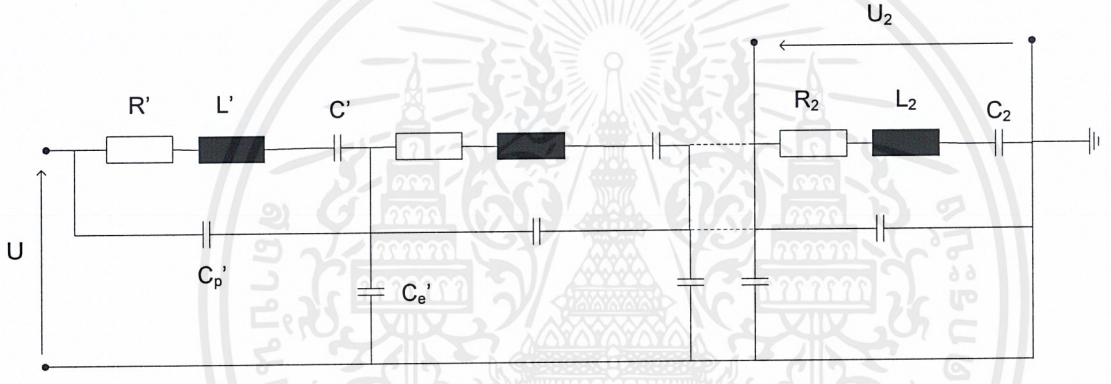
$$g(t) = 1 + \sum_{k=1}^{\alpha} (-1)^k \exp\left(-\frac{k^2\pi^2}{RC_e} t \right) \tag{2.34}$$

เวลาตอบสนองสามารถคำนวณได้โดยแทนค่า h(s) ลงในสมการ (2.13) ซึ่งจะได้ผลเป็น

$$T_N = \frac{RC_e}{6} \tag{2.35}$$

2.5.3 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุสามารถหาได้ในทำนองเดียวกับโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.13 ซึ่งตัวเก็บประจุถูกแทนด้วยค่าเก็บประจุ C' และค่าความเหนี่ยวนำ L' ส่วนค่าความต้านทาน R' ที่ต่ออนุกรมอยู่เป็นการแทนตัวประกอบความสูญเสียในตัวเก็บประจุหรืออาจเป็นความต้านทานที่ต่ออนุกรมเข้าไปจริง



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ดังนั้น ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยสามารถเขียนได้เป็น

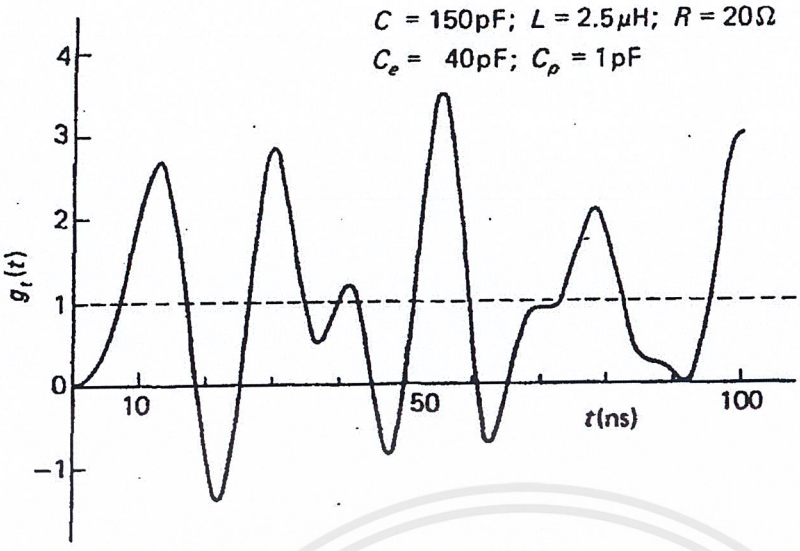
$$g(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C + C_p)} + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k}\sinh(b_k t)}{AB} \tag{2.36}$$

โดยที่ $A = \left(1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2} \right)$, $a = R/2L$

$B = \left(1 + \frac{C_p k^2\pi^2}{C_2} \right)$, $b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2\pi^2}{LC_e[1 + (C_p/C_e)k^2\pi^2]}}$

ตัวประกอบความสูญเสีย $\tan\delta = \omega R'C' = \omega RC$ สามารถหาได้จากการวัดซึ่งเมื่อแทนลงไปในสมการ (2.30) จะได้ผลตอบสนองรูปขั้นดังแสดงในรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



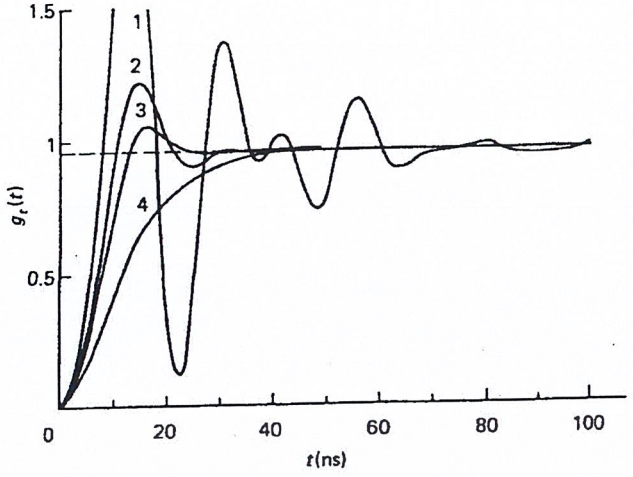
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณ

การแกว่งที่เกิดขึ้นในผลตอบสนองรูปขั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาคลื่นเดินทาง $\tau = \sqrt{LC_e}$ ในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความเร็วแสงโดยความถี่ของการแกว่งสามารถหาได้จาก

$$f = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2\sqrt{LC_e}} \qquad (2.37)$$

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความไวต่อแรงดันขาเข้าที่มีเวลาขึ้นเร็วๆ และแรงดันขาออกจะเกิดแกว่งอย่างมาก ซึ่งเมื่อต่อเข้าระบบวัดจะเกิดการเรโซแนนซ์กับสายนำทำให้ระบบวัดเกิดการแกว่งดังนั้น โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ถ้าความต้านทานมีค่าไม่สูงจนเกินไปแต่เพียงพอที่จะหน่วงการแกว่ง จะได้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดี ดังแสดงในรูปที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$C = 150\,pF;\quad L = 2.5\,\mu H;\; C_e = 40\,pF;\; C_p = 1pF$

(1) $R = 250\Omega$

(2) $R = 750\Omega$

(3) $R = 1000\Omega$ $\qquad 4\sqrt{\frac{L}{Ce}} = 1000\Omega$

(4) $R = 2000\Omega$

รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปจะได้ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสมมีค่าเป็น

$$R \approx 4\sqrt{\frac{L}{C_e}} \tag{2.38}$$

และเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์สามารถคำนวณได้เป็น

$$T_N = \frac{RC_e}{6} \tag{2.39}$$

จากสมการ (2.33) จะเห็นได้ว่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดิโวเดอร์แบบนี้จะเร็วมาก เนื่องจากความต้านทานหน่วงที่มีค่าต่ำ นอกจากนี้ ความต้านทานหน่วงก็จะไม่โหลดมาก เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านโวลเตจดิไวเดอร์เกิดจากแรงดันทรานเซียนขาเข้าเท่านั้น

ในกรณีที่ต้องการวัดเพียงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม สามารถปรับปรุงผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ได้โดยการใส่ความต้านทานหน่วงภายนอก ซึ่งค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์จะขึ้นกับค่าคงตัวเวลา R_dC โดยที่ C คือค่าเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งค่าคงตัวเวลานี้ไม่ควรมีค่าเกิน 150 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

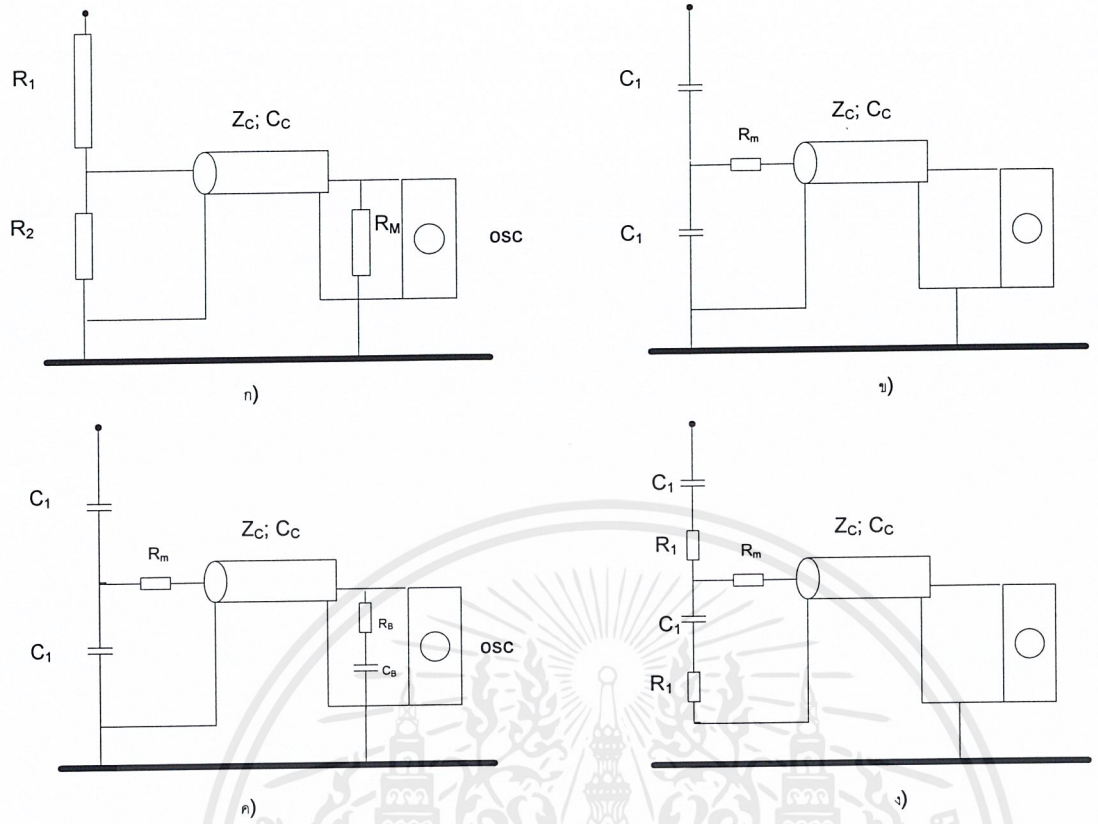
2.6 การต่อแมทชิ่งภาคแรงต่ำของระบบวัด

ในการวัดแรงดันทรานเซียนต์ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดิไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์อาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันได้ ในที่นี้ จะพิจารณาการต่อแมทชิงอินพิแดนซ์เพื่อส่งผ่านแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดิไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด

โดยที่เคเบิลวัดจะพิจารณาเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสีย ดังนั้น ค่าเสิร์จอินพีแดนซ์ $Z_c = \sqrt{L_c/C_c}$ จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และเวลาคลื่นเดินทาง $\tau_c = \sqrt{L_c/C_c}$ มีค่าที่แน่นอนสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน การต่อแมทชิ่งสามารถทำให้ง่ายๆโดยการต่อต้านทาน $R_m = Z_c$ ที่ปลายทางของเคเบิลวัด ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อม R_2 และส่งผ่านเคเบิลวัดจะไม่เกิดการผิดเพี้ยนเนื่องจากอิมพิแดนซ์ขาข้าวของเคเบิลวัดคือ $R_m = Z_c$ ค่าความต้านทานนี้จะต่อเข้ากับ R_2 ดังนั้น จึงพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

ในกรณีโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เคเบิลวัดไม่สามารถที่จะต่อแมทชิ่งที่ปลายทางได้ เนื่องจากความต้านทานที่มีค่าต่ำเมื่อต่อขนานเข้ากับ C_2 จะไปโหลดภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์และแรงดันขาออกจะมีขนาดลดลงตามเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการแกว่งของคลื่นเดินทาง เคเบิลวัดจึงควรต่อแมทชิ่งที่ต้นทาง แรงดันที่ตกคร่อม C_2 จะแบ่งครึ่งโดย $R_m = Z_c$ ที่ต้นทางของเคเบิลวัด เมื่อแรงดันที่แบ่งครึ่งนี้เดินทางไปถึงปลายเคเบิลวัด ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรเปิดจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเท่าตัว ดังนั้น แรงดันที่ปรากฏที่เครื่องมือวัดจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_2 เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมาถึงต้นทางที่มี $R_m = Z_c$ ต่ออนุกรมอยู่และ C_2 เสมือนกับลัดวงจร จึงไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลสำหรับการต่อแมทชิ่งสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ
ก) แบบความต้านทาน
ข) แบบตัวเก็บประจุ แมทชิ่งธรรมดา
ค) แบบตัวเก็บประจุ แมทชิ่งชดเชย
ง) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง แมทชิ่งธรรมดา

ในทางปฏิบัติ C_2 มีค่าที่แน่นอนและจะคายประจุในภาระทรานเซียนต์ จากการคำนวณพบว่า ช่วงเวลาการคายประจุมีค่าประมาณ 2 เท่าของเวลาคลื่นเดินทางหลังจากช่วงเวลานี้ ค่าเก็บประจุของเคเบิลวัดจะอัดประจุจนเต็ม จึงทำให้โวลเตจดิไวเดอร์ที่ค่าสเกลแฟกเตอร์ 2 ค่าคือ

$$n_0 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \qquad \text{ที่ t} = 0 \tag{2.40}$$

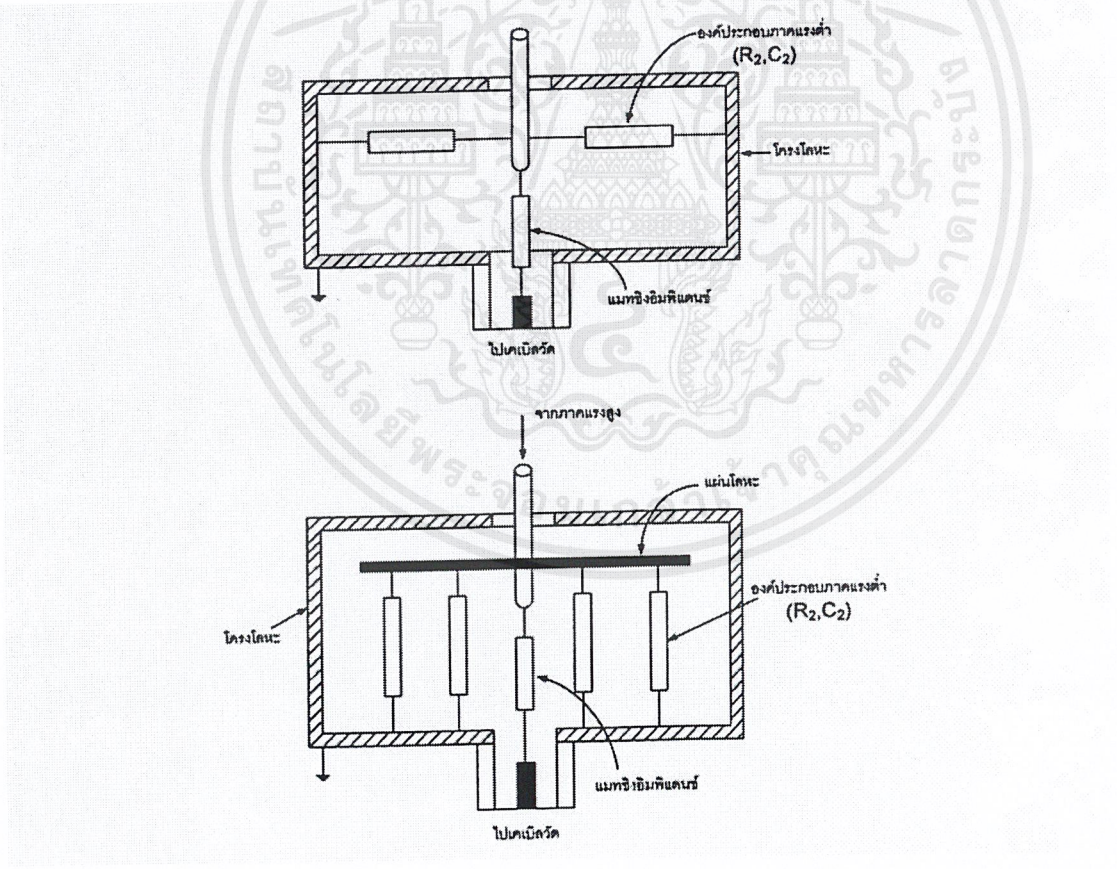
$$n_e = \frac{C_1 + C_2 + C_c}{C_1} \qquad \text{ที่ } t \geq 2\tau_c \tag{2.41}$$

ดังนั้น เคเบิลจึงทำให้เกิดส่วนพุ่งเกิน $\Delta V = (n_e/n_o) - 1 = C_c/(C_1 + C_2)$ ซึ่งอาจละทิ้งผลกระทบส่วนนี้ได้ในกรณีที่เคเบิลวัดมีขนาดสั้นหรือ C_2 มีค่าสูงมากๆอย่างไรก็ตาม การปรับปรุงผลตอบสนองสามารถทำได้โดยการถ่ายโอนตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ C_2 บางส่วนไปยังปลายทางของเคเบิลวัดและต่อตัวเบิลวัดและต่อตัวเก็บประจุนี้อนุกรมกับความต้านทานดังรูปที่ 2.16 ค เทคนิคนี่นำเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Burch ดังนั้น ดังผลสรุปใน[1] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดผลกระทบจากส่วนพุ่งเกินนี้ Burch เสนอให้ใช้ความต้านทานแมทชิ่งทั้ง 2 ตัวมีค่าเท่ากันและเท่ากับเสิร์จอิมพิแดนซ์ นั่นคือ $R_m = R_B = Z_C$ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่เวลาเริ่มต้นและที่เวลาอนันต์มีค่าเดียวกันและส่วนพุ่งเกินลดลงเหลือประมาณ 1/6 ในกรณี เงื่อนไขจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ดังแสดงในรูป 2.16 ง) เนื่องจาก R_2 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ R_1 ค่าความต้านทานแมทชิ่งจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย นั่นคือ วิธีการต่อแมทชิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.16 ค) สามารถนำมาใช้ในกรณีนี้ได้ด้วย

เนื่องจากความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัดเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ดังนั้น จึงควรระวังไม่ให้ทางลงสู่ดินของคลื่นสะท้อนมีค่าความเหนี่ยวนำสูงเกินไป ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ การต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำในลักษณะแกนร่วมเป็นวิธีที่ดีในการประกอบสร้าง รูปที่ 2.17 แสดงภาพสเกตแสดงภาพตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ



รูปที่ 2.17 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ

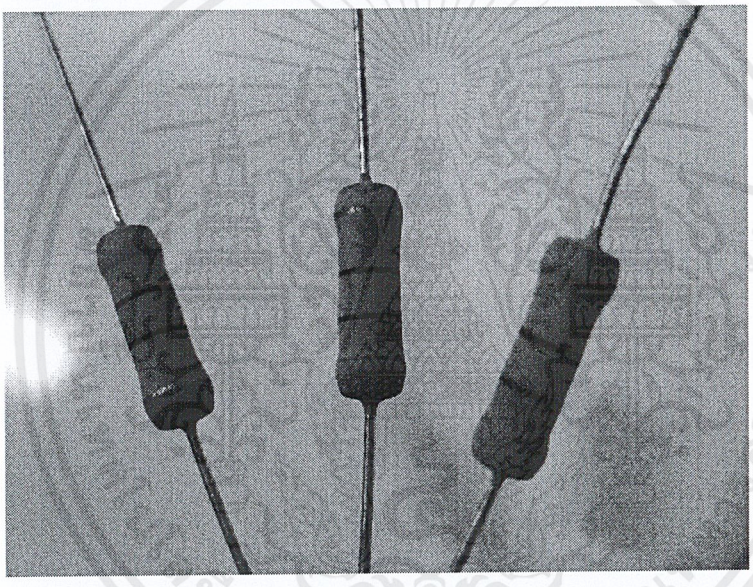
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบการทดลองชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลอง โดยใช้ชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูงซึ่งชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูงออกแบบให้ทนแรงดันได้ 1 kV ในการทดลองนี้จะดูผลการตอบสนองรูปขั้น ในการทดลองจะป้อนแรงดันรูปขั้น **300** V

3.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนฟิล์ม (carbon Film Resister)

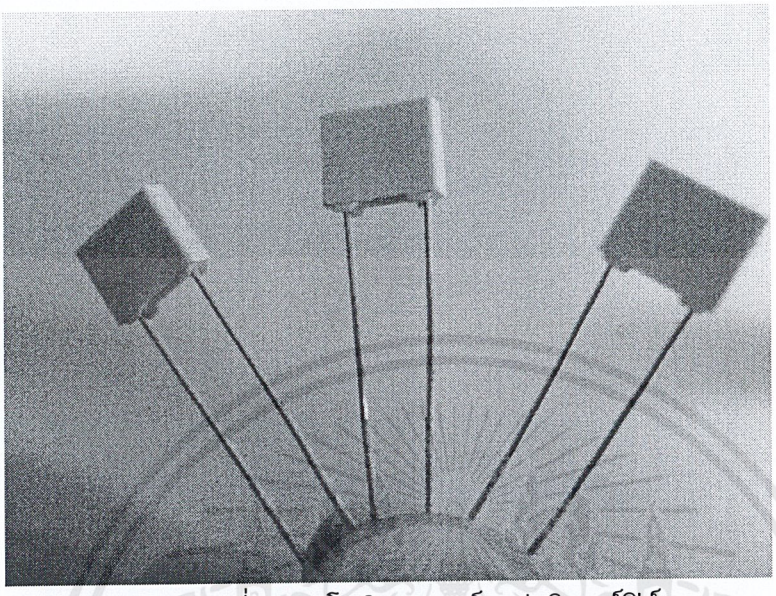


รูปที่ 3.1 ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนฟิล์ม

มีย่านการใช้งานที่ 0.1 Ω ถึง 10 MΩ มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นลบ มีอัตราการทนกำลังไฟฟ้าได้ถึง 10 W ตัวต้านทานชนิดนี้จะสร้างโดยการพ่นฟิล์มให้เป็นแผ่นบาง ๆลงบนเซรามิคทรงกระบอก จากนั้นจึงตัดแผ่นฟิล์มนี้ โดยให้มีส่วนที่เป็นแผ่นฟิล์มคั่นอยู่กับฉนวนที่เป็นเซรามิค ตัวต้านทานชนิด Thermal Film นี้ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมากและยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกได้ดี นอกจากนี้ยังเกิดสัญญาณรบกวนได้น้อย เมื่อเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดโพลิเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ฟิล์ม (Polyester Film Capacitor)



รูปที่ 3.2 โพลิเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ฟิล์ม

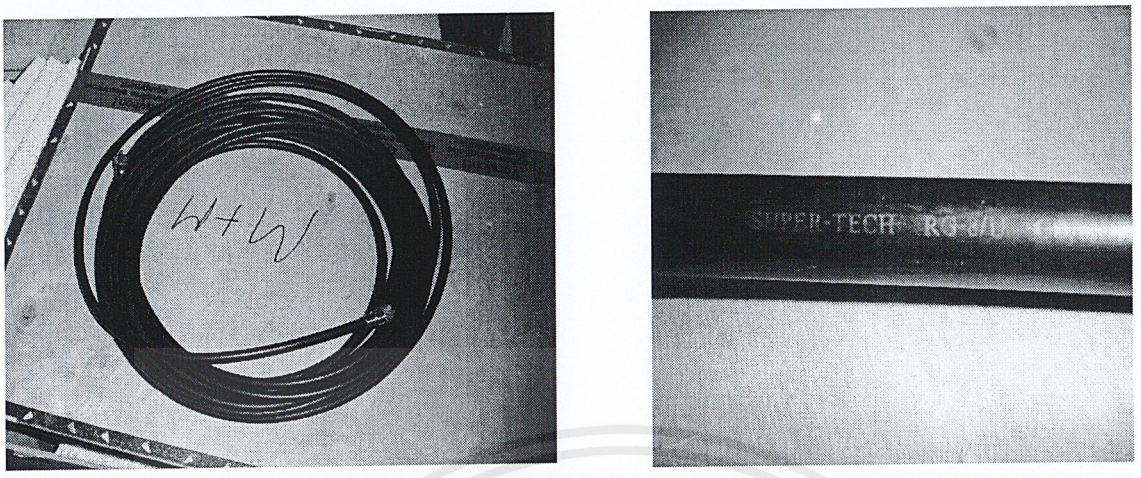
ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบกระดาษมากแต่จะใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งทำมาจากสารหรือวัสดุอื่นโดยจะเรียกชื่อต่างกันตามชนิดสารไดอิเล็กตริก ซึ่งโพลิเอสเตอร์ฟิล์มก็เป็นตัวเก็บประจุแบบฟิล์มแบบหนึ่ง ทางการค้าเรียก MKT มีค่าความจุ 0.001 – 100 μF มีอัตราทนแรงดันได้ถึง 1500 VDC มีเสถียรภาพสูง กระแสรั่วต่ำ และมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ

3.1.3 สายเคเบิล (Cable)

3.1.3.1 RG-8 , RG-8/u

RG-8 , RG-8/u คือ สาย Coaxial Cable ที่ใช้ส่งสัญญาณวิทยุ และนิยมใช้ในงาน computer networks มีค่า impedance เฉพาะ = 50 ohm เส้นผ่านศูนย์กลางสาย = 10.3 มม. ตัวคูณความเร็ว = 0.66 ค่าประจุไฟฟ้า = 96.8 pf/m แรงดันที่ใช้งานสูงสุด 4000V_{rm}

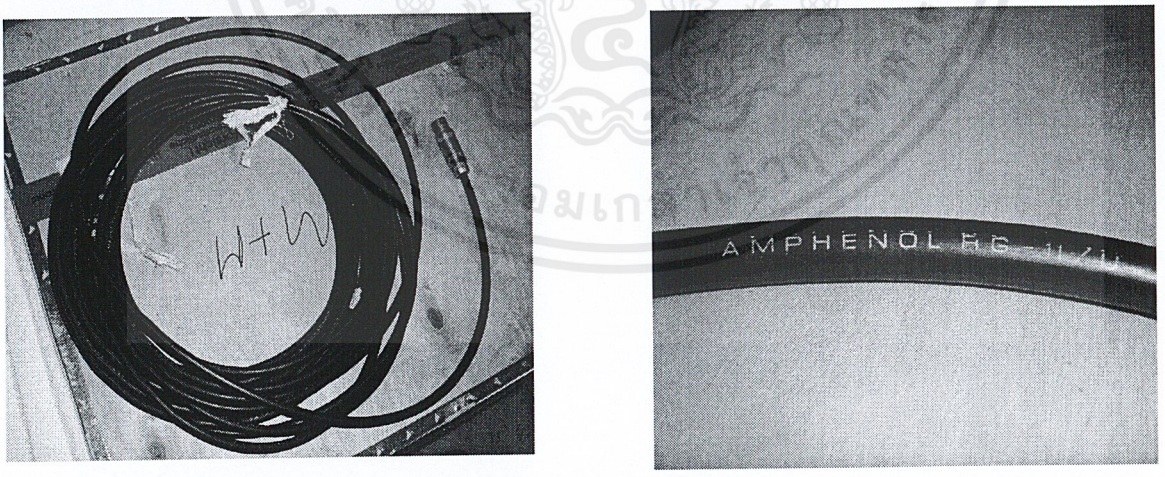
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.3 เคเบิล RG-8

3.1.3.2 RG-11

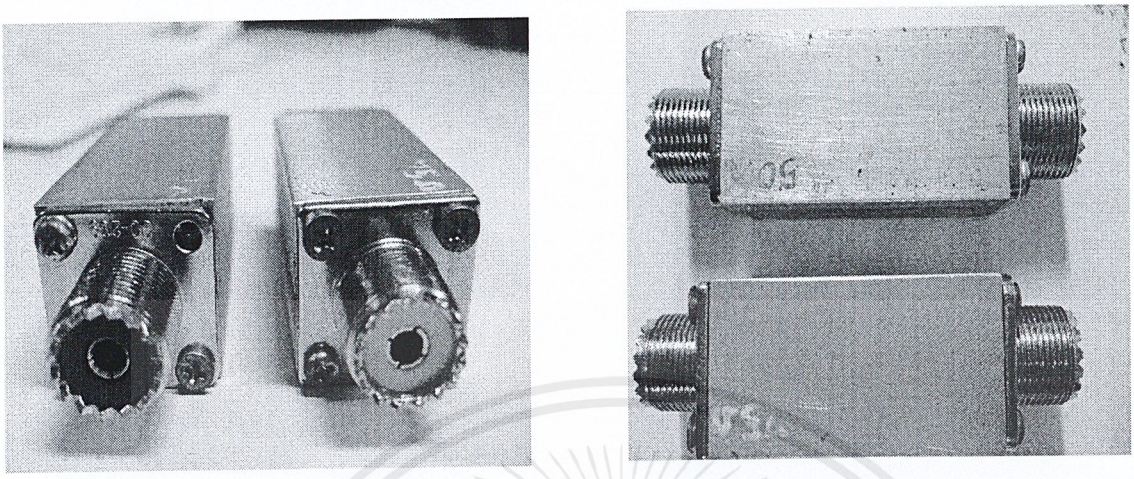
RG-11 คือ สาย Coaxial Cable ซึ่งตัวสายไฟทำจาก copper และใช้ Polyethylene เป็นฉนวน ซึ่งมีค่าการสูญเสียของภาพและเสียงสัญญาณน้อยมาก ผู้ใช้จะนิยมใช้ในงานที่ต้องการคุณภาพสูงในการส่งสัญญาณภาพ มีค่า Impedance เฉพาะ = 75 ohm ตัวคูณความเร็ว = 0.66 ค่าประจุไฟฟ้า = 20.6 pf/ฟุต แรงดันใช้งานสูงสุด = 4000 V_{rms}



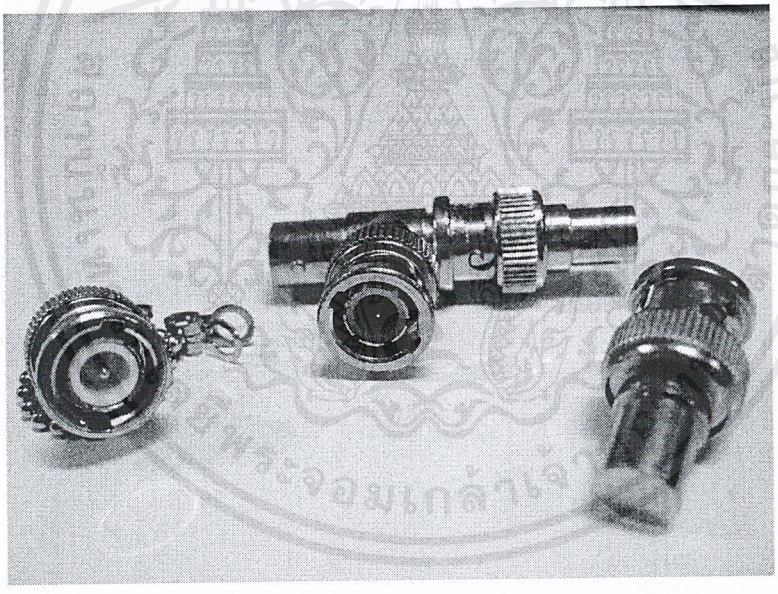
รูป 3.4 เคเบิล RG-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ตัวต้านทานสมคู่ (matching resister)



รูปที่ 3.5 ตัวต้านทานสมคู่ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.6 ตัวต้านทานสมคู่ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวต้านทาน

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 การออกแบบชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูงแบบความต้านทานล้วน

โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน พลังงานสูญเสียในตัวความต้านทานจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้ และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการระบายความร้อนของตัวต้านทาน

ในกรณีโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันกระแสตรง ที่มีการระบายความร้อนในอากาศปกติ กระแสที่สามารถไหลผ่านความต้านทานได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 1-2 mA และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสรั่วตามผิวตัวต้านทาน ซึ่งเกิดจากการที่ตัวต้านทานรับแรงดันสูงโดยปกติ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานไม่ควรน้อยกว่า 0.1 mA ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของความต้านทานภาคแรงสูงจะอยู่ในช่วง 0.5 – 10 MΩ/kV ซึ่งในการออกแบบการทดลองนี้เราเลือกความต้านทานภาคแรงสูง 1 MΩ (R_1 = 1 MΩ) และเลือกใช้อัตราส่วนการลดทอนแรงดัน 1001 : 1 ดังนั้นสามารถหาความต้านทานภาคแรงต่ำได้คือ

$$R_2 = \frac{1M\Omega}{1001-1} = 1\ k\Omega \tag{3.1}$$

เนื่องจากความต้านทานภาคแรงสูงเราจะใช้ความต้านทานต่ออนุกรม 31 ตัว และภาคแรงต่ำใช้ตัวต้านทานต่อขนานกัน 10 ตัว โดยตัวต้านทานที่เลือกใช้เป็นแบบ เทอร์มอลฟิล์ม (Thermal Film Resister) ขนาด 2 วัตต์ เราจะสามารถหาค่าความต้านทานย่อยที่จะนำมาต่อได้คือ

$$R'_1 = \frac{1M\Omega}{31} \approx 30\ k\Omega \tag{3.2}$$

$$R'_2 = 1\ k\Omega \times 10 \approx 10\ k\Omega \tag{3.3}$$

โดย R'_1 คือ ความต้านทานองค์ประกอบย่อยในภาคแรงสูง
R'_2 คือ ความต้านทานองค์ประกอบย่อยในภาคแรงต่ำ

ซึ่งในการทดลองจะศึกษาผลกระทบที่เกิดจากสิ่งต่างๆด้วย ดังนี้

1. ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการที่ระบบมีค่าความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ภาคแรงสูงและแรงต่ำ
2. ศึกษาผลที่เกิดจากการใช้สายเคเบิลที่มีค่าอิมพิแดนซ์ของสายต่างกัน และผลที่จากการต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ

ในทำนองเดียวกัน กรณีโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ก็ควรเลือกให้มีค่าสูง แต่ควรระวังไม่ให้ค่าความต้านทานสูงเกินไปเพราะจะทำให้เวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ช้าเกินไป ทั้งนี้เนื่องจากเวลาตอบสนองแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน ดังสมการ

$$T_N = \frac{RCe}{6} \tag{3.4}$$

จากสมการถ้าใช้ความต้านทานที่สูงจะทำให้โวลเตจดิไวเดอร์ไม่ไวพอที่จะวัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ ค่าความต้านทานที่พอเหมาะจึงมีทั้งขีดจำกัดล่างและขีดจำกัดบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติค่าความต้านทานที่ใช้จะมีค่าอยู่ในช่วง 5 – 20 kΩ โดยในการออกแบบการทดลองนี้เราเลือกค่าความต้านทานภาคแรงสูง 10 kΩ และจากอัตราส่วนแรงดัน 1001 : 1 จะสามารถหาความต้านทานภาคแรงต่ำได้คือ

$$R_2 = \frac{10k\Omega}{1001-1} = 10\ \Omega \tag{3.5}$$

และสามารถหาค่าความต้านทานองค์ประกอบย่อยของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำได้คือ

$$R'_1 = \frac{10k\Omega}{31} \approx 330\ \Omega \tag{3.6}$$

$$R'_2 = 10\ \Omega \times 10 \approx 100\ \Omega \tag{3.7}$$

โดย R'_1 คือ ความต้านทานองค์ประกอบย่อยในภาคแรงสูง

R'_2 คือ ความต้านทานองค์ประกอบย่อยในภาคแรงต่ำ

ในทำนองเดียวกันก็จะศึกษาผลกระทบที่เกิดจากสิ่งต่างๆ เช่นเดียวกับกรณีโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานที่ใช้วัดแรงดันกระแสตรง ค่าต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบทดลองจะนำมาทดลองตามกรณีต่างๆ ดังนี้

1. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-11 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่
2. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด)
3. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-11 ปรับ input impedance ของ oscilloscope เป็น 50 Ω
4. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

6. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)

7. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)

8. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

9. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด)

10. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก)

11. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

12. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)

13. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)

14. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ต่อสายเคเบิลที่มีอิมพิแดนซ์ต่างกัน 2 สาย จาก RG-8 ไป RG-11

15. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
ต่อสายเคเบิลที่มีอิมพิแดนซ์ต่างกัน 2 สาย จาก RG-11 ไป RG-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH

17. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH

18. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH

19. ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH

3.2.2 การออกแบบชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูงชนิดตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นนั้น เป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าเก็บประจุและแรงดันตามที่ต้องการ โดยค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมากพอที่จะทำให้ค่าเก็บประจุสเตรย์มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ควรเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่าๆ กัน มิฉะนั้น อาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์หรือวาบไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจุย่อยได้ ขณะเดียวกัน ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงต้องไม่มากจนทำให้โวลเตจดิไวเดอร์กลายเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดัน เพราะว่าถ้าค่าเก็บประจุภาคแรงสูงมีค่ามากแล้ว ค่าอิมพิแดนซ์ของโวลเตจดิไวเดอร์จะมีค่าต่ำลง จะทำให้เครื่องกำเนิดแรงดันจ่ายกระแสให้กับโวลเตจดิไวเดอร์มากขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด

โดยทั่วไป ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงที่ใช้ในทางปฏิบัติจะนิยมออกแบบให้มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตัวเก็บประจุสเตรย์ หรือ $C_e/6C_1$ มีค่าน้อยกว่า 5 % ซึ่งโดยปกติ C_e จะมีค่าประมาณ 10 pF/m ถึง 15 pF/m ดังนั้นค่าเก็บประจุภาคแรงสูง C_1 จึงควรมีค่าประมาณ30 – 50 pF/m ซึ่งในการทดลองนี้เราเลือกออกแบบค่าเก็บประจุภาคแรงสูง C_1 = 40 pF/m เนื่องจากอัตราส่วนแรงดัน 1001 : 1 สามารถหาค่าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำได้

$$C_2 = (1001 - 1) \times 40\text{pF} \approx 40\text{nF} \qquad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง จะใช้จำนวนตัวเก็บประจุที่ภาคแรงสูงต่ออนุกรมกันจำนวน 27 ตัว และด้านแรงต่ำจะใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกันจำนวน 10 ตัว โดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ฟิล์ม ดังนั้นจะได้ว่า

$$C'_1 = 40\ pF \times 27 \approx 1\ nF \tag{3.9}$$

$$C'_2 = 40\ nF / 10 \approx 3.9\ nF \tag{3.10}$$

โดย C'_1 คือ ตัวเก็บประจุองค์ประกอบย่อยในภาคแรงสูง
C'_2 คือ ตัวเก็บประจุองค์ประกอบย่อยในภาคแรงต่ำ

ในทำนองเดียวกันเพื่อศึกษาผลของขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่าของภาคแรงสูงนอกช่วงที่เหมาะสม คือ 30 – 50 pF จึงทำการทดลองออกแบบโดยเลือกค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 100 pF/m และเนื่องจากอัตราส่วนแรงดัน 1001 : 1 สามารถหาตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำได้

$$C_2 = (1001\text{-}1) \times 100\ pF \approx 100\ nF \tag{3.11}$$

สามารถหาค่าตัวเก็บประจุย่อยของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำได้ คือ

$$C'_1 = 100\ pF \times 27 \approx 2.7\ nF \tag{3.12}$$

$$C'_2 = 100\ nF / 10 \approx 10\ nF \tag{3.13}$$

ในการออกแบบการทดลองจะมีการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากกรณีต่างๆ ด้วย ดังนี้คือ

1. ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการที่ระบบมีความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
2. ศึกษาผลที่เกิดจากการใช้สายเคเบิลนำสัญญาณ ที่มีค่าอิมพิแดนซ์ของสายต่างกันและมีการต่อ ความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ

แต่ทั้งนี้ โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วนมีความไวต่อแรงดันขาเข้าที่เวลาขึ้นเร็วแรงดันขาออกจะออสซิเลทหรือแกว่งมาก ซึ่งเมื่อนำไปต่อเข้ากับระบบวัดจึงเกิดเรโซแนนซ์กับสายตัวนำ ทำให้ระบบวัดแกว่ง การแกว่งหรือออสซิเลชันของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุนี้อาจขจัดได้โดยต่อความต้านทานอันดับย่อย R' เข้ากับตัวเก็บประจุ เรียกว่าความต้านทานหน่วง และเพื่อให้คุณสมบัติการถ่ายโอนของโวลเตจดิไวเดอร์สมบูรณ์และได้ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองรูปขั้นที่ดี จึงต้องต่อความต้านทานกับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำด้วย โดยค่าความต้านทานนี้สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$R_1C_1 = R_2C_2 \tag{3.14}$$

และในกรณีที่ใช้ตัวความต้านทานหน่วงภายนอก (R_d) ด้วย สมการจะเปลี่ยนไปเป็น

$$(R_d + R_1)C_1 = R_2C_2 \tag{3.15}$$

ในการออกแบบการทดลองนี้เราเลือกต่อความต้านทานหน่วงเข้าไปที่ภาคแรงสูงที่ค่าต่างๆ ดังนี้ คือ750 Ω , 5 kΩ ,10 kΩ และจะได้ค่าความต้านทานที่กระจายเข้าไปที่ภาคแรงต่ำ คือ 0.75 Ω , 5Ω และ 10 Ω ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการออกแบบการทดลองจะนำมาทดลองตามกรณีต่างๆ ดังนี้

1. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-11 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่
2. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด)
3. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก)
4. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-8 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่
5. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)
6. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)
7. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว
   ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว
   ใช้สายเคเบิล RG-8 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)

9. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว
ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)

10. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH

11. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH

12. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH

13. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH

14. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μHและภาคแรงต่ำ 1 μH

15. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μHและภาคแรงต่ำ 3 μH

16. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน

17. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบอนุกรม

18. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 10 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 10 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 10 kΩ
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 10 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบอนุกรม

20. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 750 Ω
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 0.75 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน

21. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 750 Ω
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 0.75 Ω
การกระจายความต้านทานเป็นแบบอนุกรม

22. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH

23. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH

24. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH

25. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH

26. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

27. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

28. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

30. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

31. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

32. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

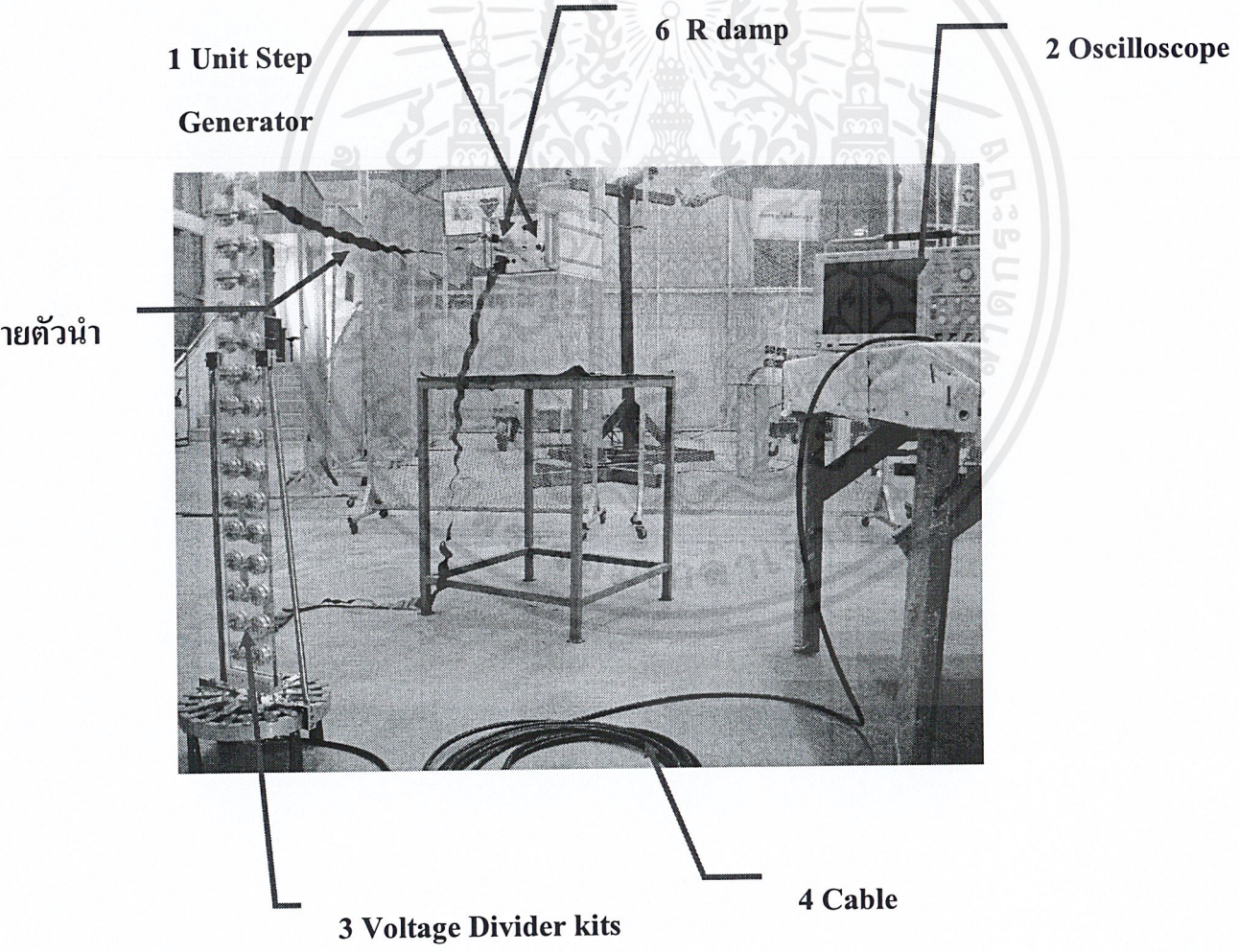
33. ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว
ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH
และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ,แรงต่ำ 5 Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

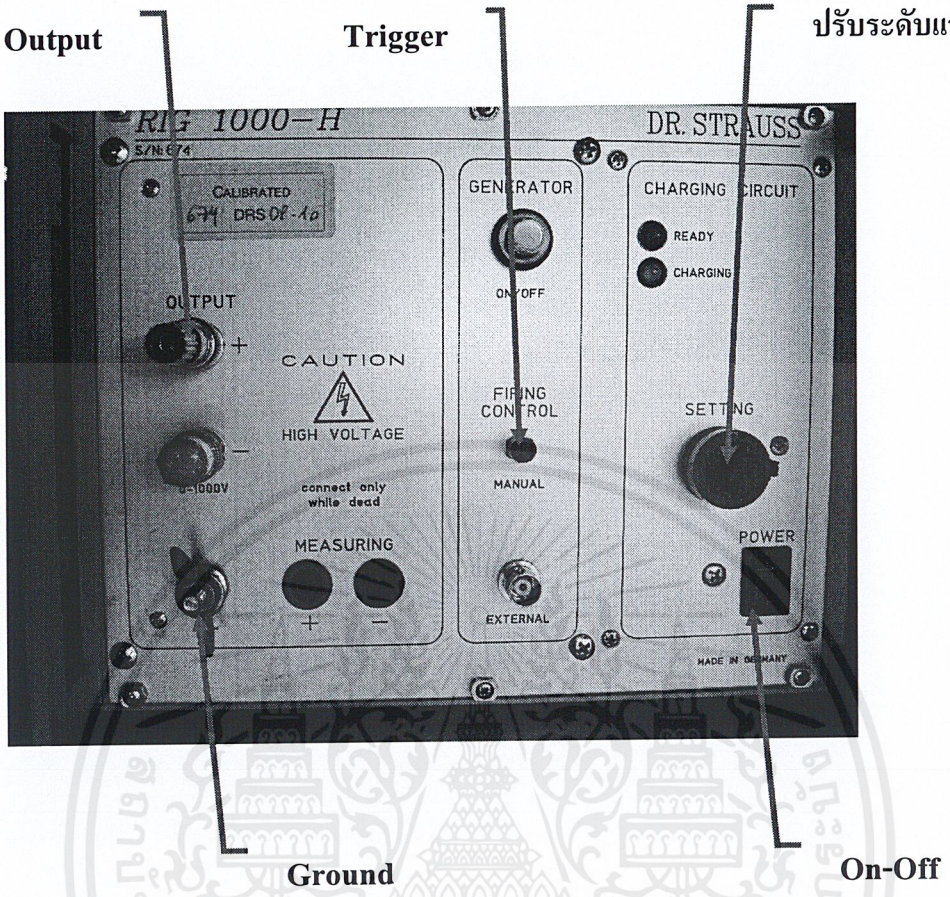
การศึกษาคุณสมบัติของชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง เริ่มต้นจากการต่อวงจรทดลอง ดังรูปที่ โดยจะทำการประกอบชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ที่แตกต่างกันตามกรณีศึกษา ดังรายละเอียดหัวข้อที่ 3.2 หลังจากจัดวงจรทดลองแล้ว ทำการป้อนแรงดันจากชุดกำเนิดแรงดันหนึ่งหน่วย ที่ระดับแรงดัน 300 โวลต์ และปรับค่า input impedance ของ oscilloscope เป็น 1 MΩ

4.1 วงจรการทดลอง



รูป 4.1 วงจรการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



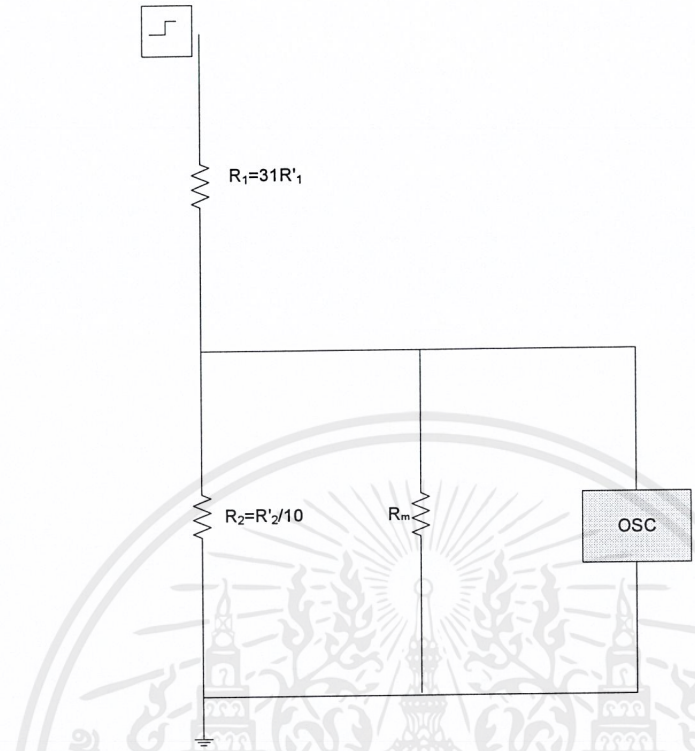
รูป 4.2 Unit Step Generator

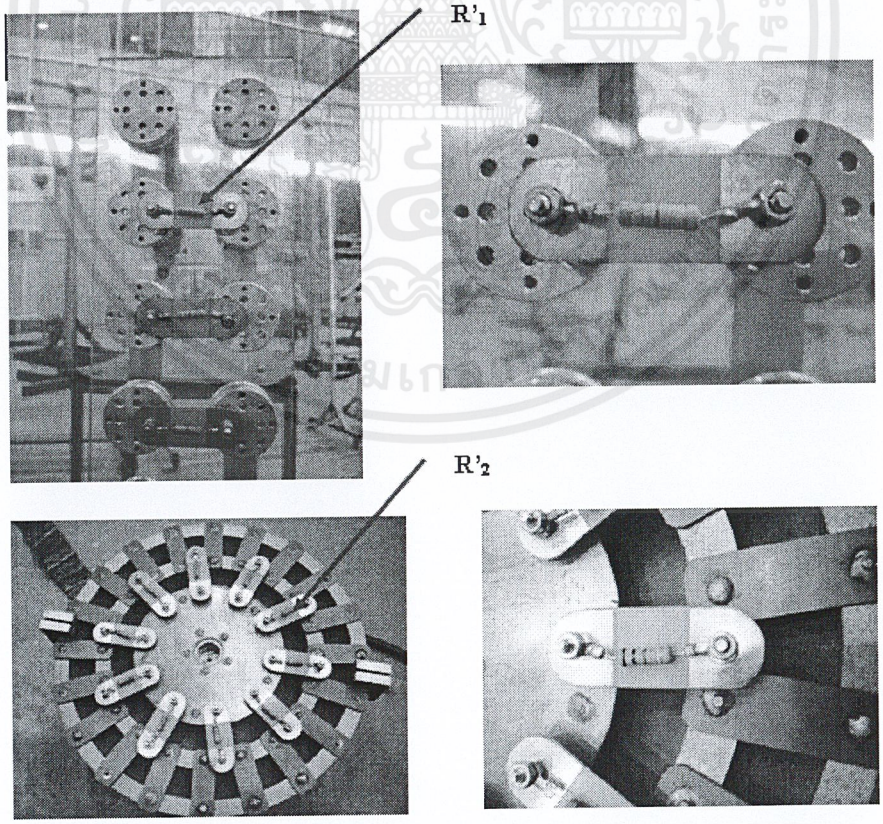
อุปกรณ์การทดลอง

1. Unit Step Generator	1	เครื่อง
2. Oscilloscope	1	เครื่อง
3. ชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง	1	ชุด
4. สายเคเบิลวัด	2	เส้น
5. สายตัวนำแบบแถบทองแดง	3	เส้น
6. ตัวต้านทานสมดู่	4	ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานล้วน

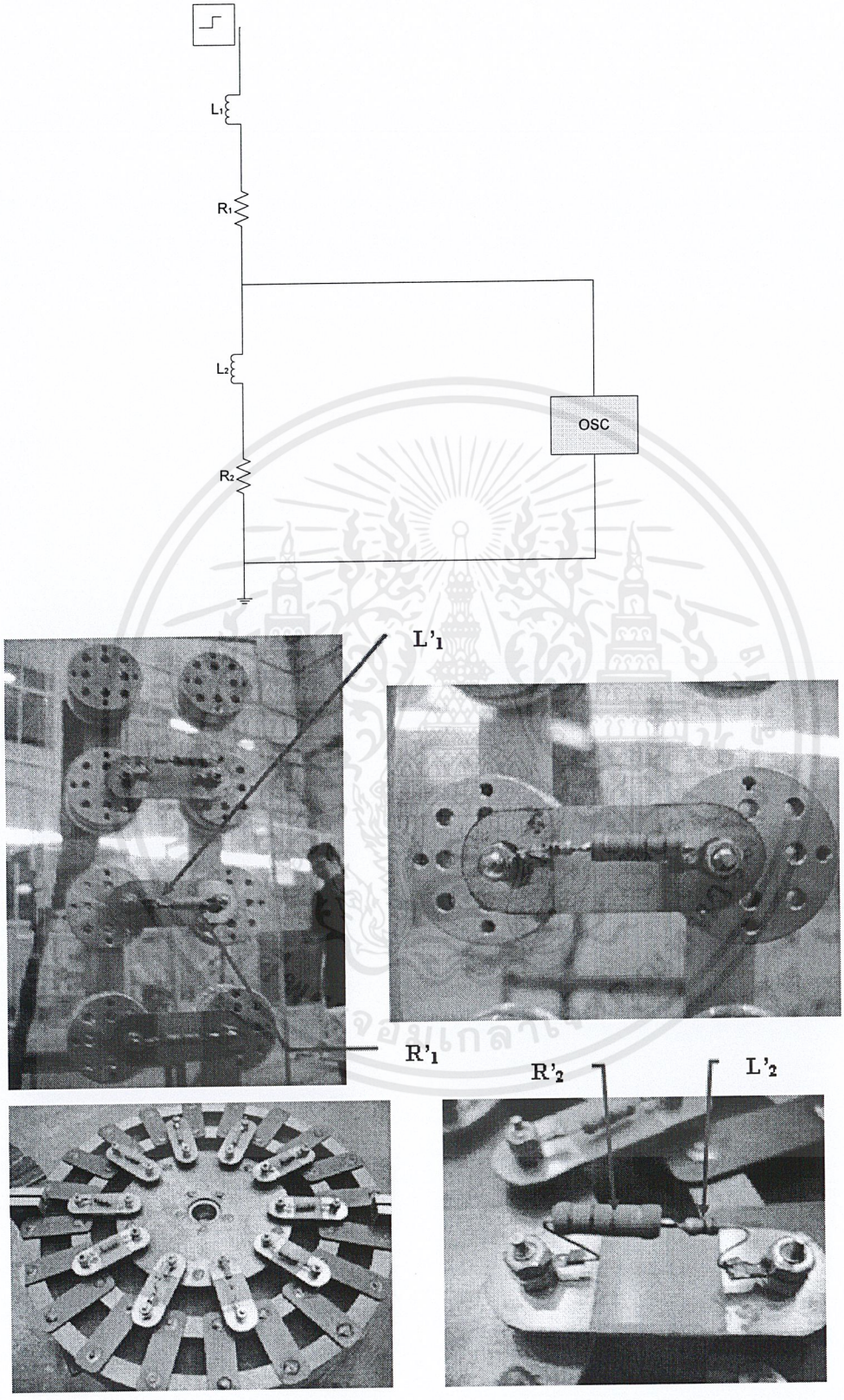




รูป 4.3 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานล้วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

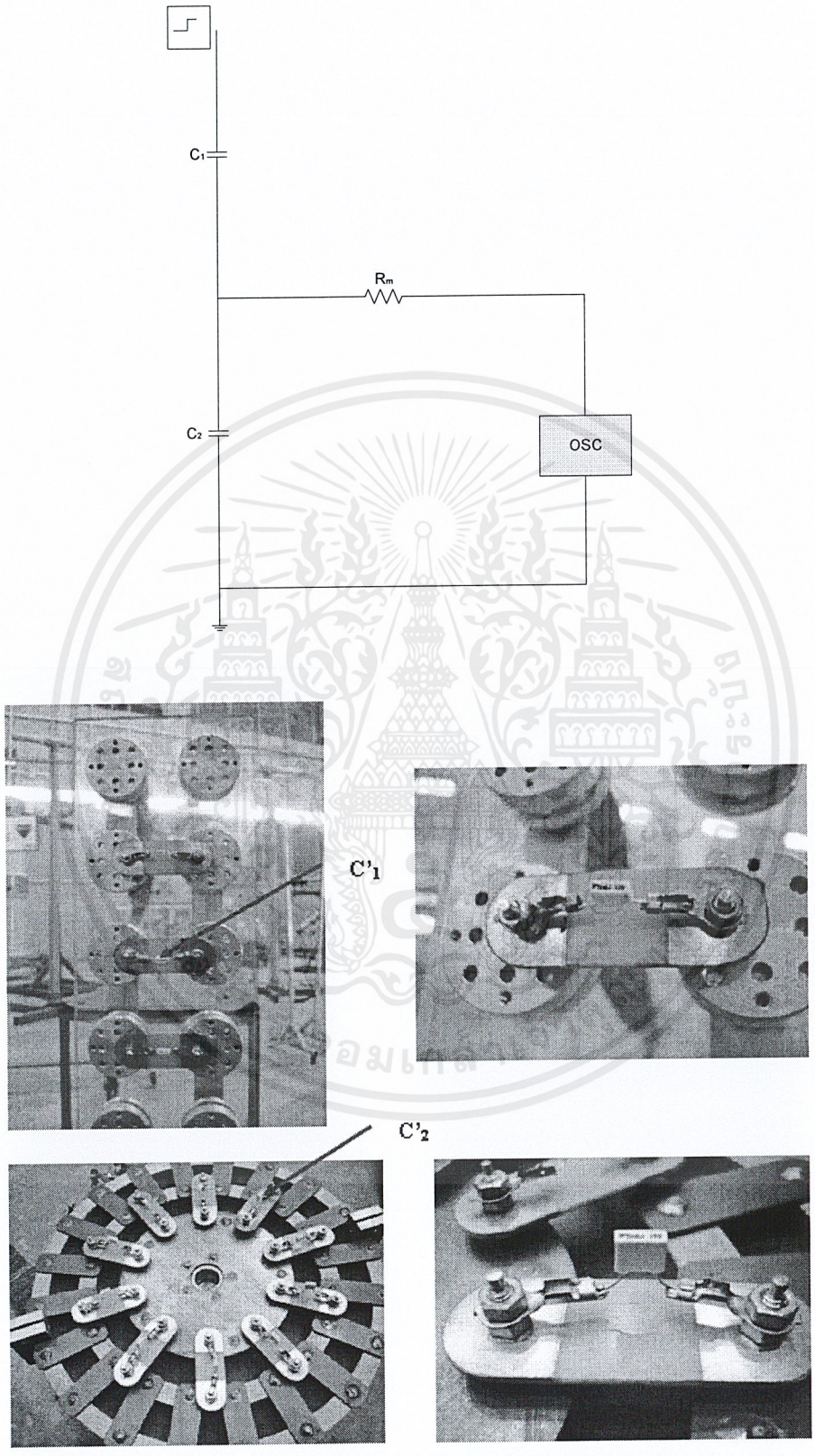
4.1.2 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานและเกิดค่าความเหนี่ยวนำในระบบ



รูป 4.4 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานและเกิดค่าความเหนี่ยวนำในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

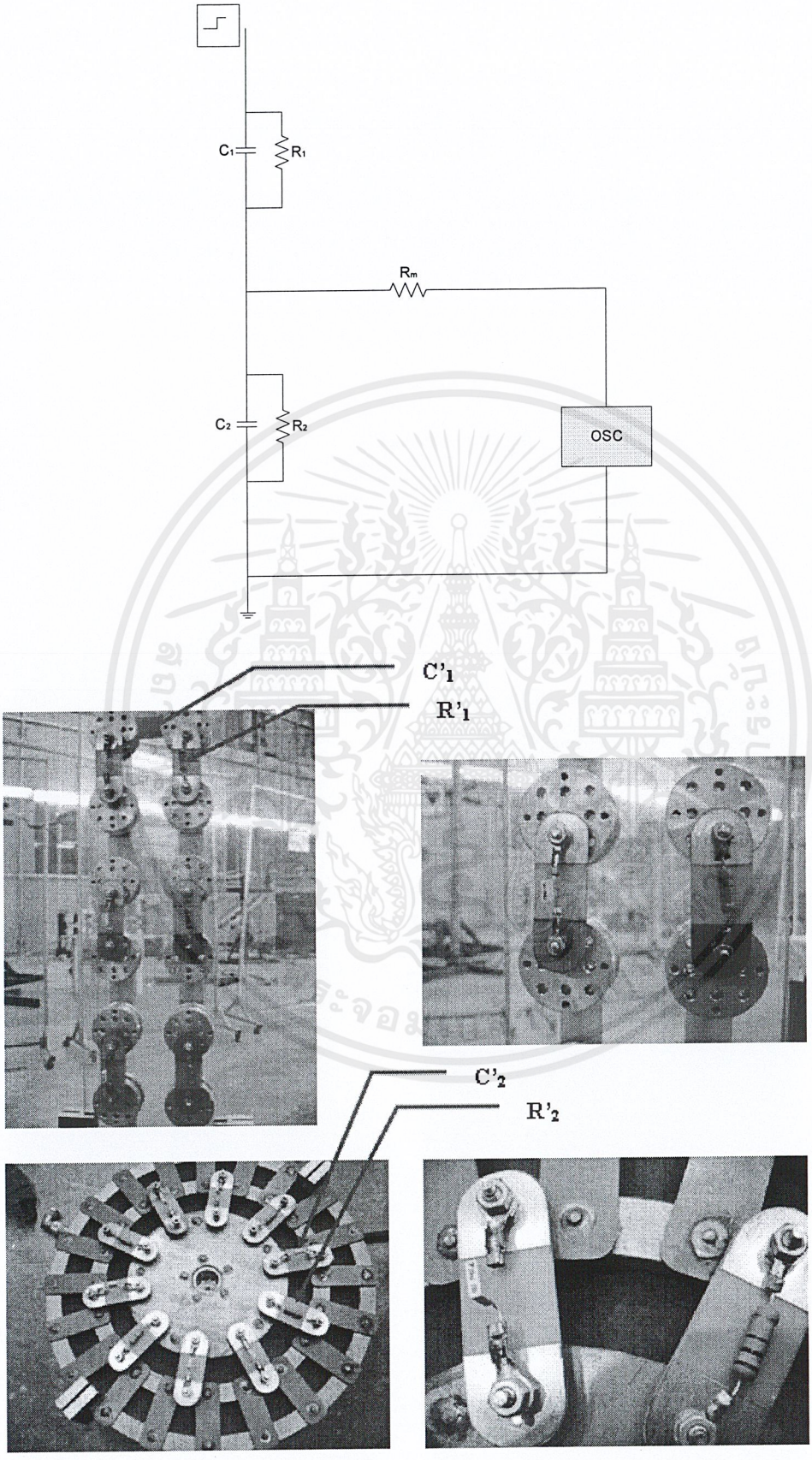
4.1.3 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ



รูป 4.5 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

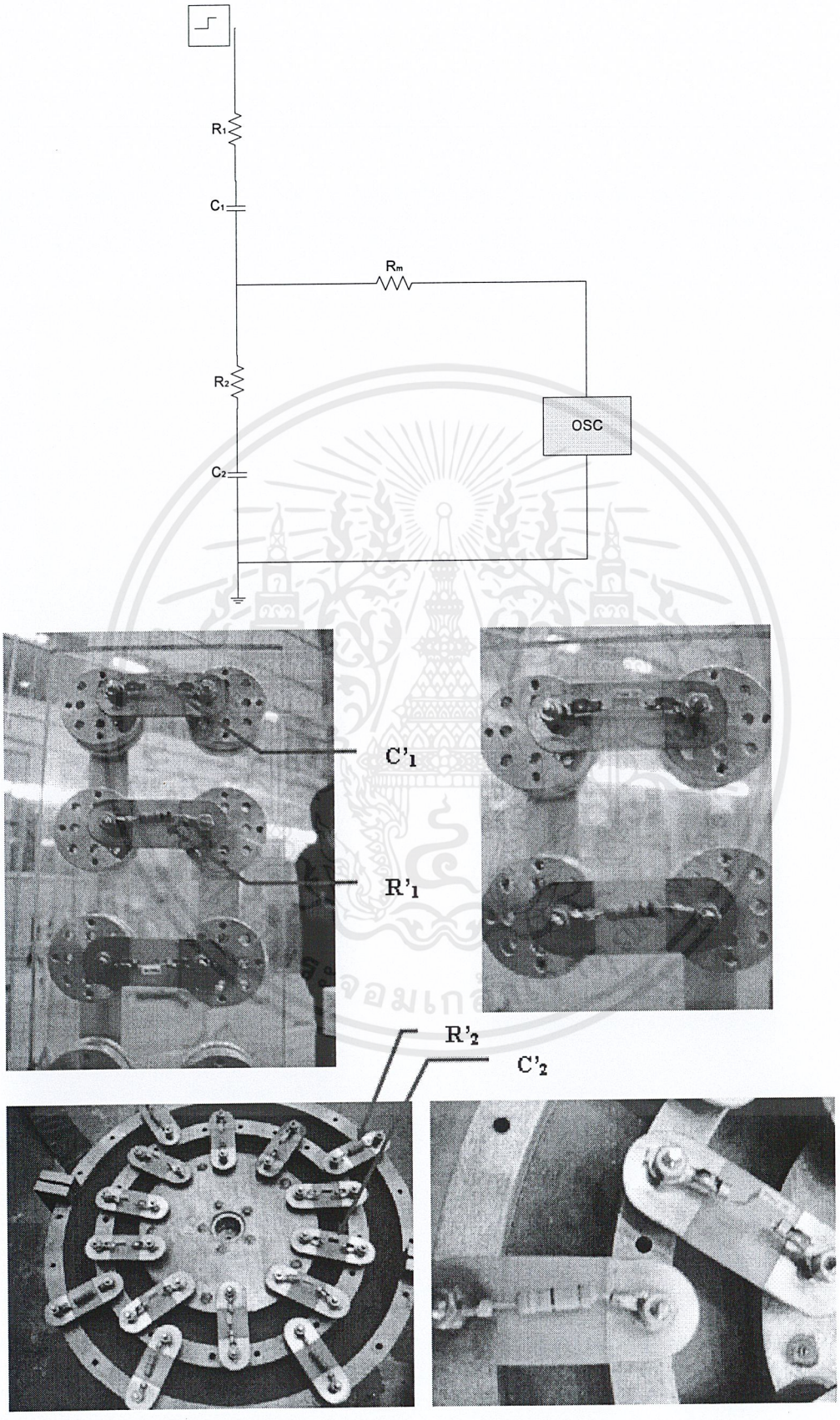
4.1.4 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R แบบขนาน



รูป 4.6 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

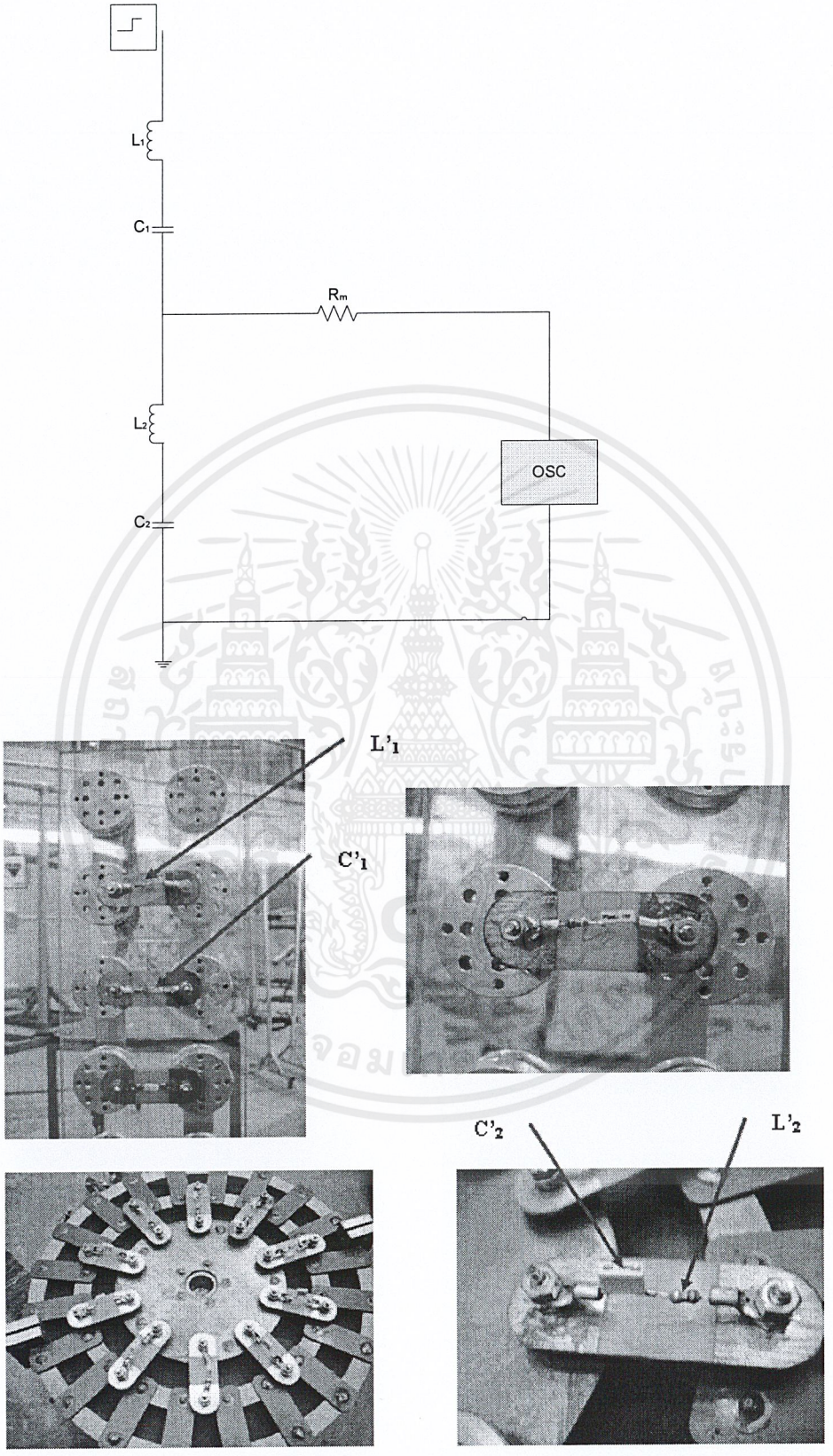
4.1.5 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R แบบอนุกรม



รูป 4.7 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและกระจาย R ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

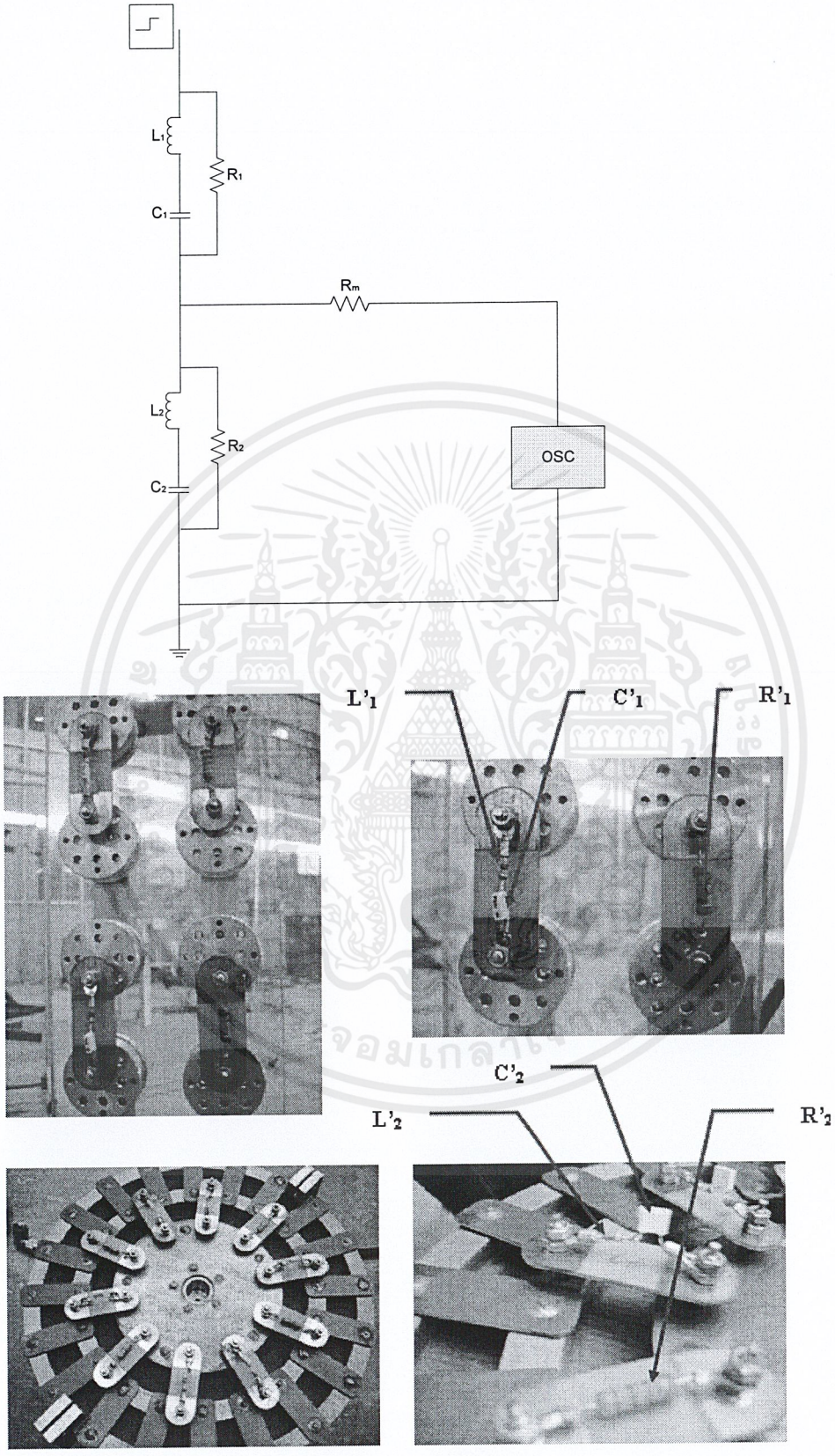
4.1.6 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ



รูป 4.8 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

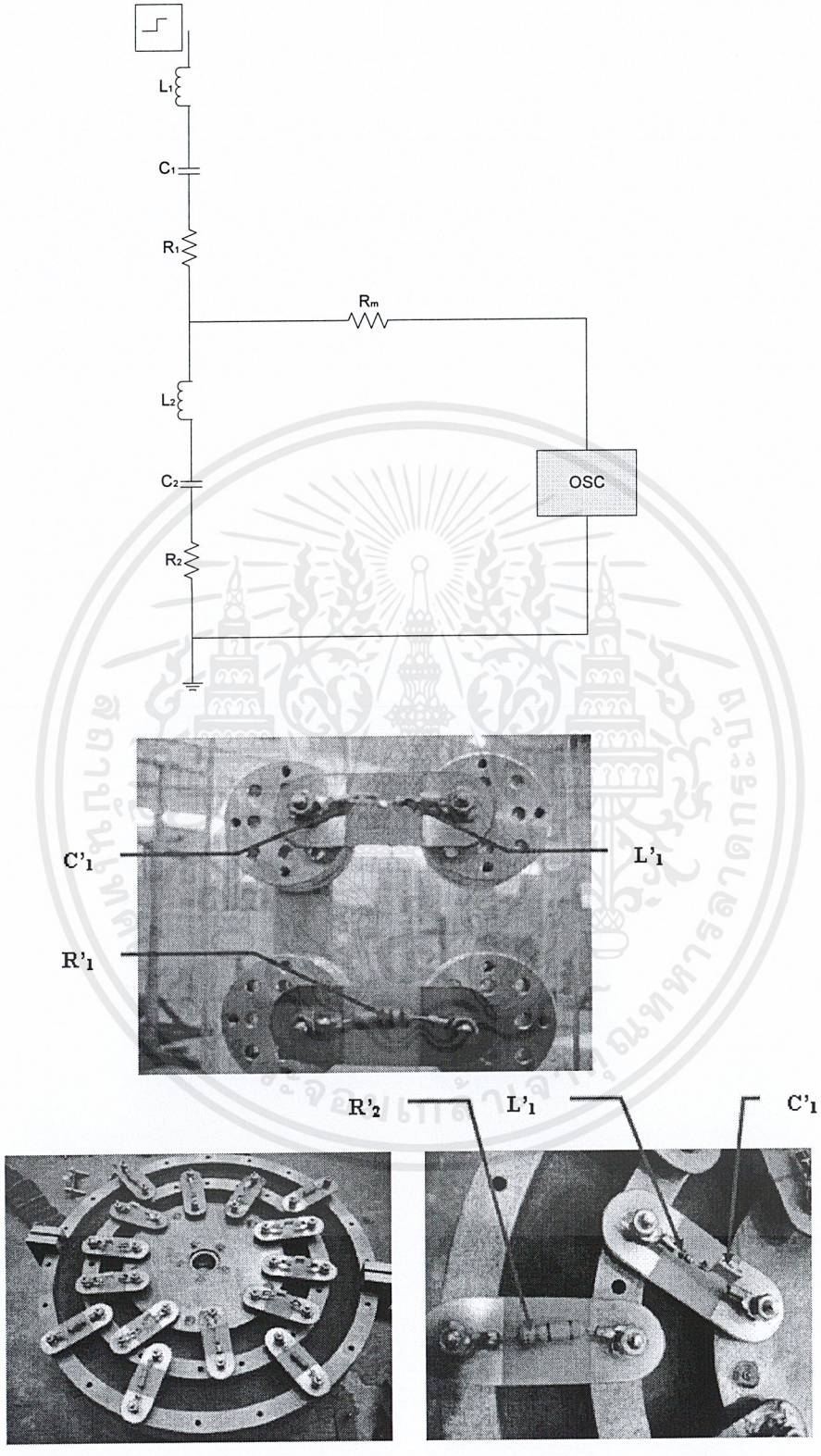
4.1.7 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ กระจาย R ขนาน



รูป 4.9 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ กระจาย R ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8 โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและเกิดค่าความเหนี่ยวนำ กระจาย R อนุกรม



และรูป 4.10 วงจรและองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุเกิดค่าควาเหนี่ยวนำ กระจาย R อนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กราฟผลการทดลองผลตอบสนองรูปขั้น ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่าง ๆ

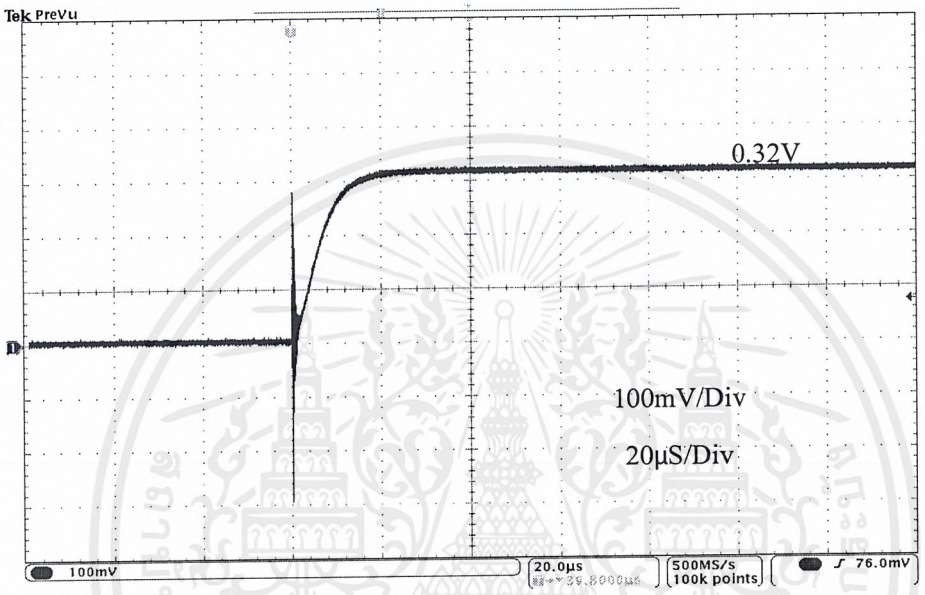
4.2.1 R-divider อัตราส่วนแรงดัน 1001:1

4.2.1.1 เลือก $R_1 \approx 1\ M\Omega$, $R_2 \approx 1\ k\Omega$

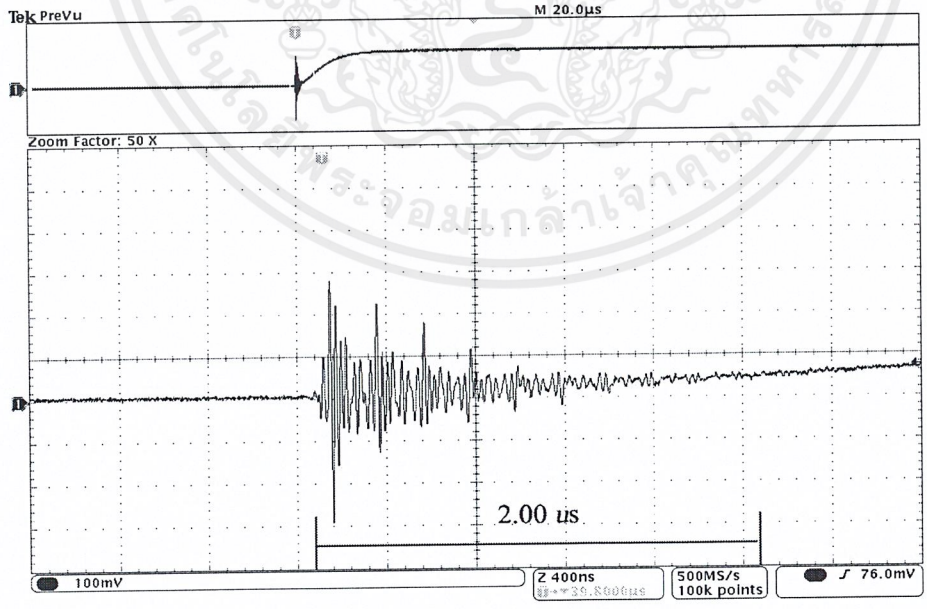
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 $k\Omega$ จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 30 $k\Omega$ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด10 $k\Omega$ จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=10 $k\Omega$ ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11(มีค่า impedance = 75Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400ns/div

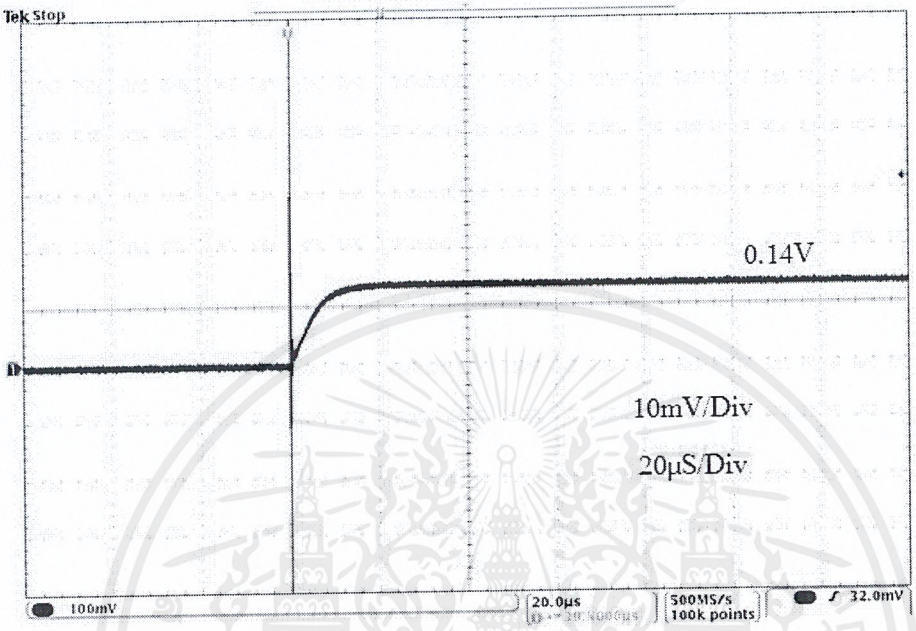
รูปที่ 4.11 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

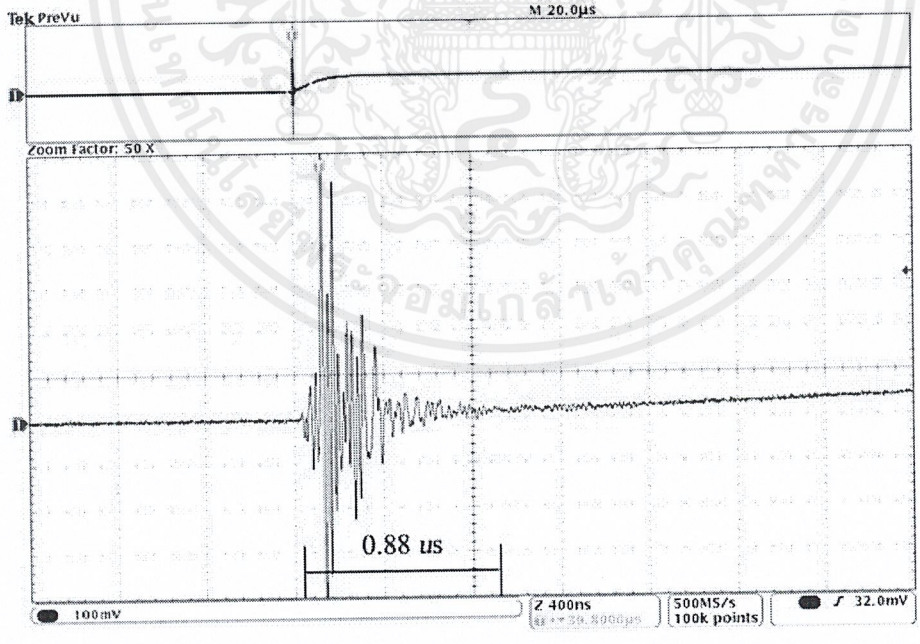
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 30 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=10 kΩ ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400ns/div

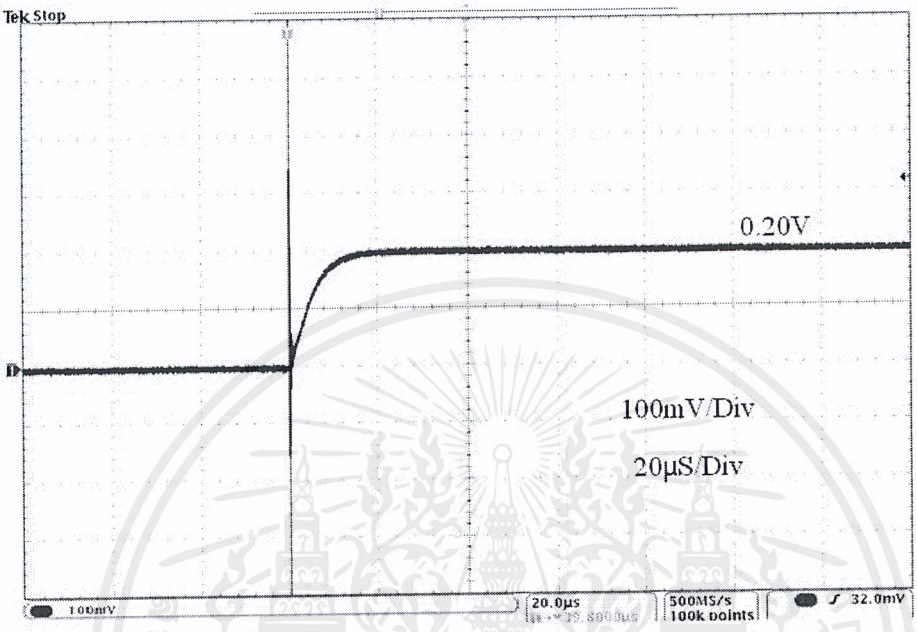
รูปที่ 4.12 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

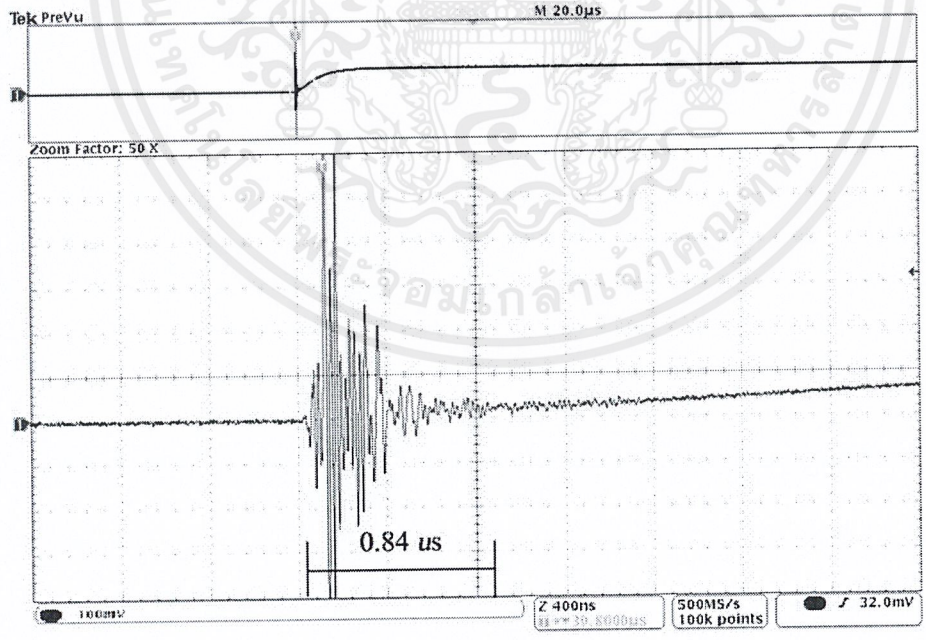
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 30 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=10 kΩ ต่อขนานกัน 10ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400ns/div

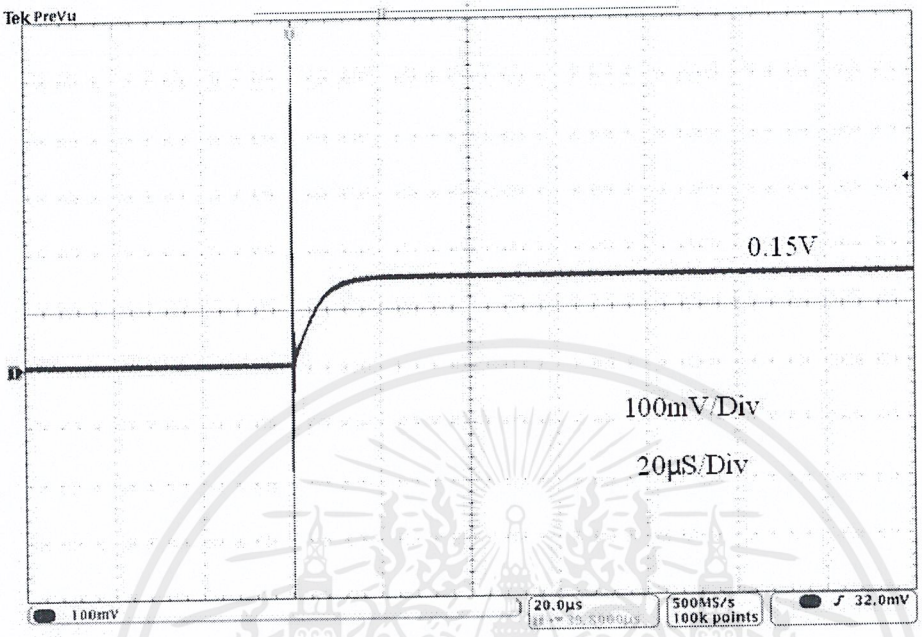
รูปที่ 4.13 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

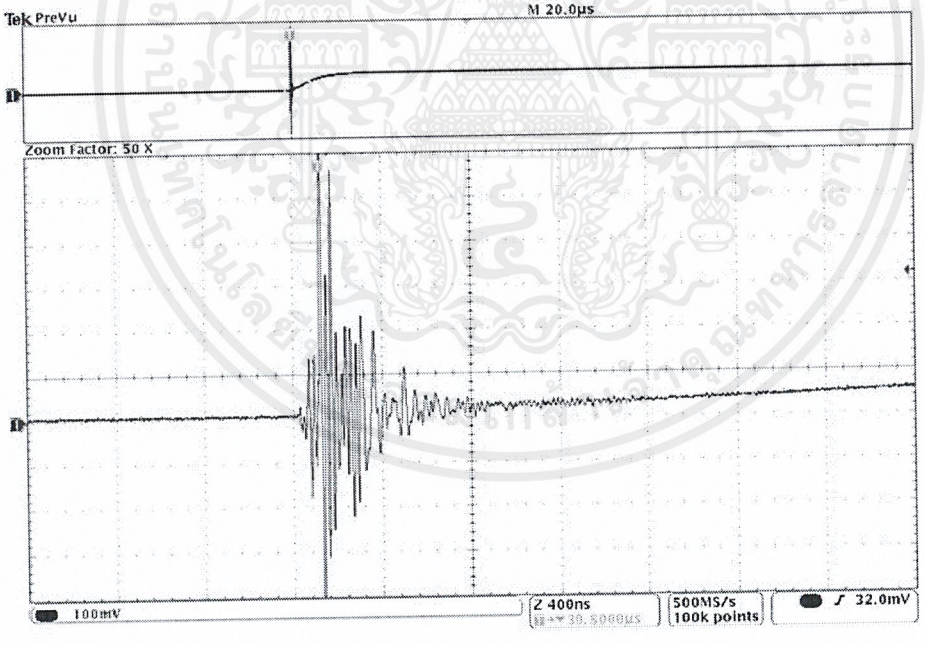
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 30 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=10 kΩ ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11 ปรับ input impedance ของ oscilloscope เป็น 50 Ω



ก) time/div 20 μ s/div

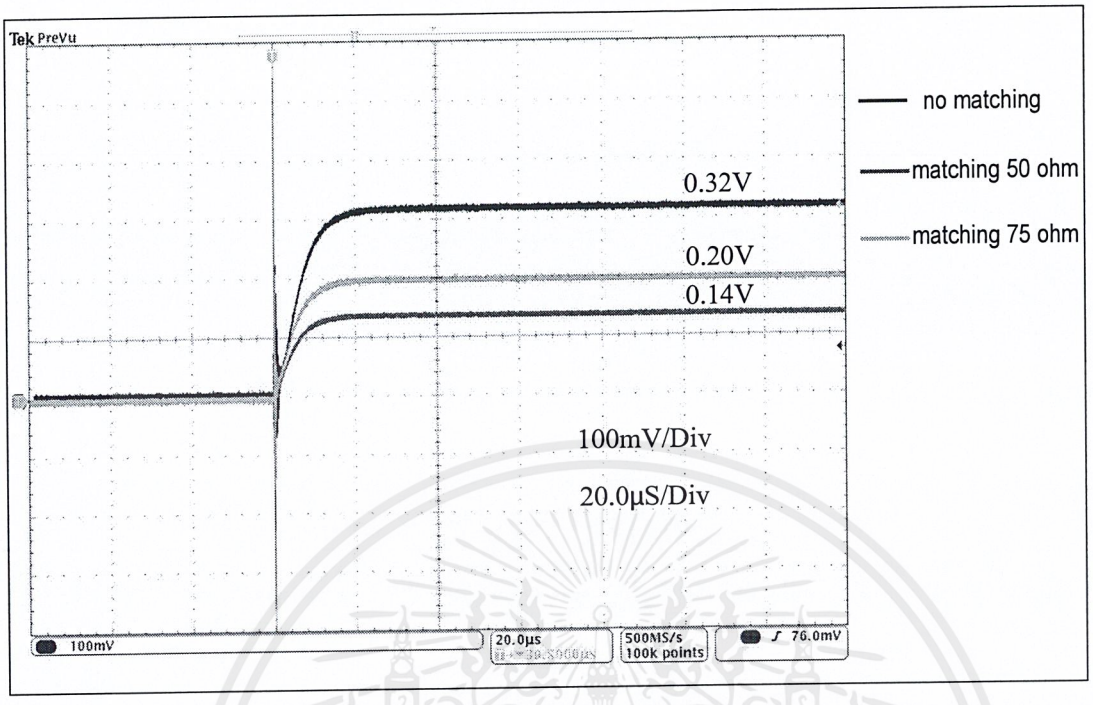


ข) time/div 400ns/div

รูปที่ 4.14 ปรับ input impedance ของ oscilloscope เป็น 50 Ω

- จะเห็นว่า ผลตอบสนองรูปขั้น ของการปรับ input impedance ของ oscilloscope เป็น 50 Ω นั้น มีลักษณะเช่นเดียวกับ การต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω ดังนั้น ถ้าต้องการต่อความต้านทานสม คู่ 50 Ω สามารถใช้การปรับ input impedance ของ oscilloscope แทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



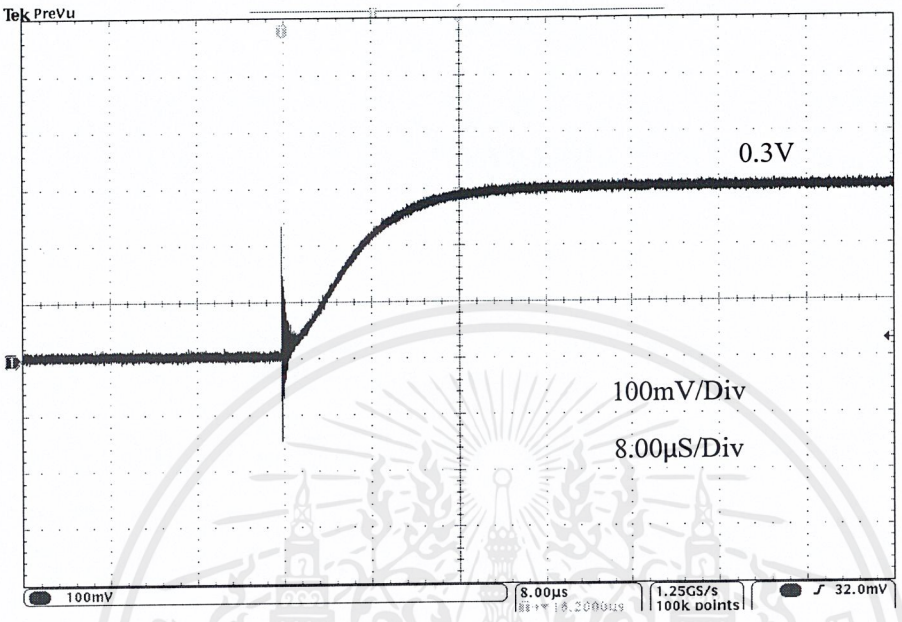
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบต่อความด้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

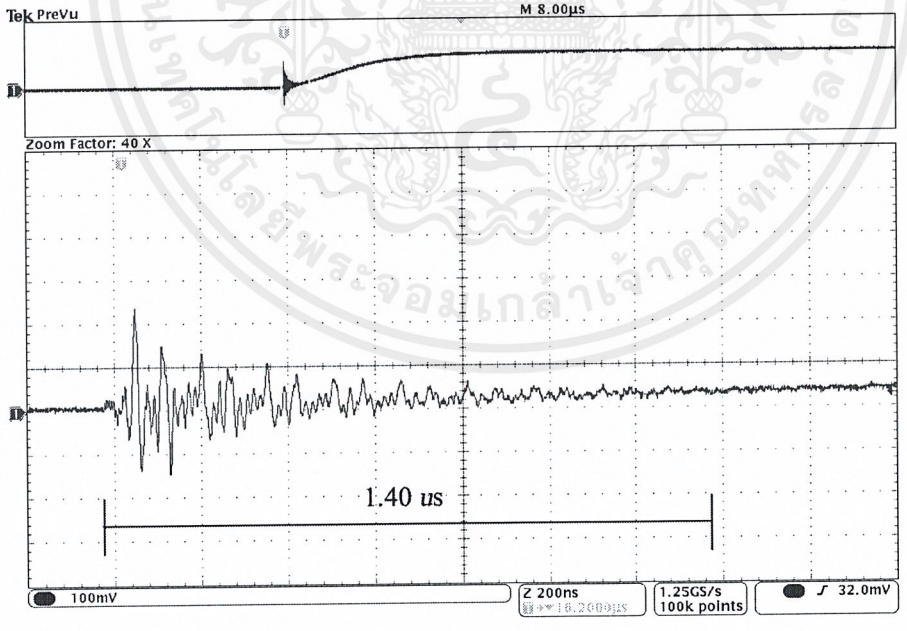
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 30 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=10 kΩ ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8(มีค่า impedance = 50Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่



ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

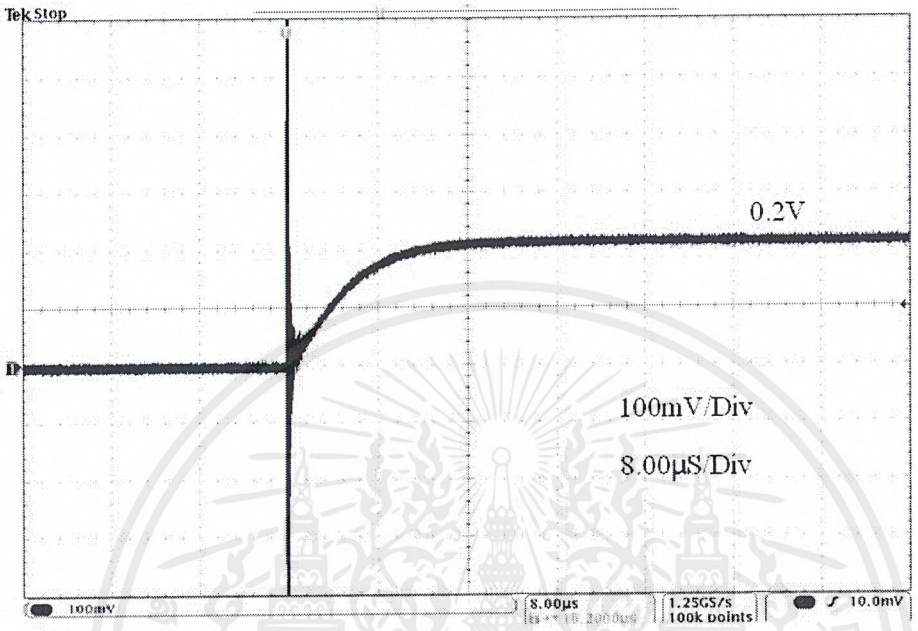
รูปที่ 4.16 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

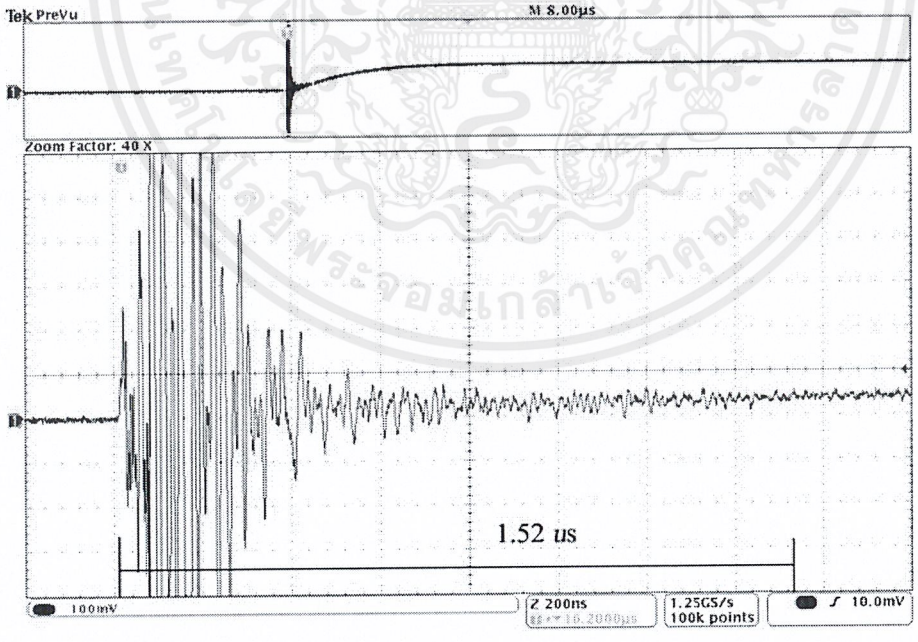
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 30 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=10 kΩ ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)



ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

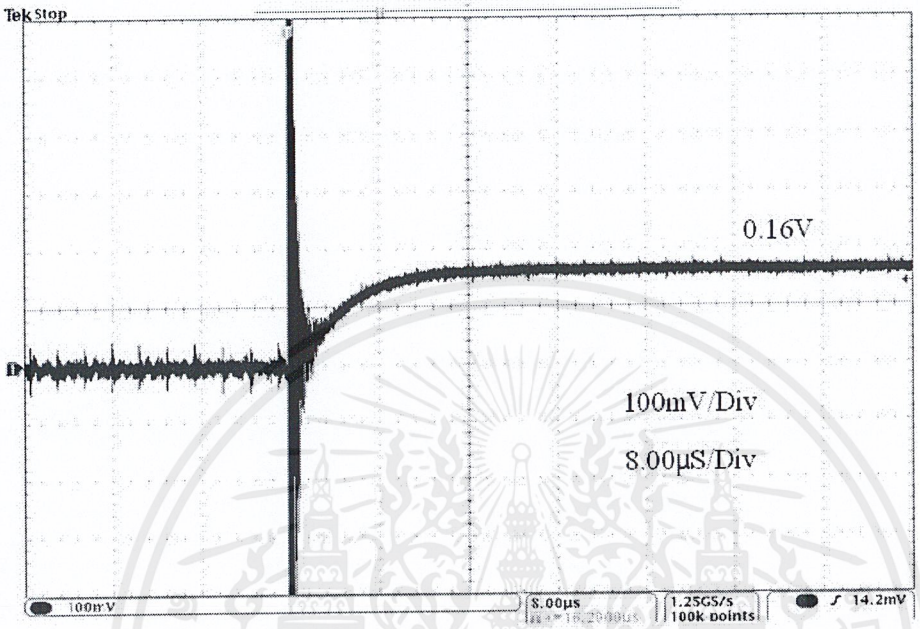
รูปที่ 4.17 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

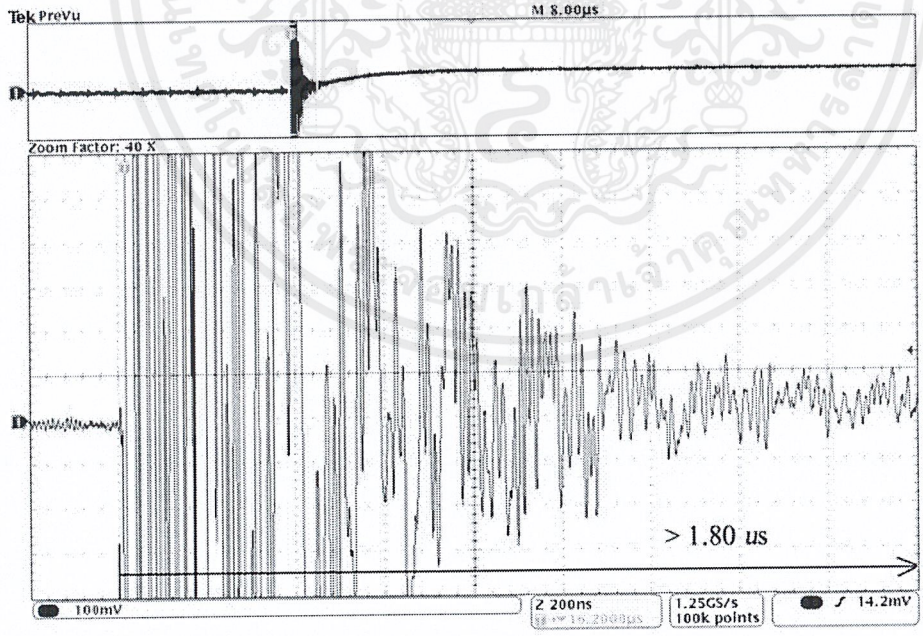
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 30 kΩ จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 30 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 10 kΩ จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=10 kΩ ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)



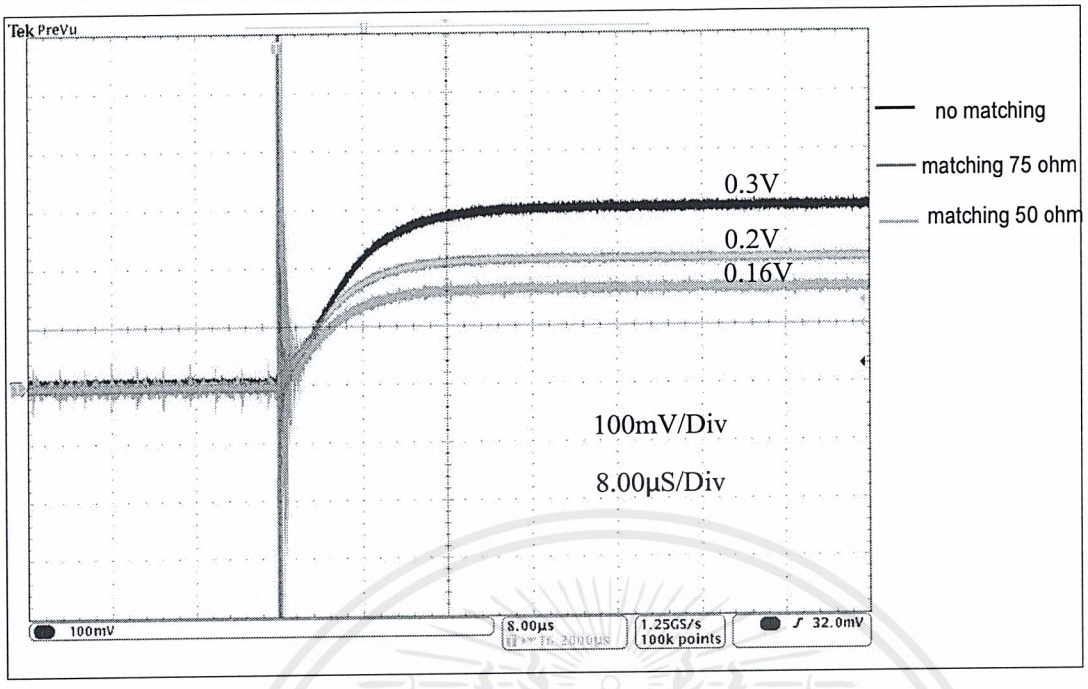
ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

รูปที่ 4.18 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-8)

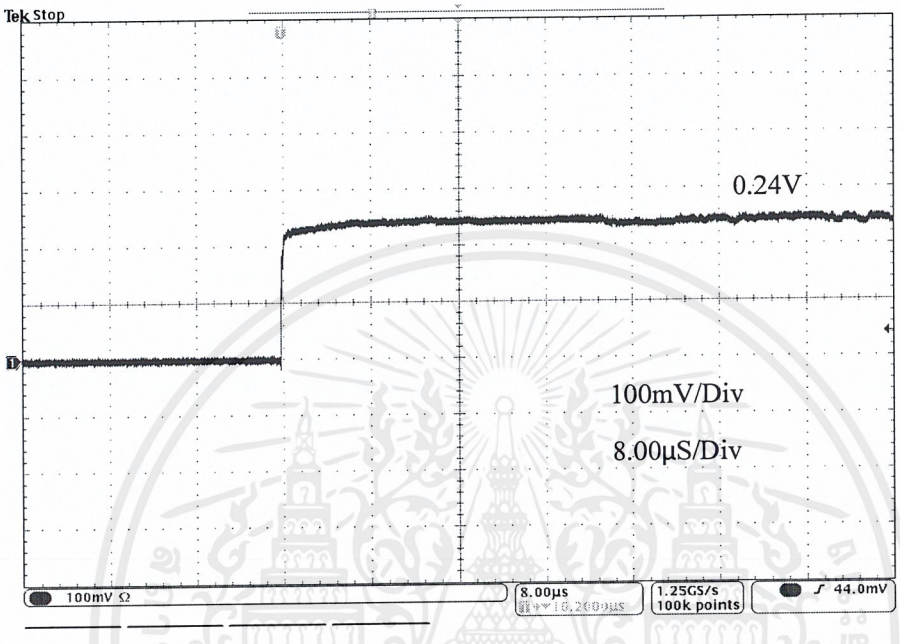
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 เลือก $R_1 \approx 10\ k\Omega$, $R_2 \approx 10\ \Omega$

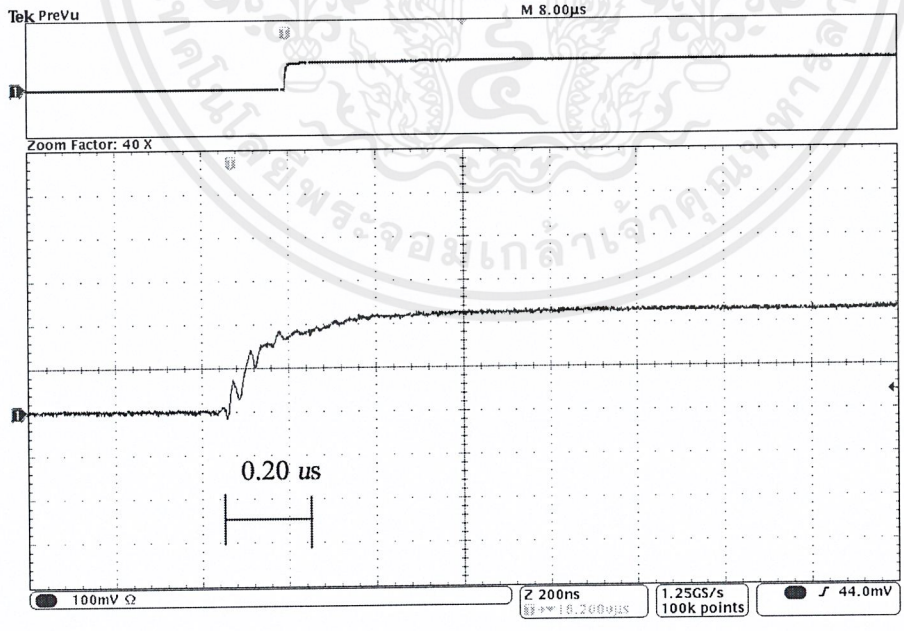
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 $k\Omega$ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100 Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11(มีค่า impedance = 75 Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่



ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200 ns/div

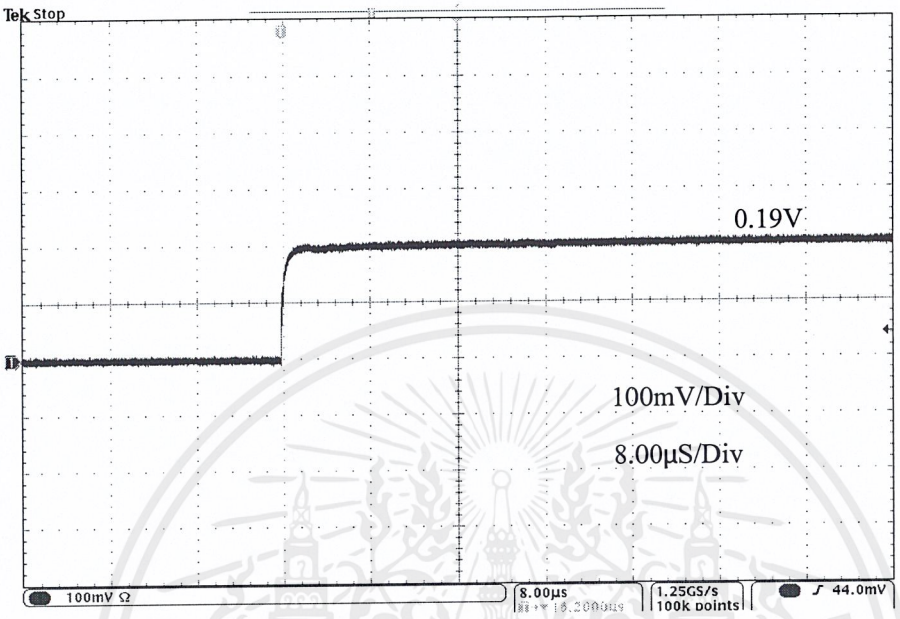
รูปที่ 4.20 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

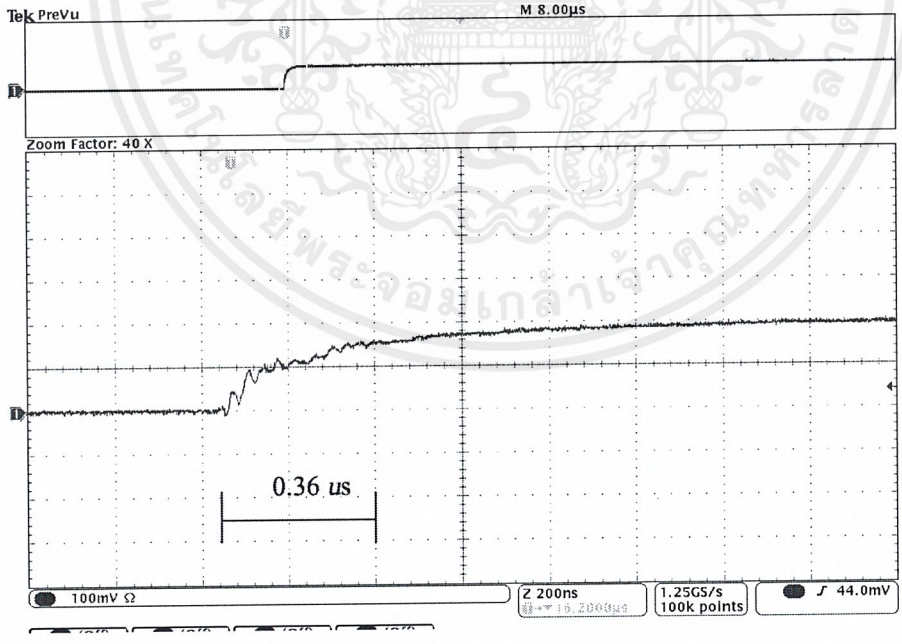
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด)



ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

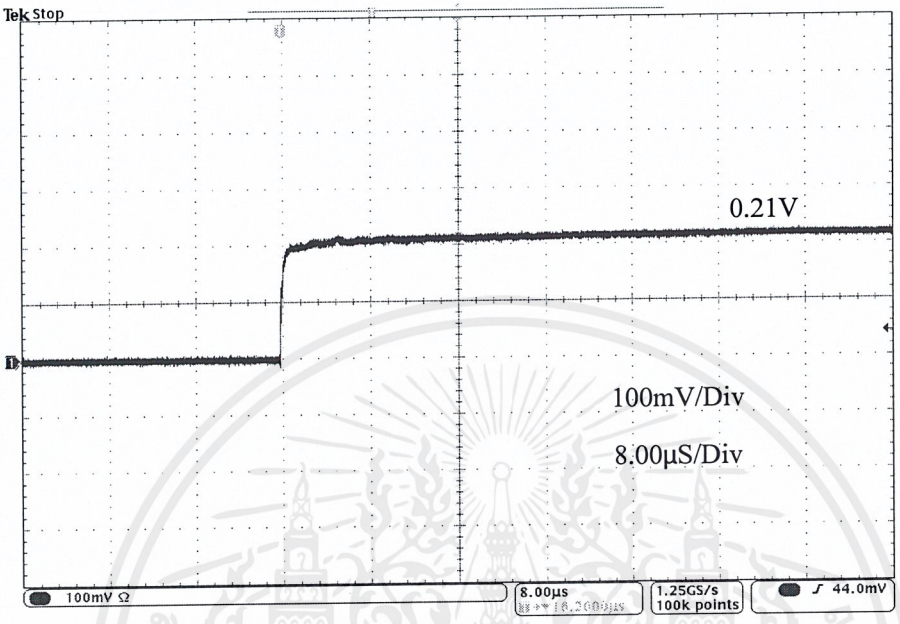
รูปที่ 4.21 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

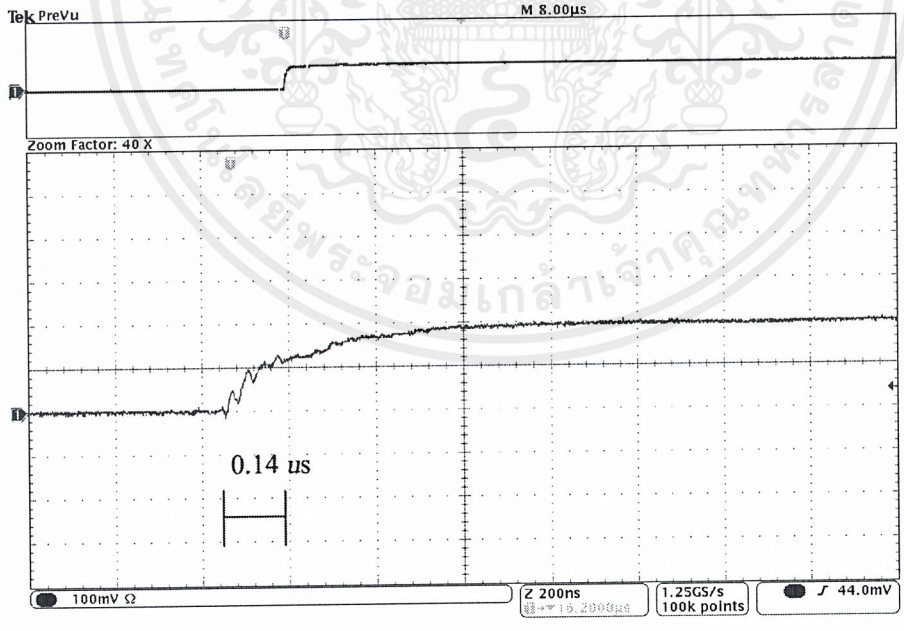
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก)



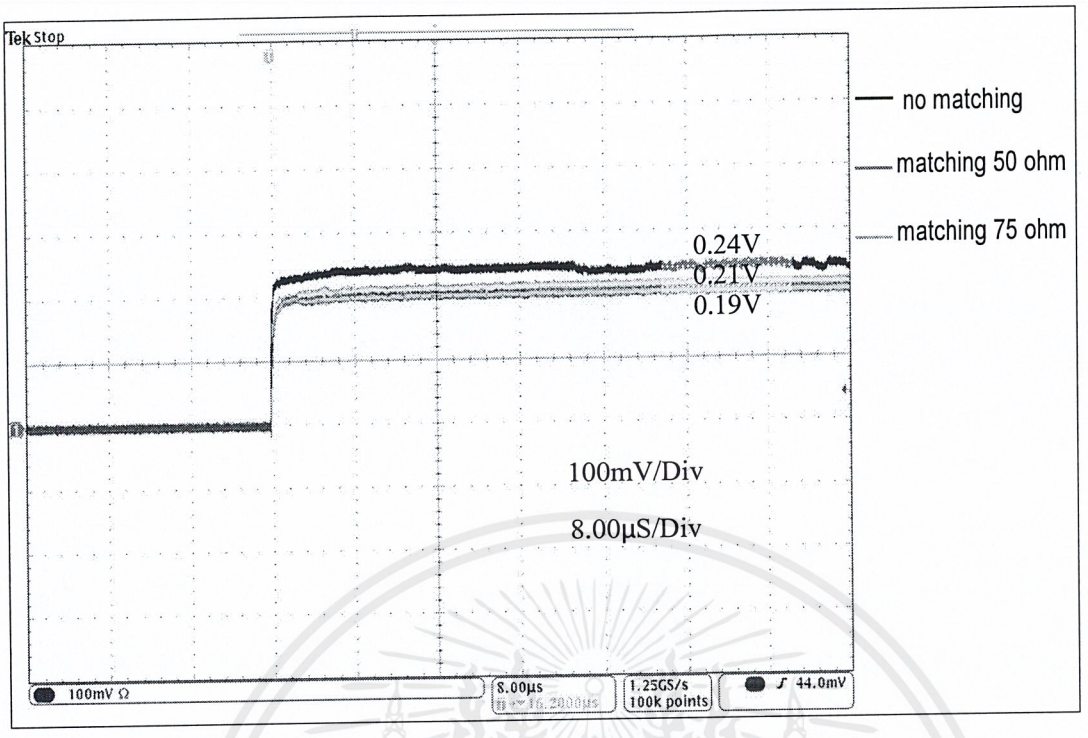
ก) time/div 8 μ s/div



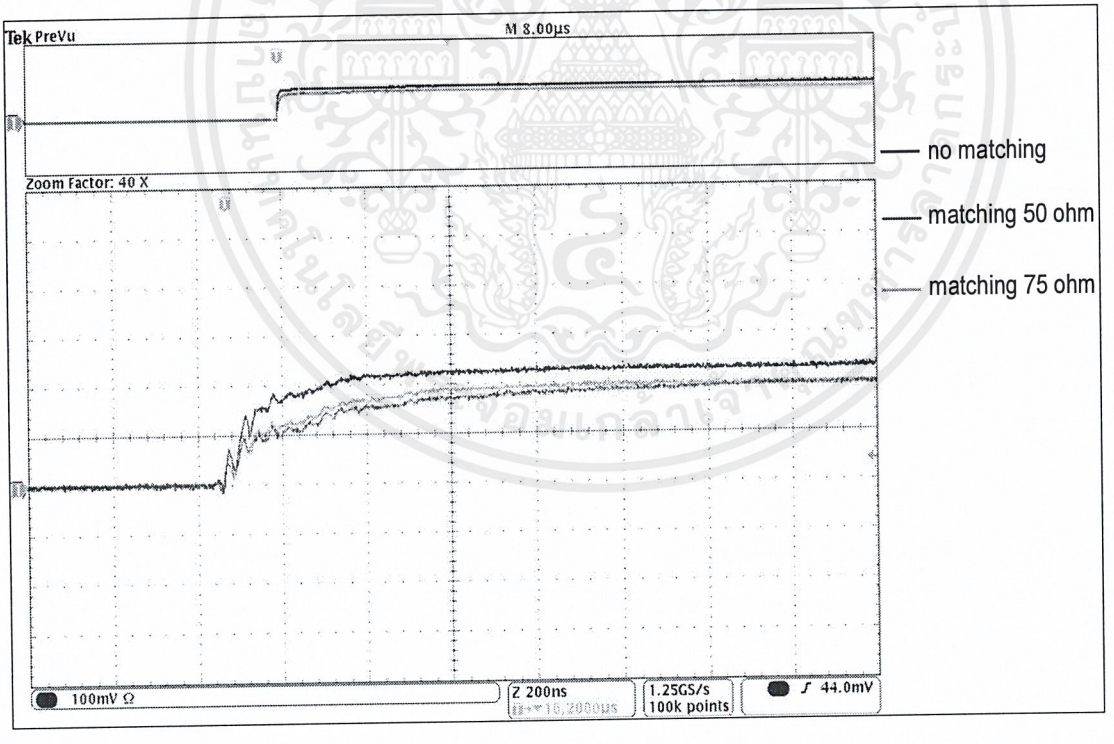
ข) time/div 200ns/div

รูปที่ 4.22 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

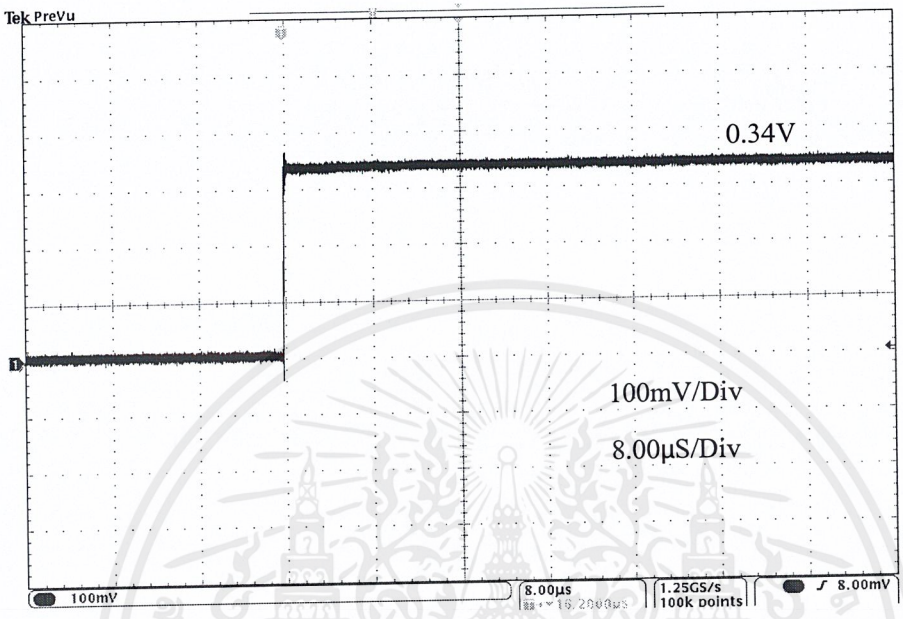
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

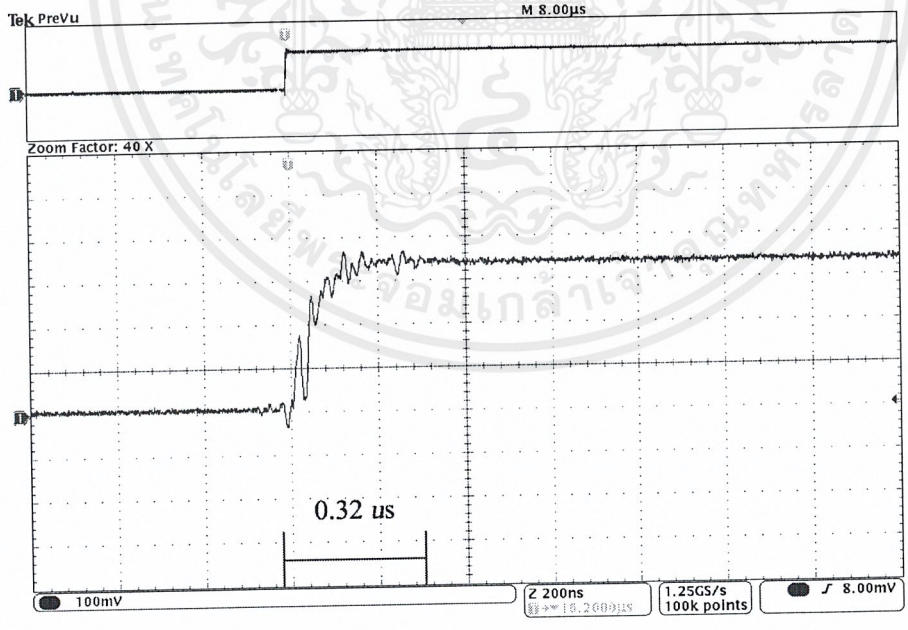
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100 Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 (มีค่า impedance = 50 Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่



ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

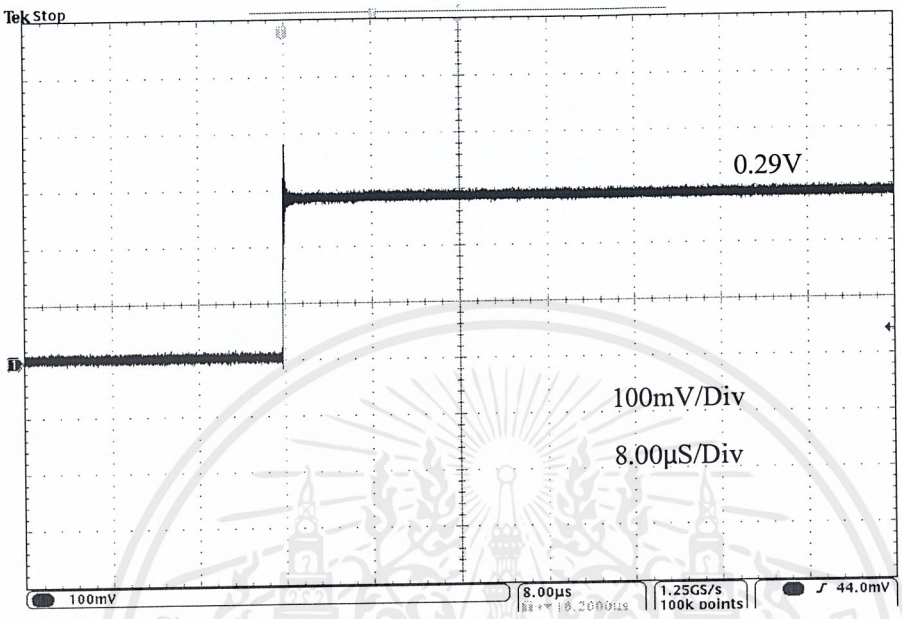
รูปที่ 4.24 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

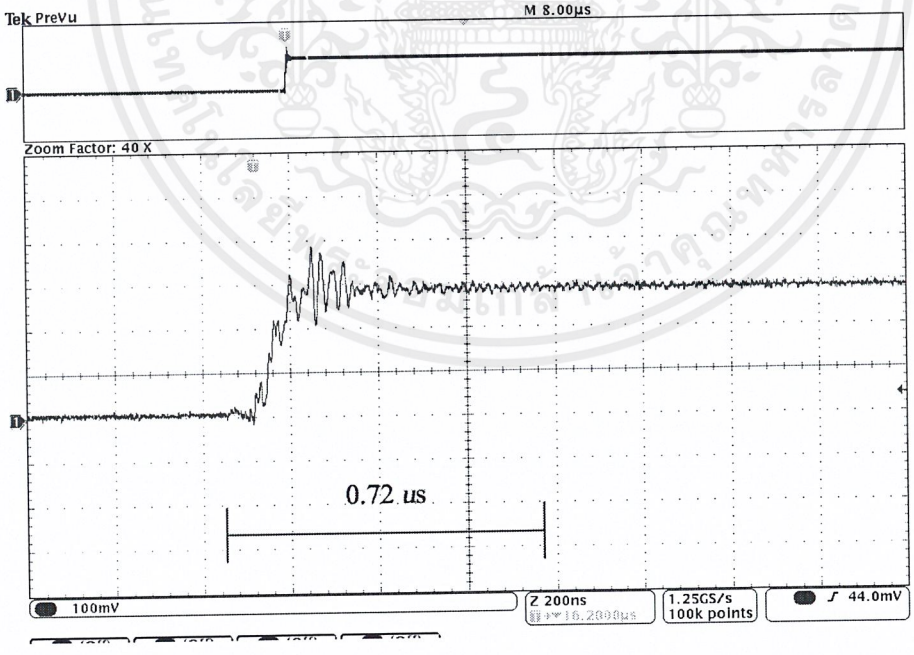
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)



ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

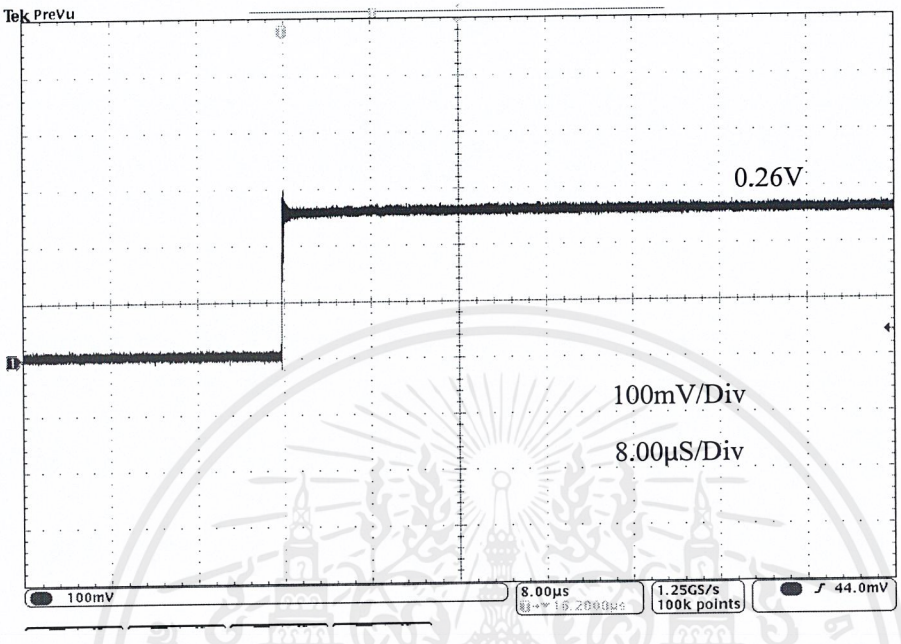
รูปที่ 4.25 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

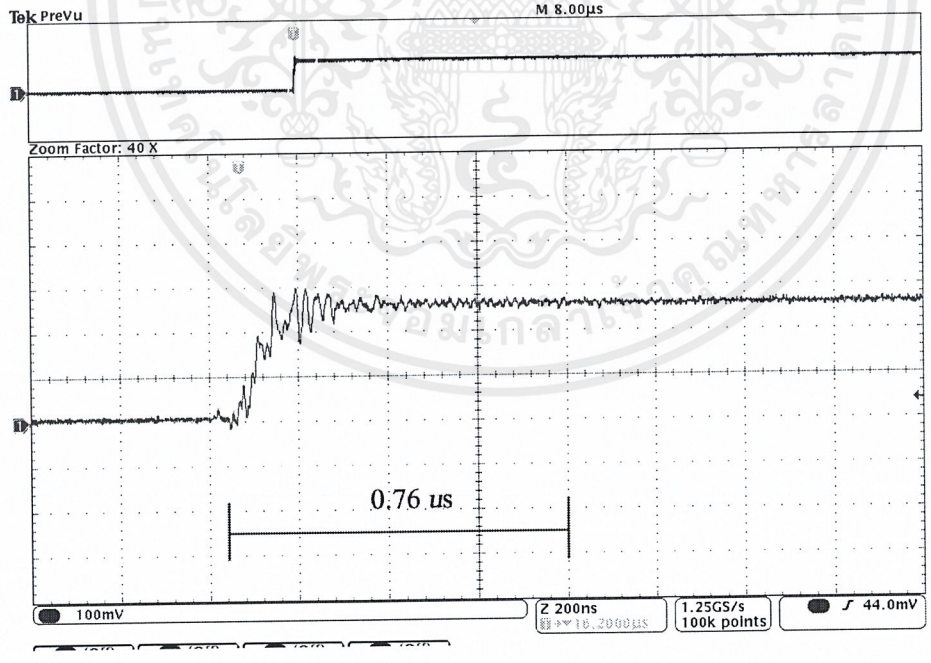
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)



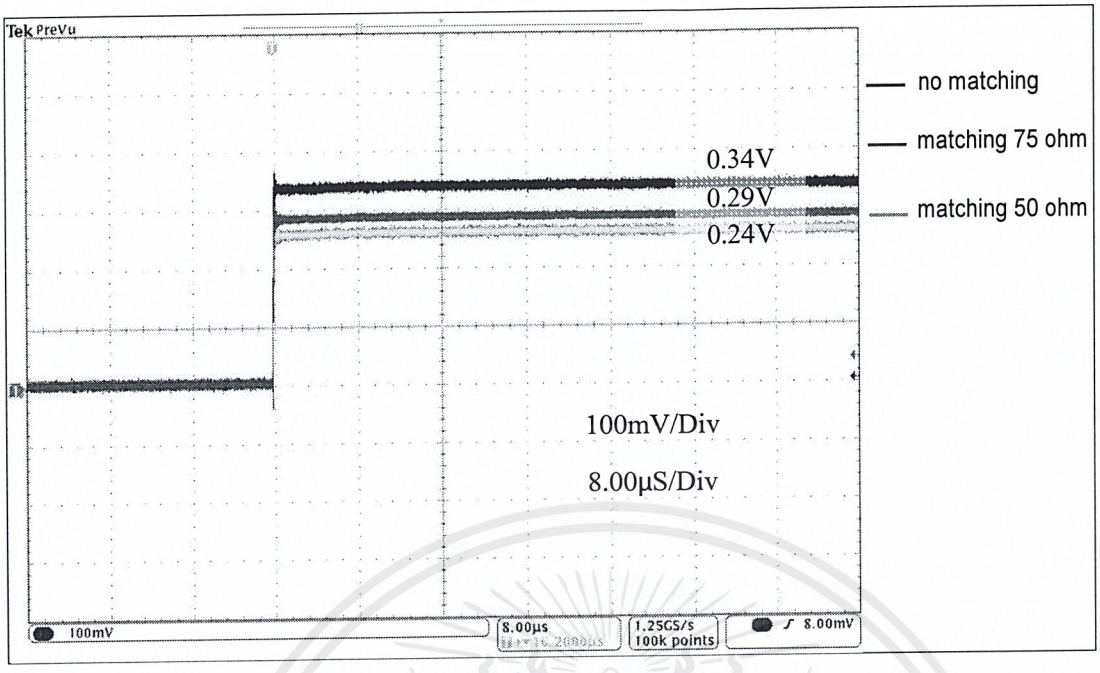
ก) time/div 8 μ s/div



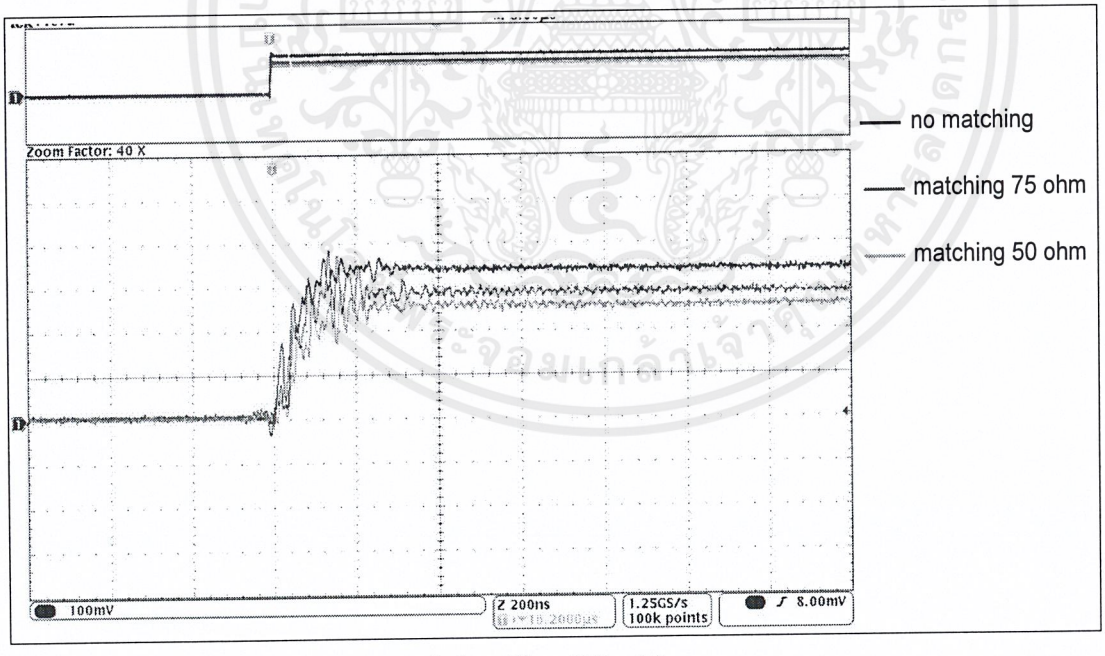
ข) time/div 200ns/div

รูปที่ 4.26 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



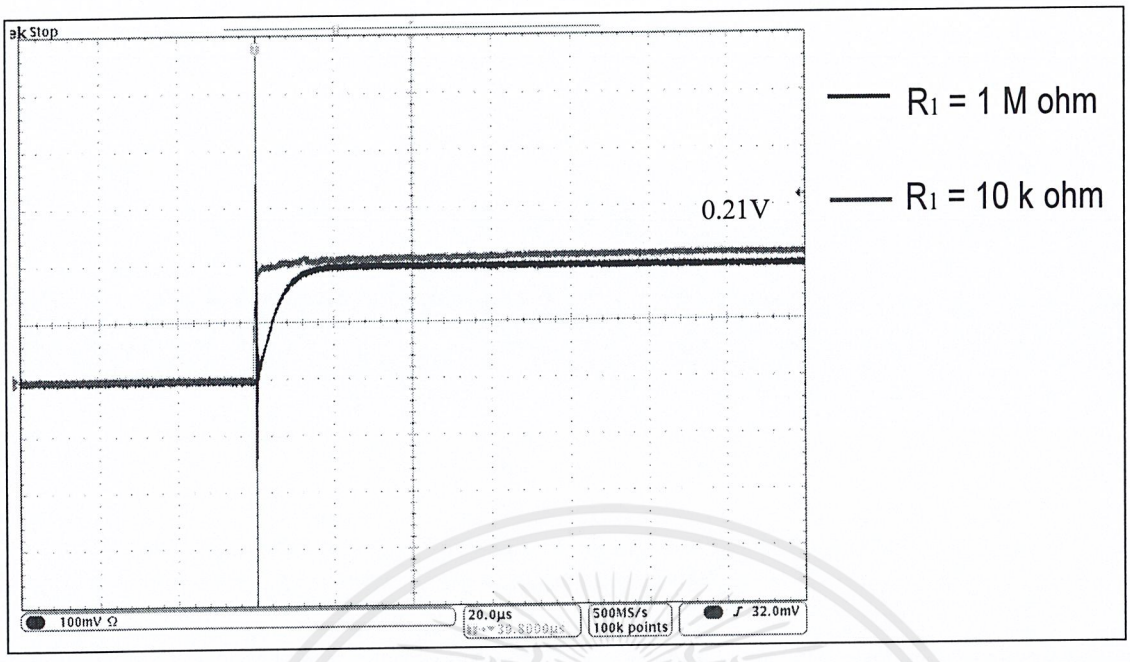
ก) time/div 8 μ s/div



ข) time/div 200ns/div

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบ R_1 = 1 MΩ กับ R_1 = 10 kΩ

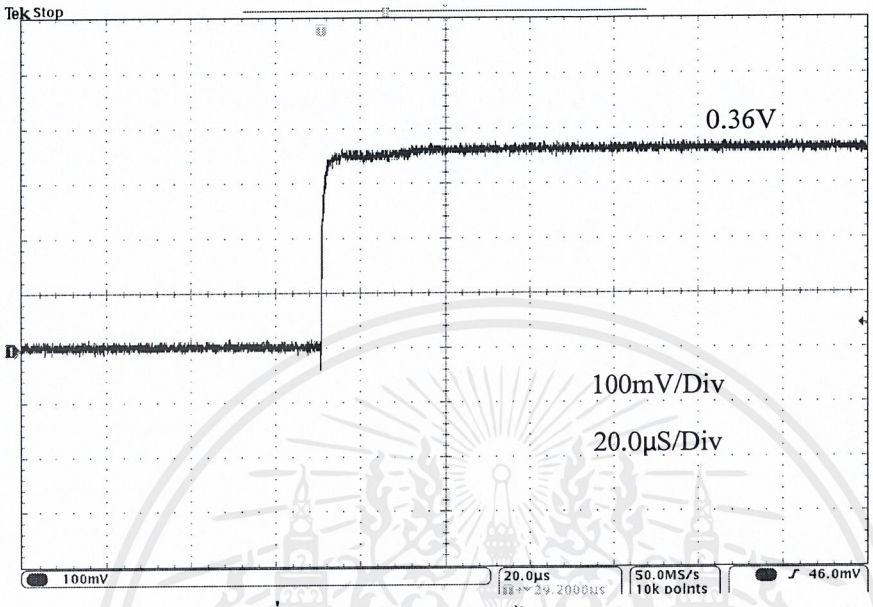
-จากที่ทำการทดลอง ผลตอบสนองรูปขั้น ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 2 แบบ คือ แบบเลือกใช้ $R_1 \approx 1$ MΩ และแบบใช้ $R_1 \approx 10$ kΩ จะเห็นว่าแบบที่ใช้ $R_1 \approx 10$ kΩ จะให้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดีกว่า ดังนั้น จะเลือกใช้แบบ $R_1 \approx 10$ kΩ เพื่อนำไปศึกษาผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ต่อสายเคเบิลที่มีอิมพิแดนซ์ต่างกัน 2 สาย จาก RG-8 ไป RG-11

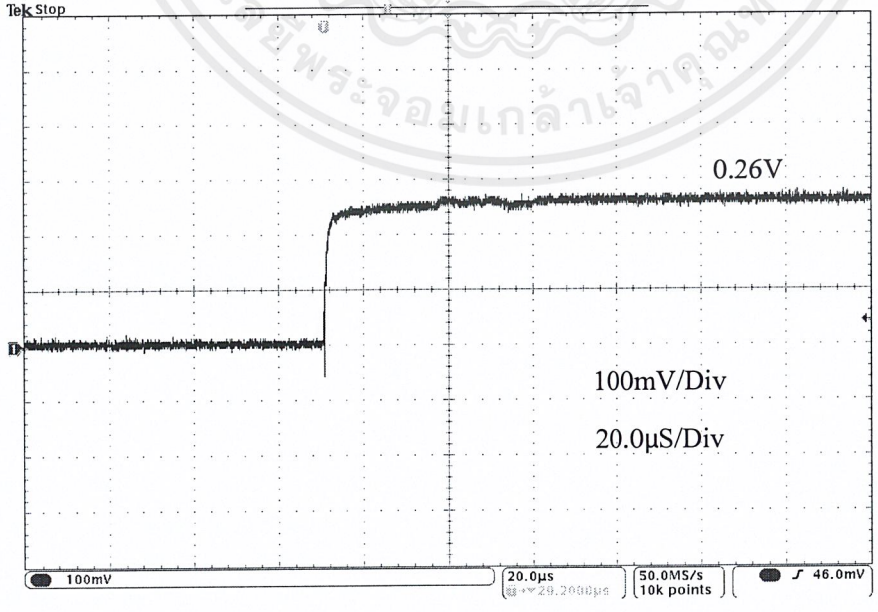


รูปที่ 4.29 จากสาย RG-8 ไป RG – 11

ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว

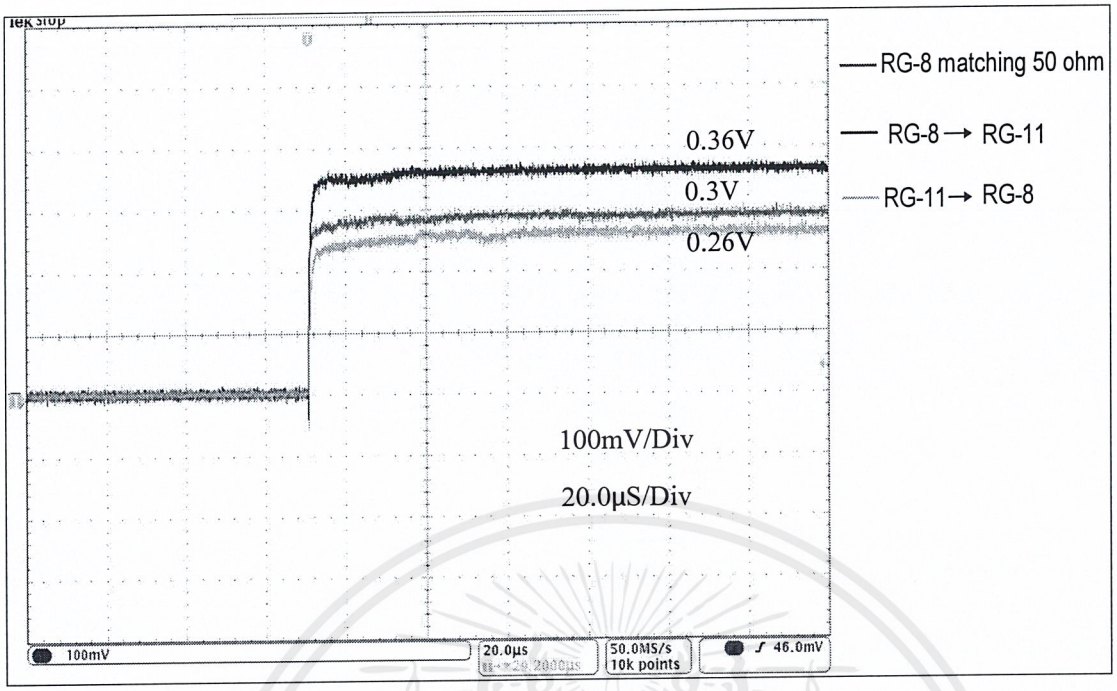
ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว

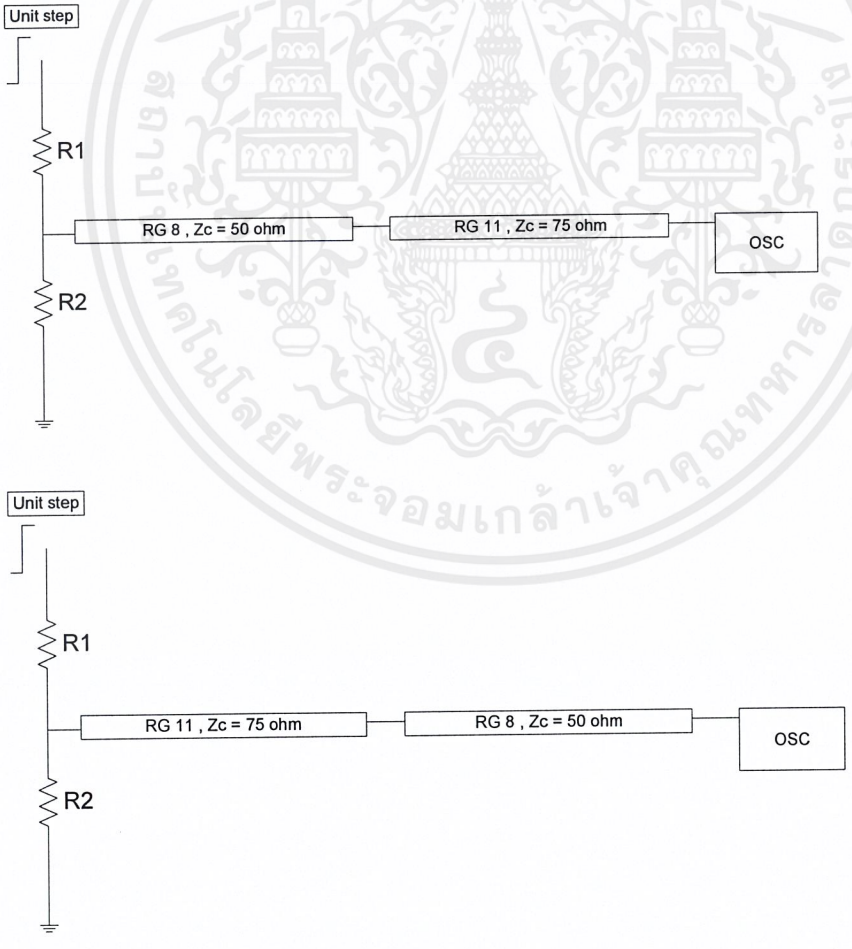
ต่อสายเคเบิลที่มีอิมพิแดนซ์ต่างกัน 2 สาย จาก RG-11 ไป RG-8



รูปที่ 4.30 จากสาย RG-11 ไป RG – 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบ สายRG-8, RG-8 ไป RG-11, RG-11ไป RG-8

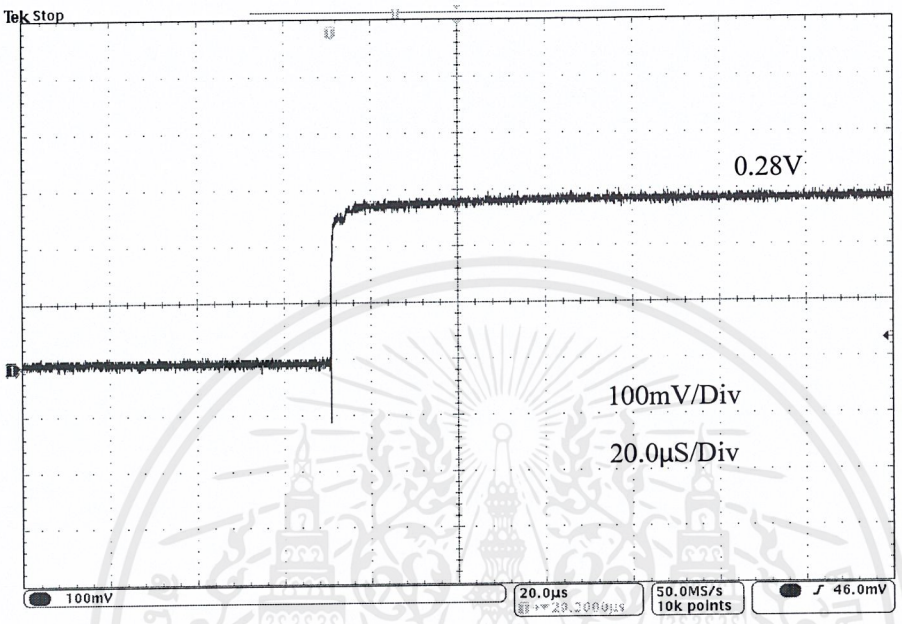
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3 ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากความเหนี่ยวนำ (เลือก $R_1 \approx 10\,k\Omega$, $R_2 \approx 10\,\Omega$)

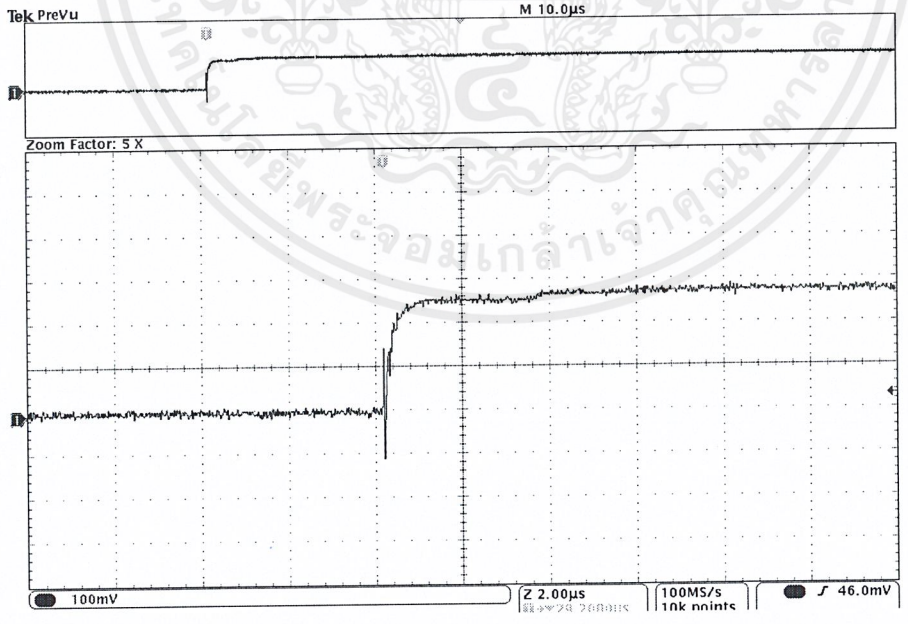
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

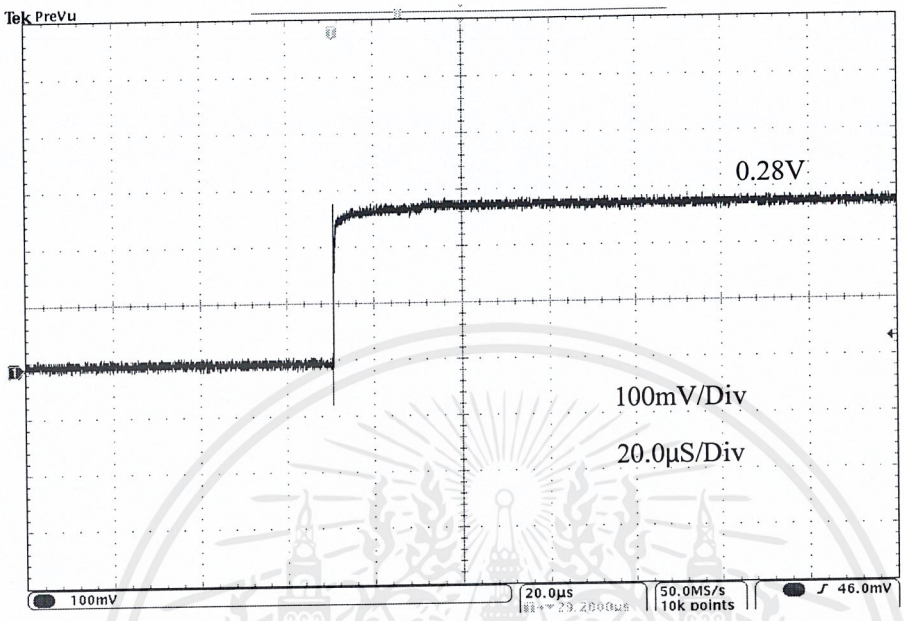
รูปที่ 4.32 มี L ที่ด้าน high volt 1 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

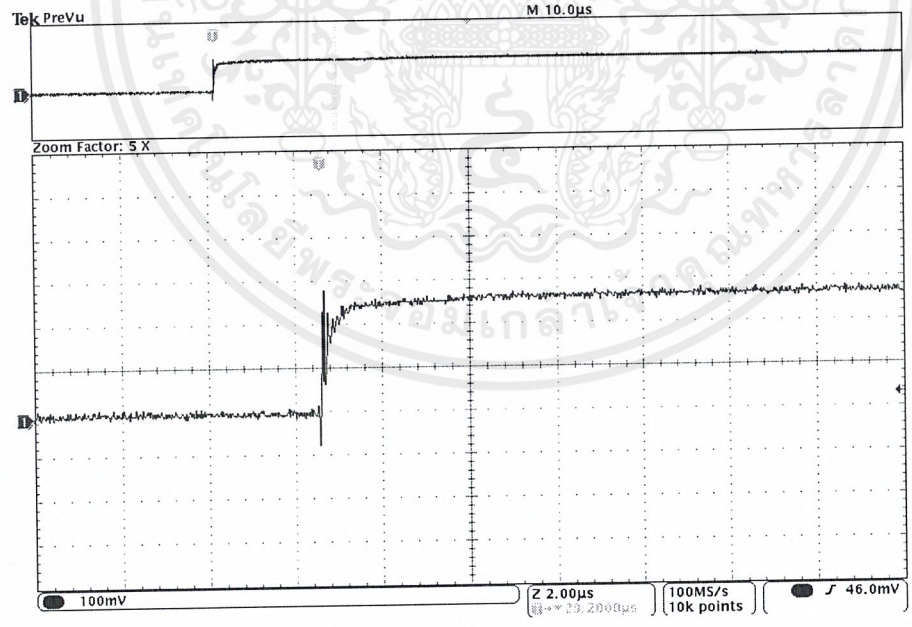
.ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μ H



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

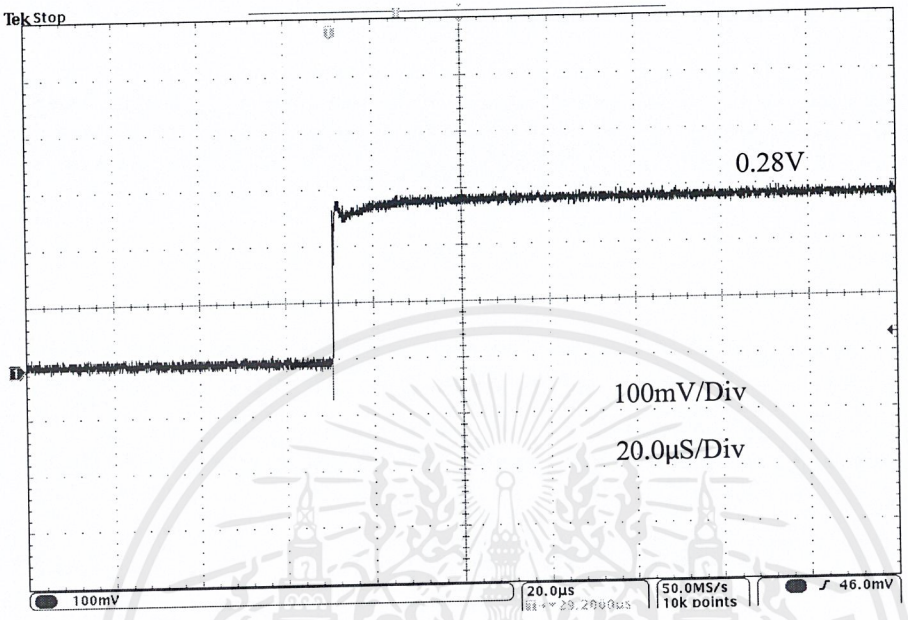
รูปที่ 4.33 มี L ที่ด้าน high volt 3 μ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

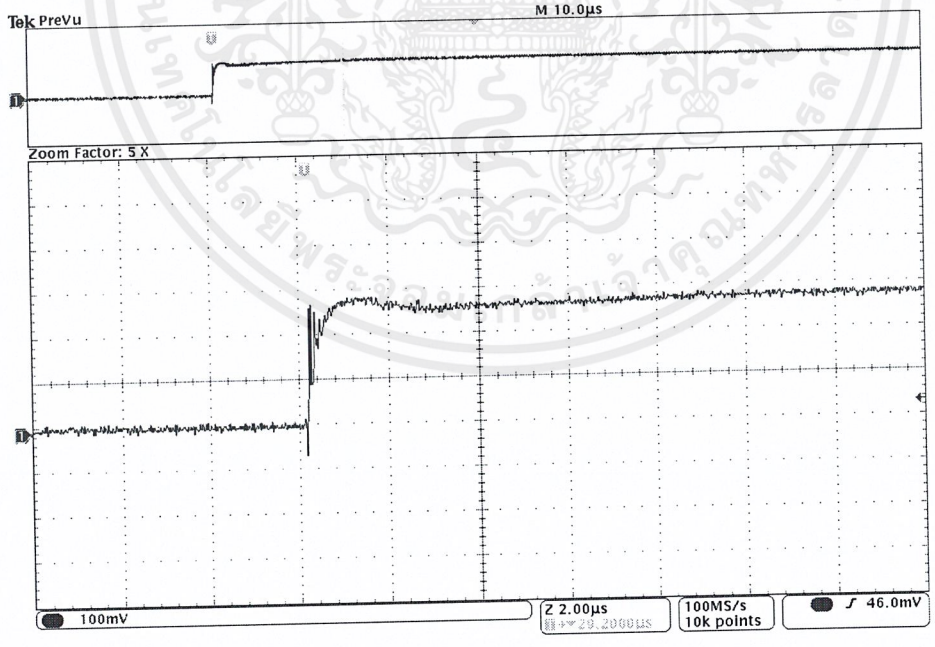
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

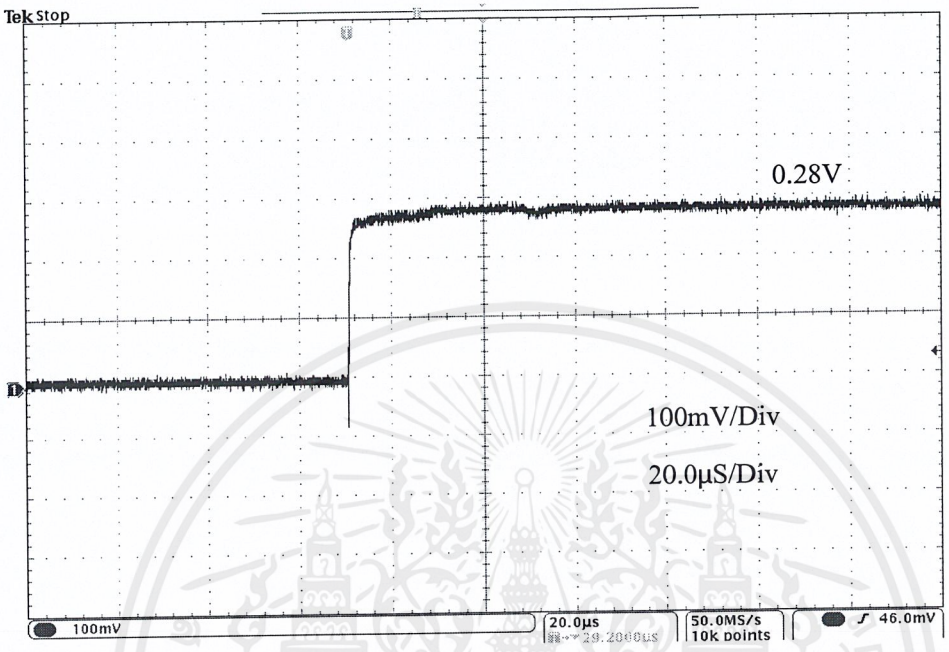
รูปที่ 4.34 มี L ที่ด้าน low volt 1 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

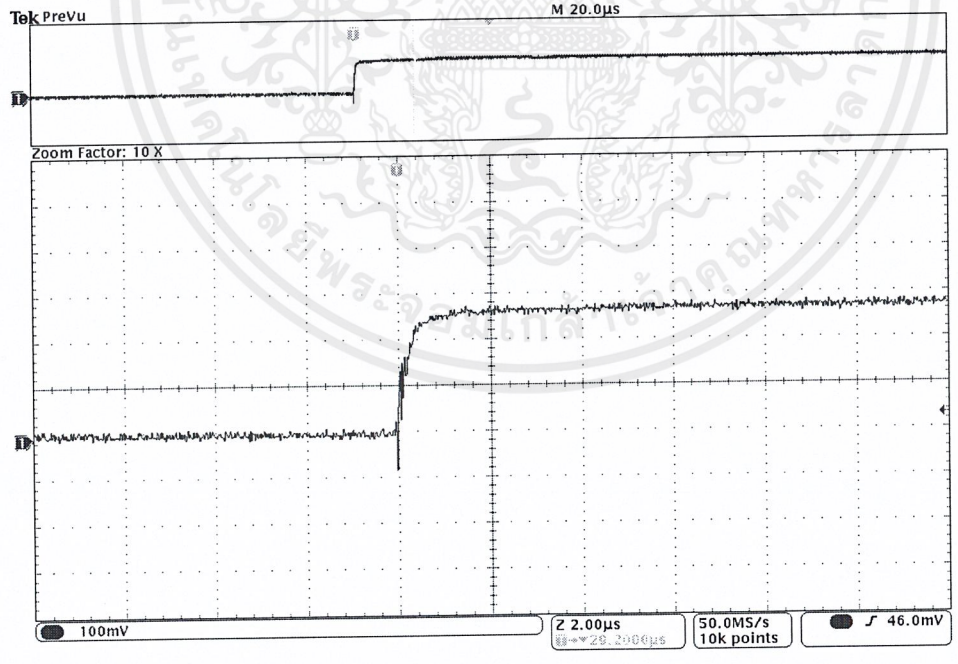
ภาคแรงสูง ความต้านทานขนาด 330 Ω จำนวน 31 ตัว (ใช้ R= 330 kΩ ต่ออนุกรม 31 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ความต้านทานขนาด 100 Ω จำนวน 10 ตัว (ใช้ R=100Ω ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH



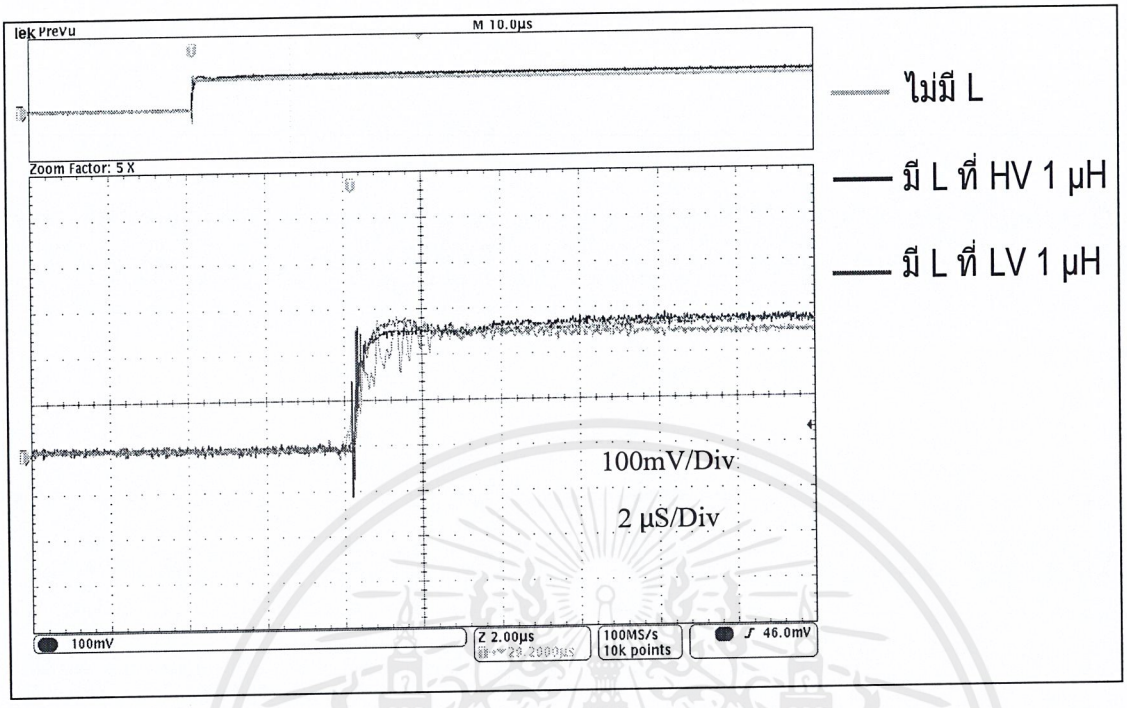
ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.35 มี L ที่ด้าน low volt 3 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบกรณีมีค่าความเหนี่ยวนำและไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

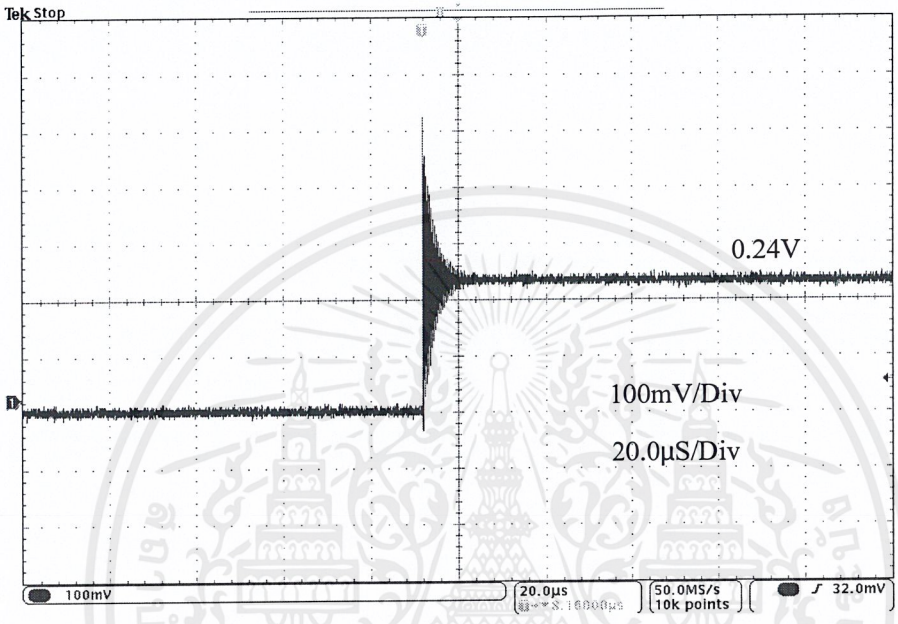
4.2.2 C-divider อัตราส่วนแรงดัน 1001:1

4.2.2.1 เลือก $C_1 \approx 40$ pF, $C_2 \approx 40$ nF

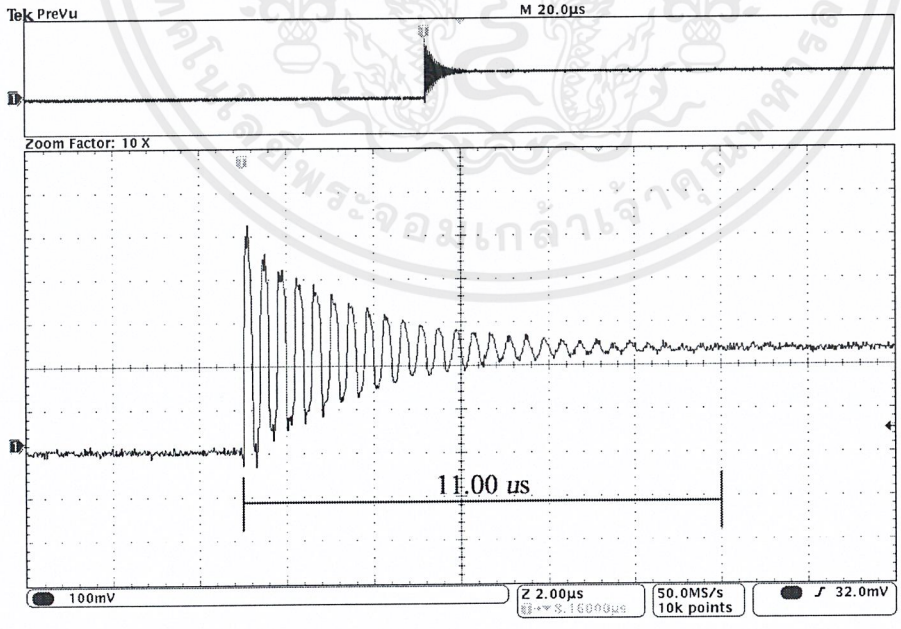
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11(มีค่า impedance = 75 Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

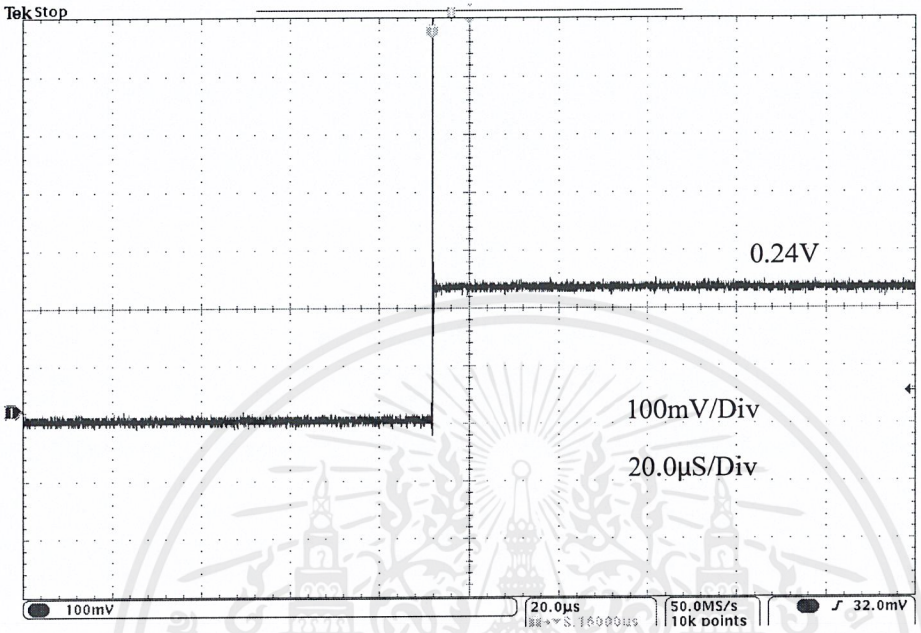
รูปที่ 4.37 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

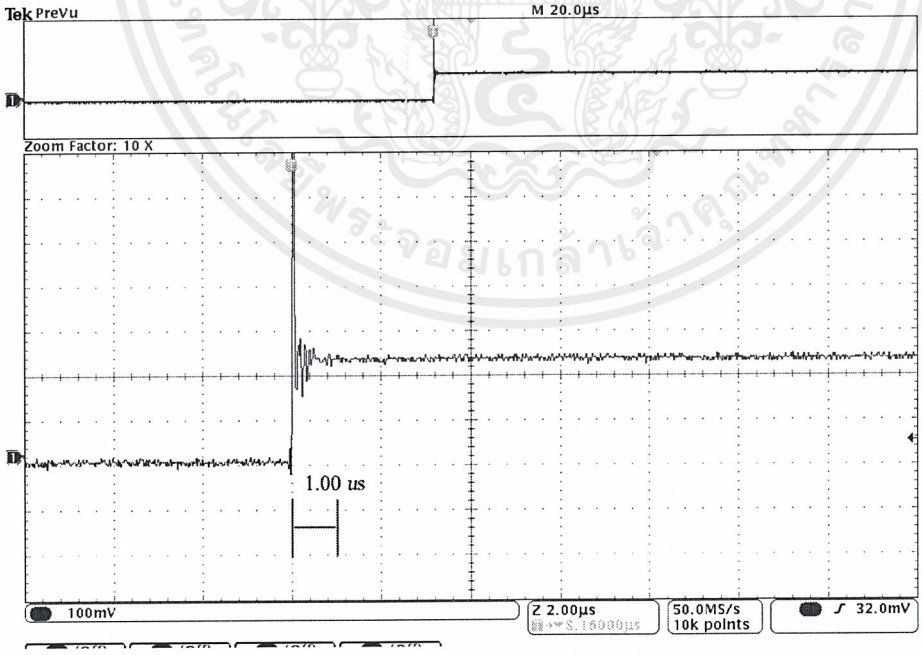
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ผิด)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

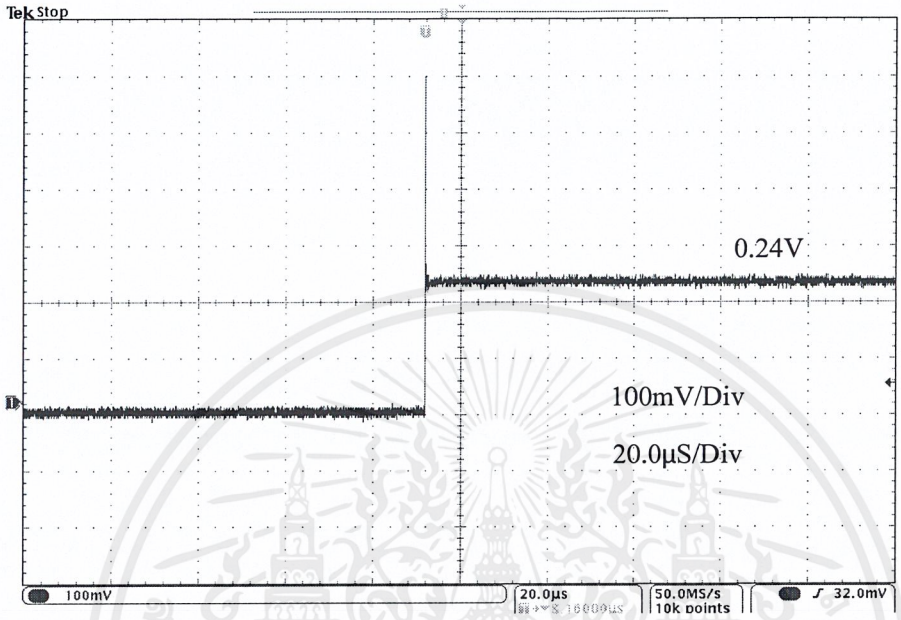
รูปที่ 4.38 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

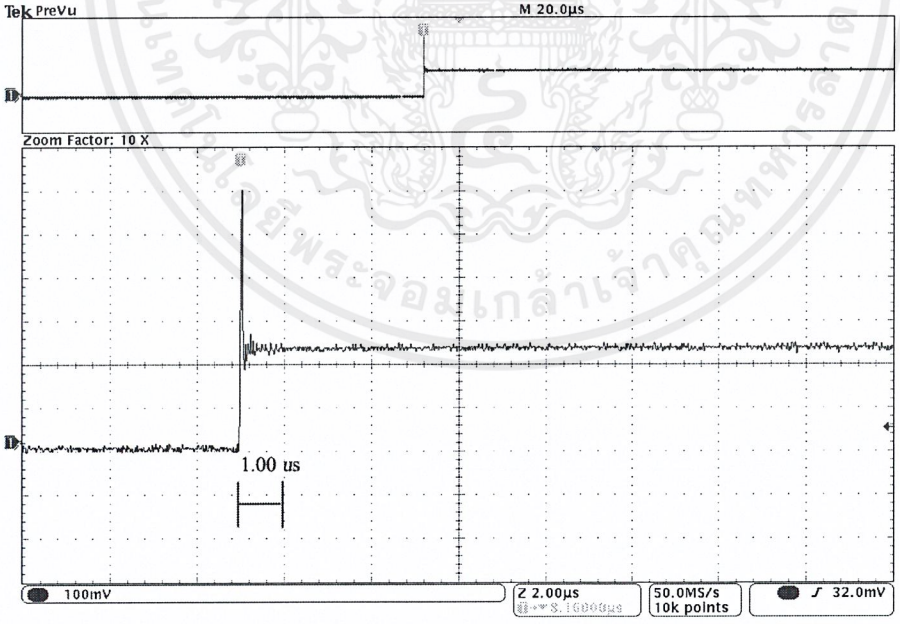
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-11 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ถูก)



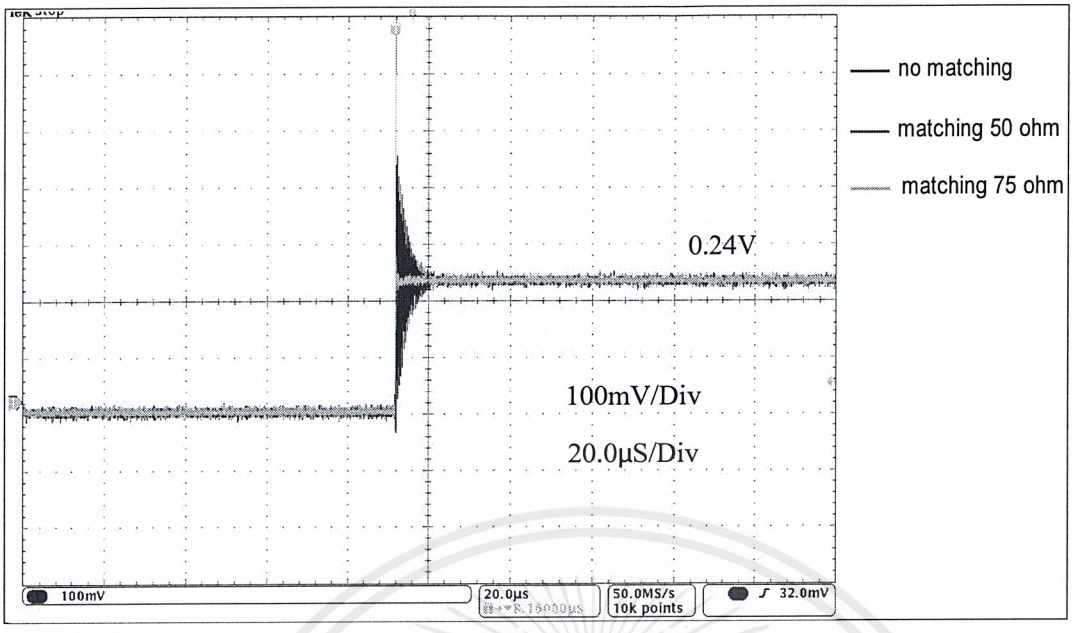
ก) time/div 20 μ s/div



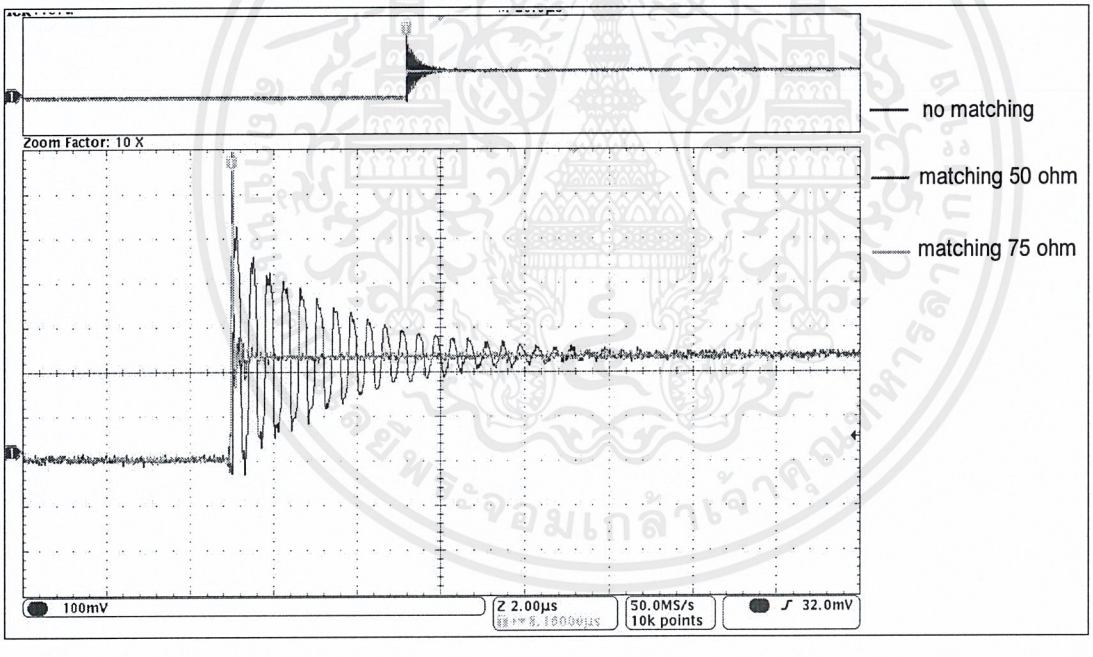
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.39 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

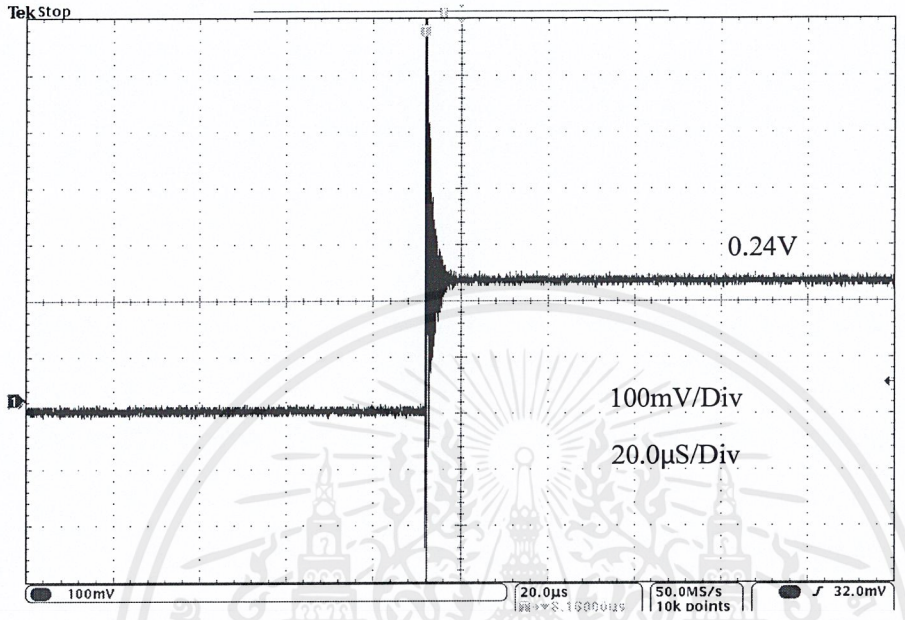
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

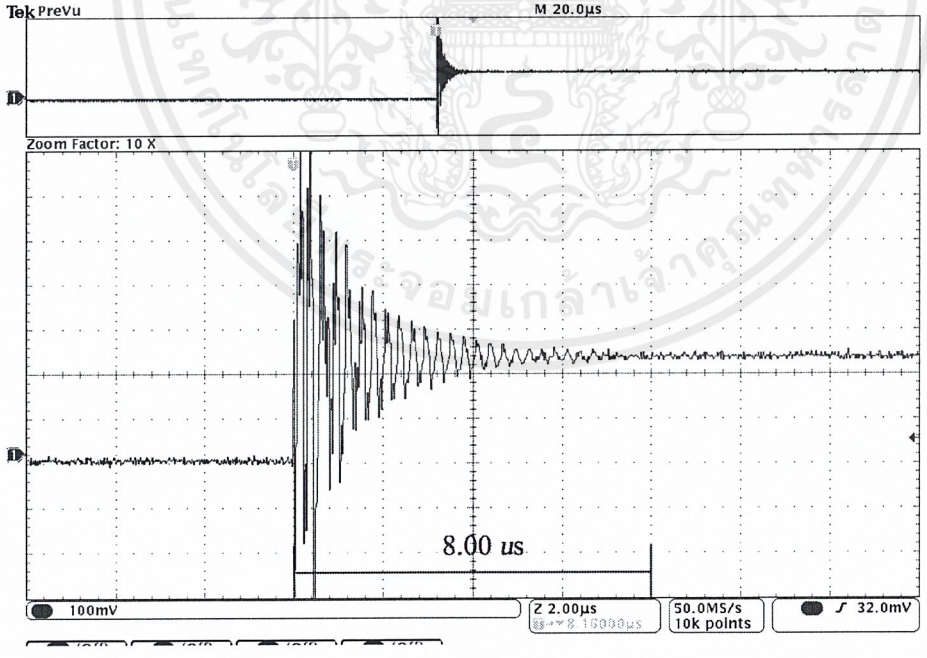
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8(มีค่า impedance = 50 Ω) ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

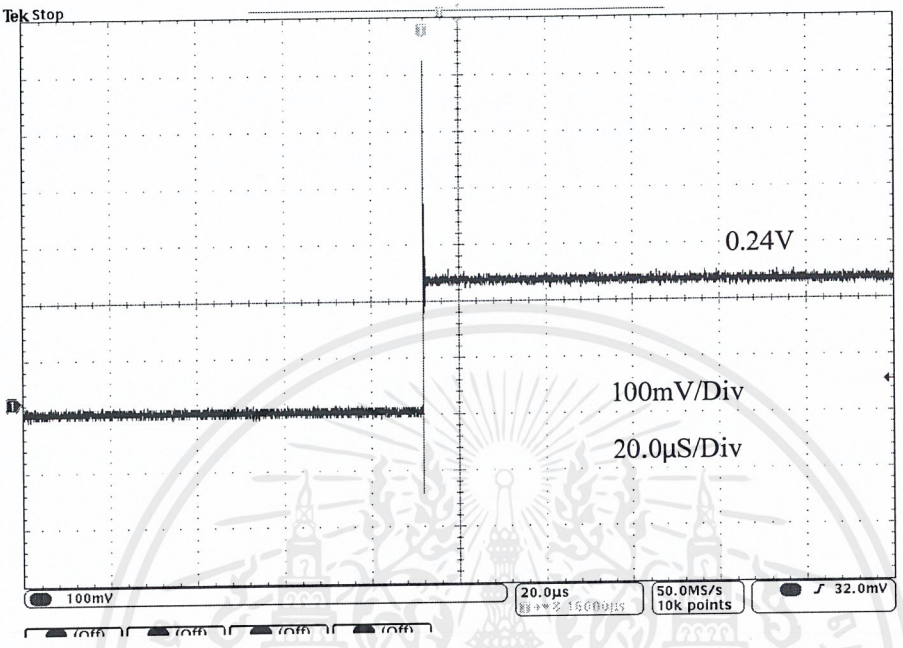
รูปที่ 4.41 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

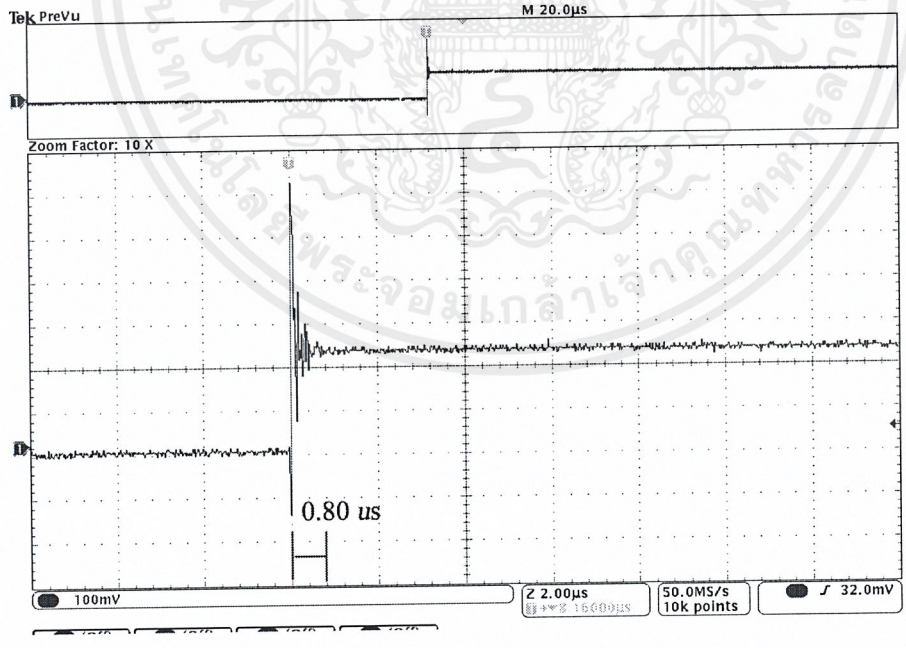
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

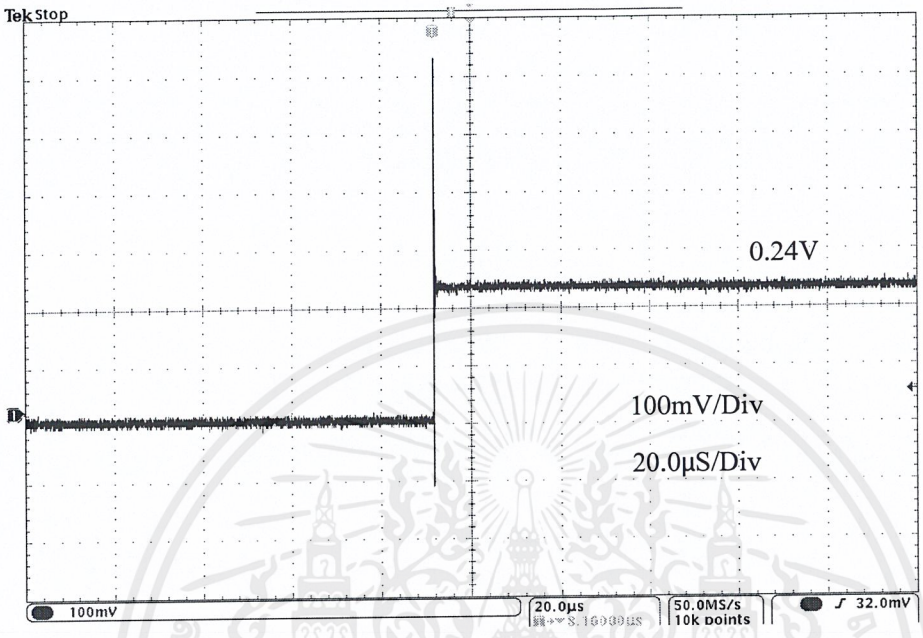
รูปที่ 4.42 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

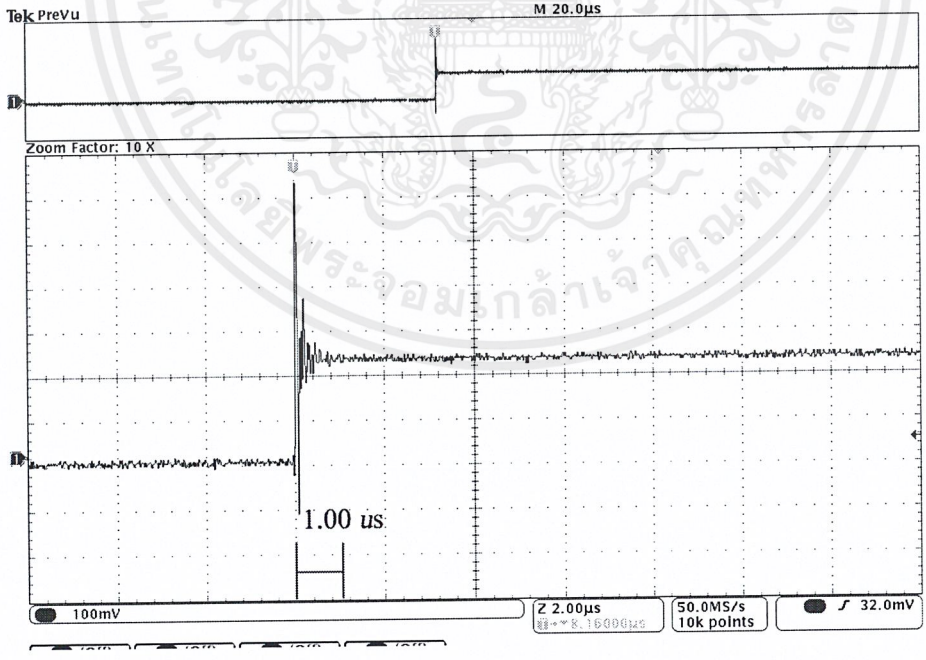
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)



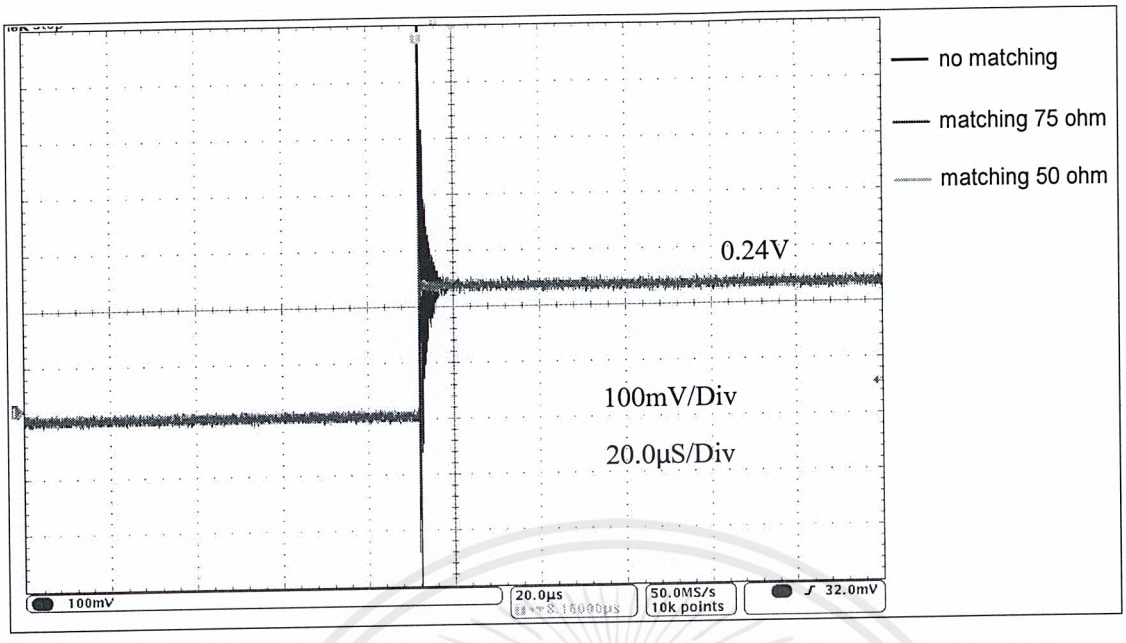
ก) time/div 20 μ s/div



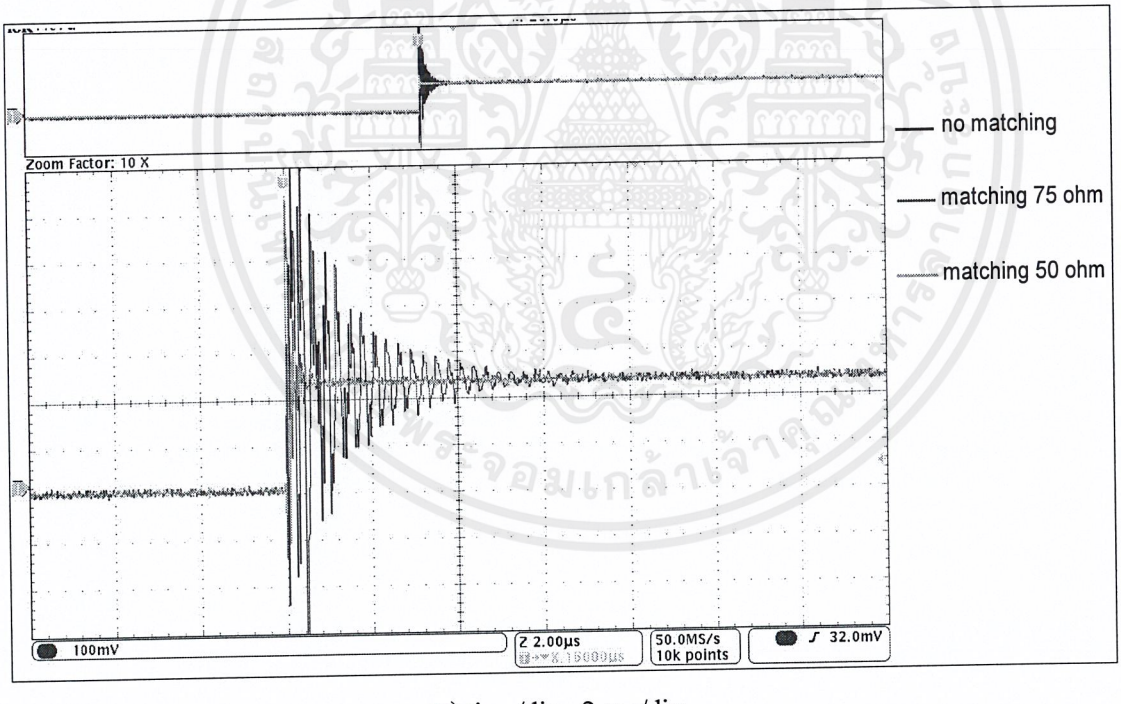
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.43 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-8)

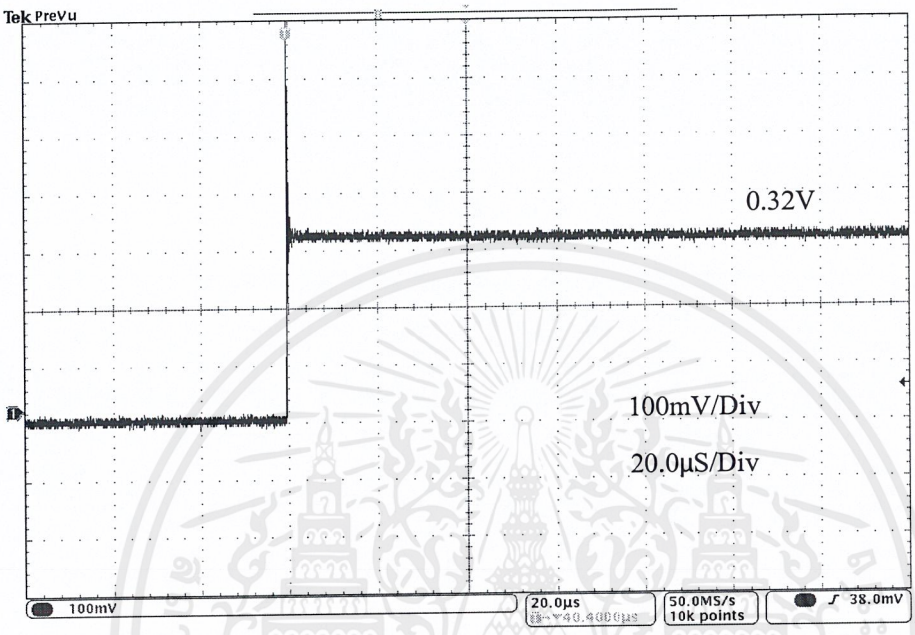
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 เลือก $C_1 \approx 100$ pF, C2 $\approx$ 100 nF

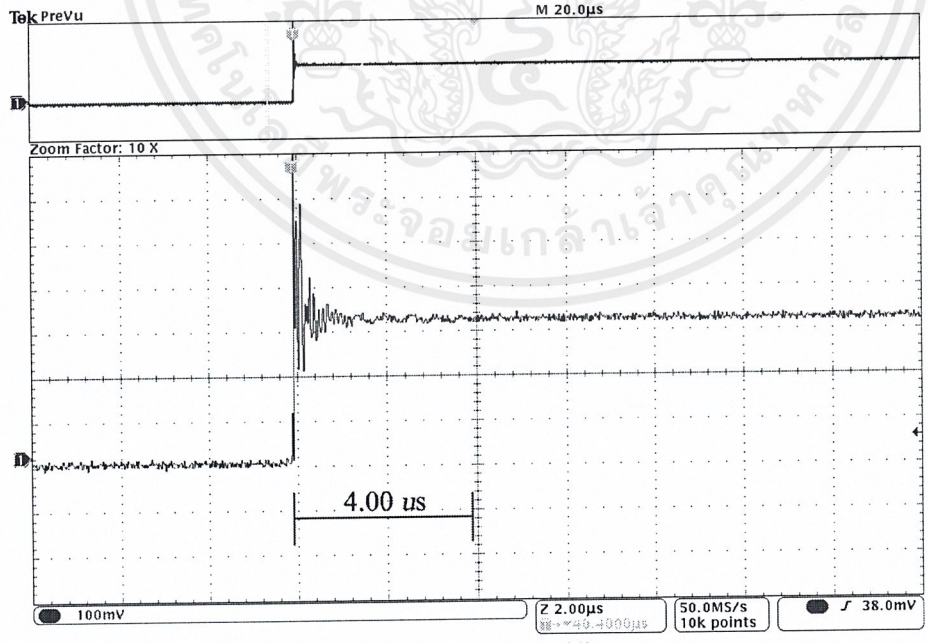
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 2.7nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 10 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 20 μ s/div

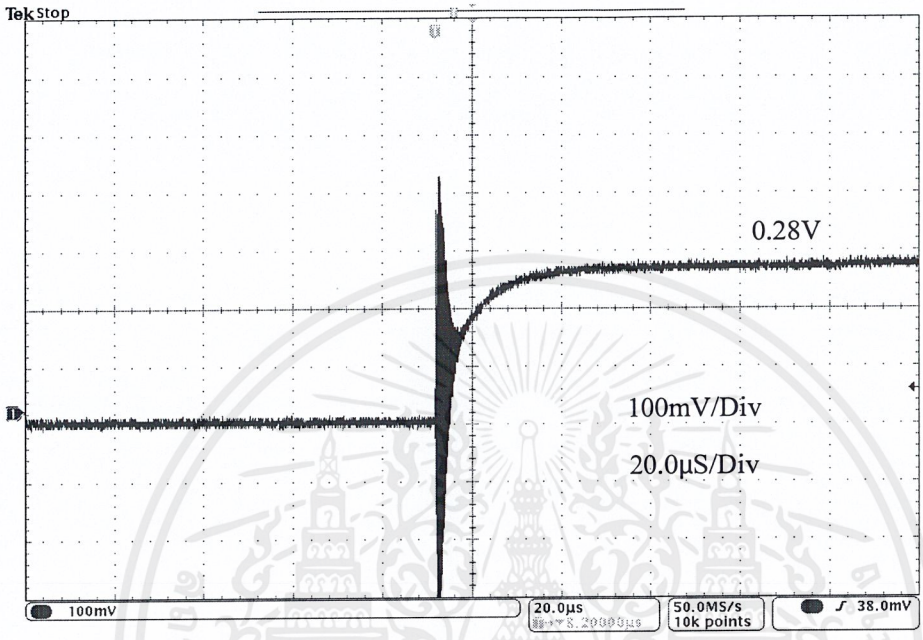
รูปที่ 4.45 ไม่ได้ต่อความต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

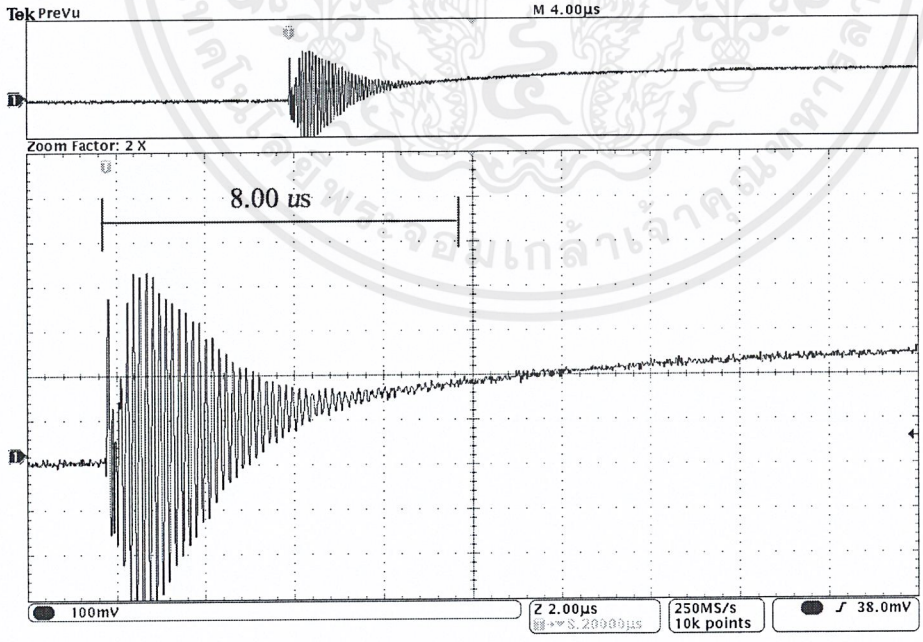
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 2.7nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 10 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω (matching ผิด)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

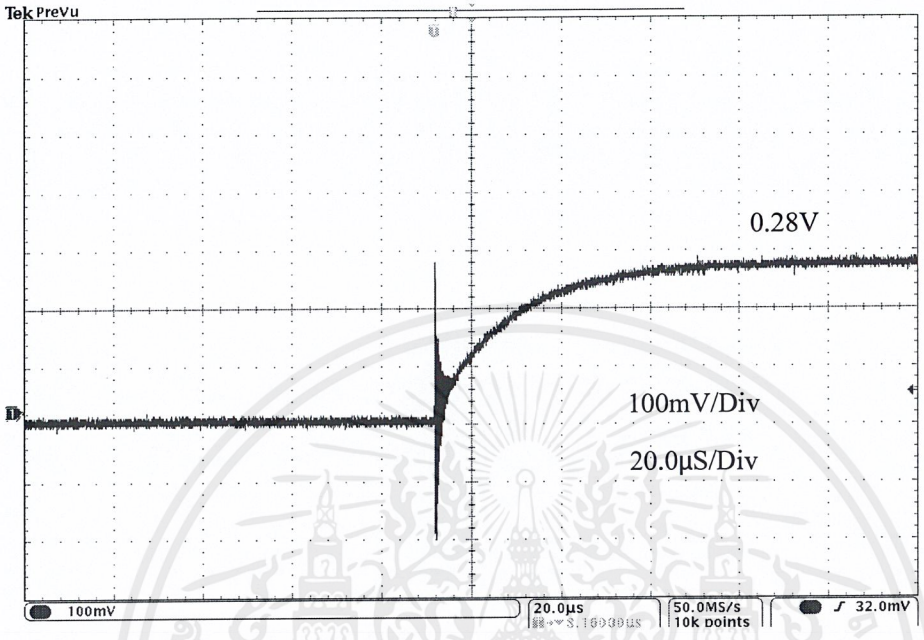
รูปที่ 4.46 ต่อความต้านทานสมคู่ 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

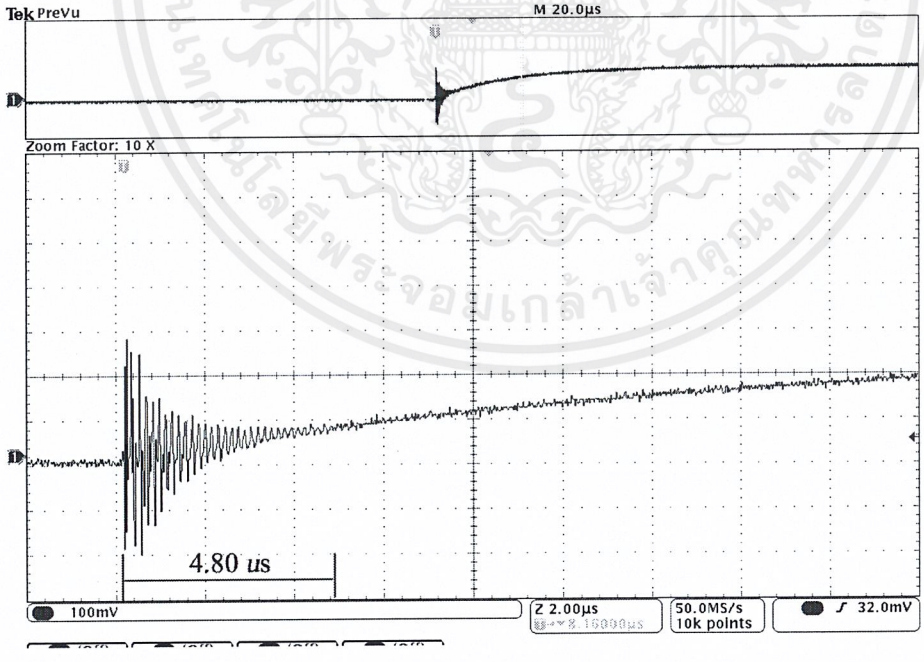
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 2.7nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 10 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

ใช้สายเคเบิล RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω (matching ถูก)



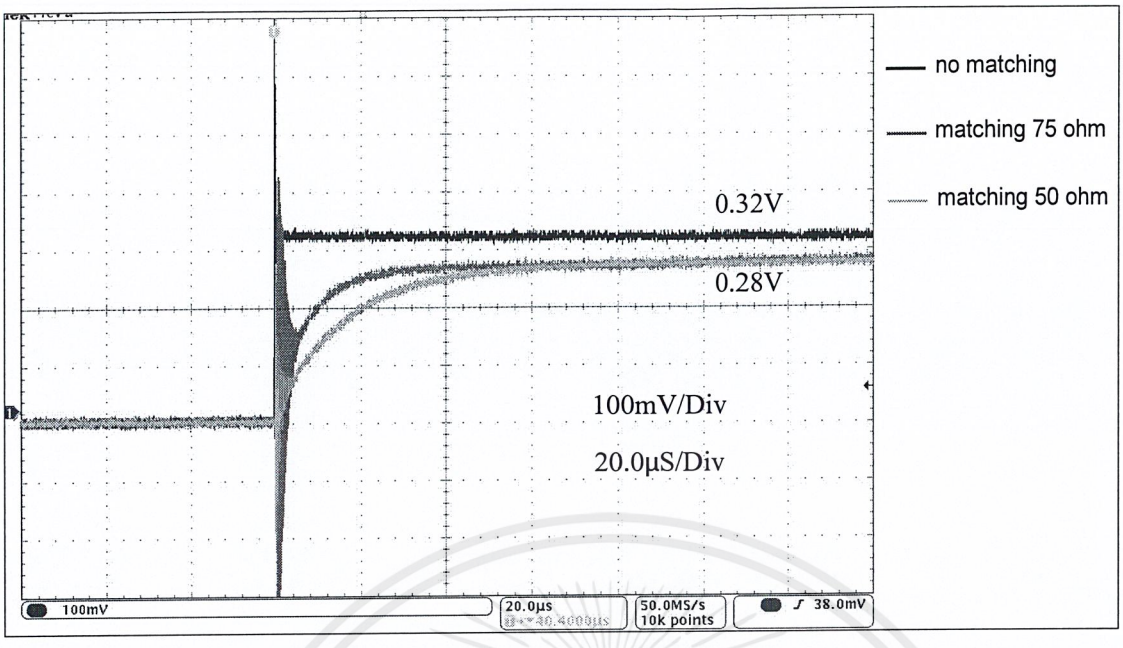
ก) time/div 20 μ s/div



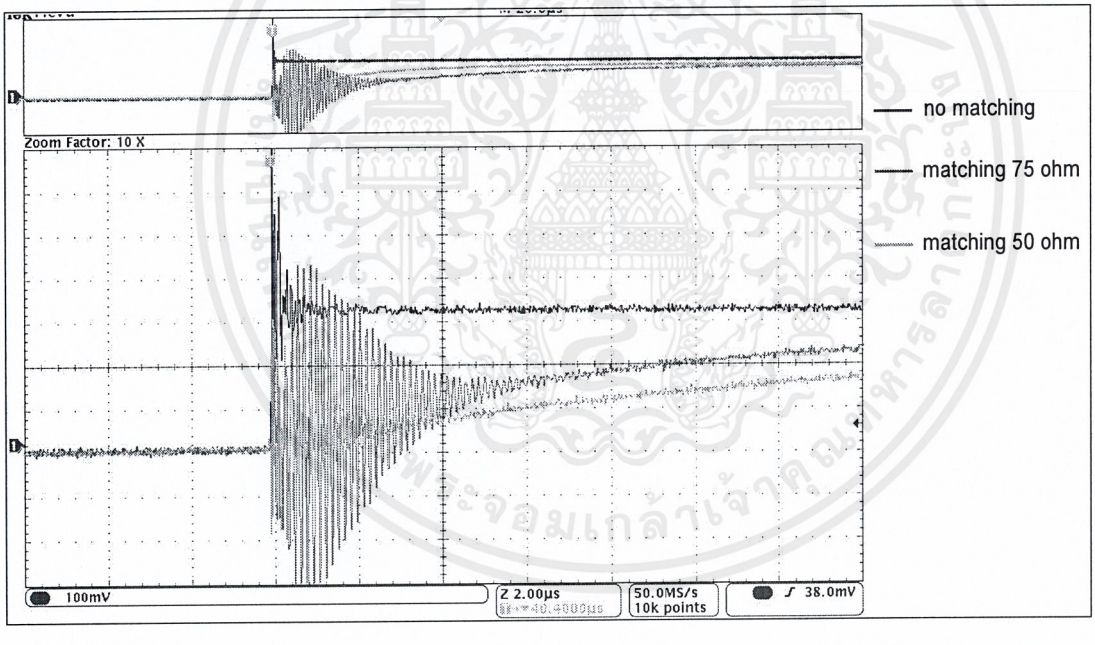
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.47 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



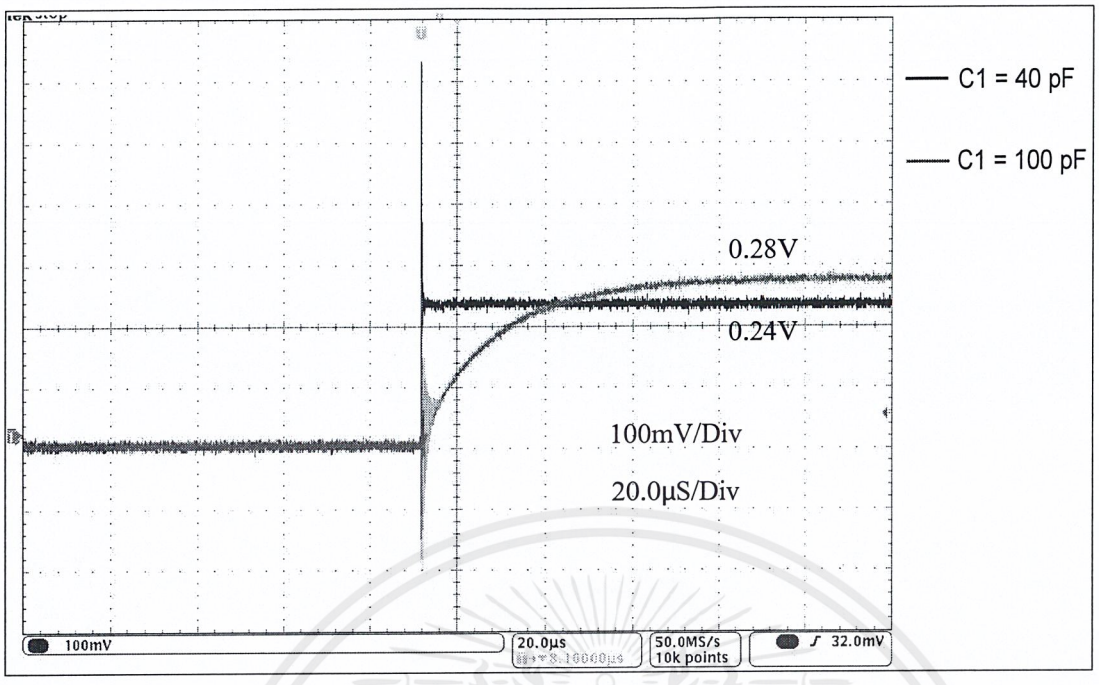
ก) time/div 20 μ s/div



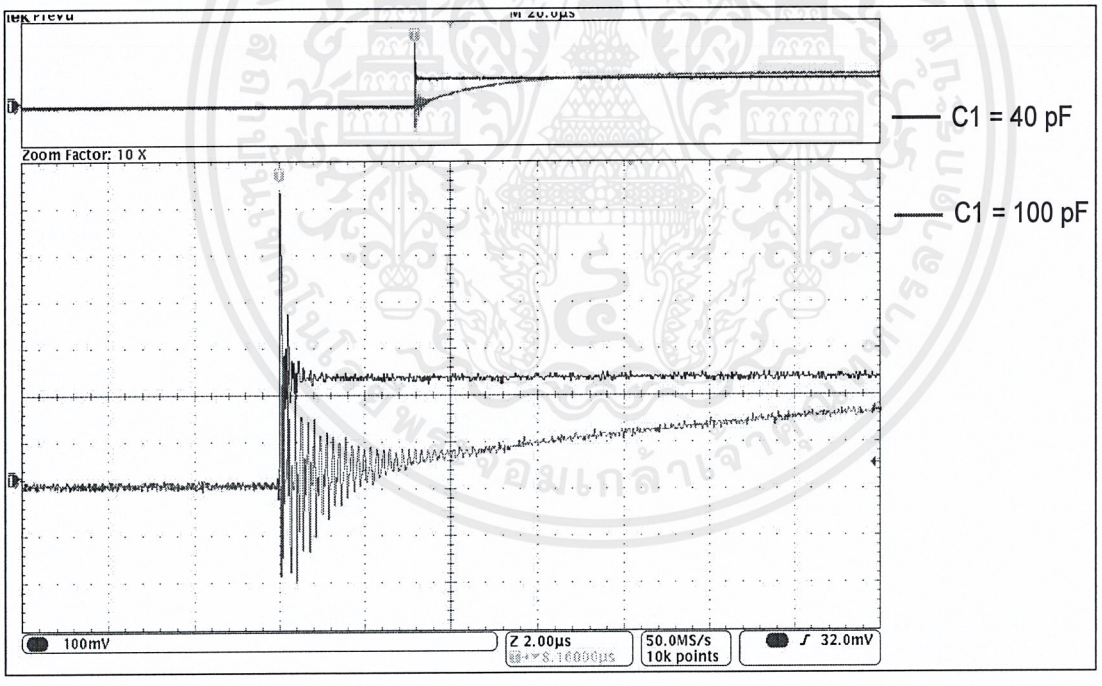
ข) time/div 20 μ s/div

รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบต่อความต้านทานสมคู่ค่าต่างๆ (เคเบิล RG-8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบระหว่าง $C_1 \approx 40$ pF และ $C_1 \approx 100$ pF ใช้สาย RG-8 ต่อความต้านทานสมคู่ 50 Ω

- จากผลการทดลอง แบบเลือกใช้ $C_1 \approx 40$ pF นั้น จะได้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดีกว่า แบบเลือกใช้$C_1 \approx 100$ pF ดังนั้น จะเลือกใช้แบบ $C_1 \approx 40$ pF เพื่อนำไปศึกษาผลกระทบที่เกิดจากกรณีศึกษา อื่นๆ ต่อไป

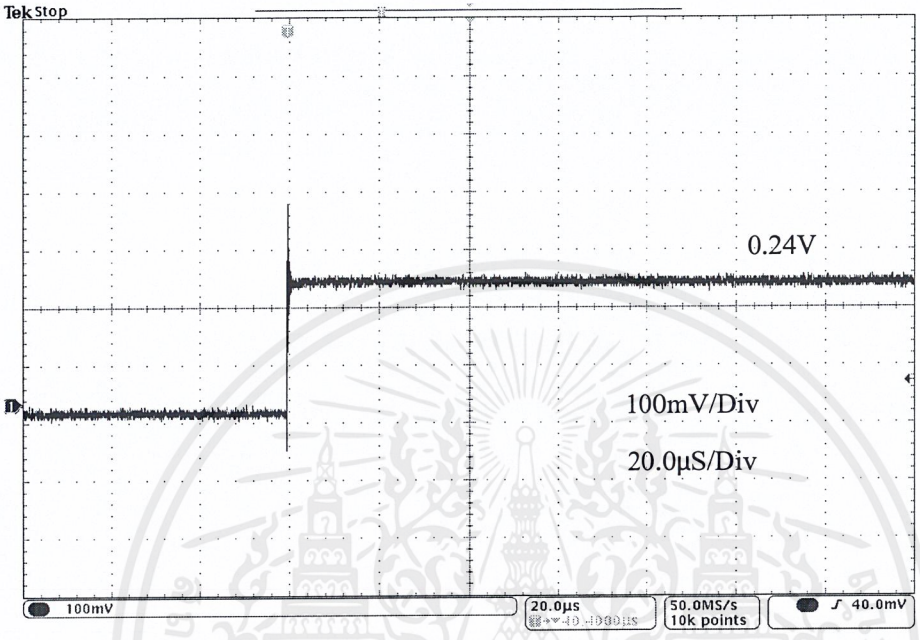
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากความเหนี่ยวนำ (เลือกค่า $C_1 \approx 40$ pF, $C_2 \approx 40$ nF)

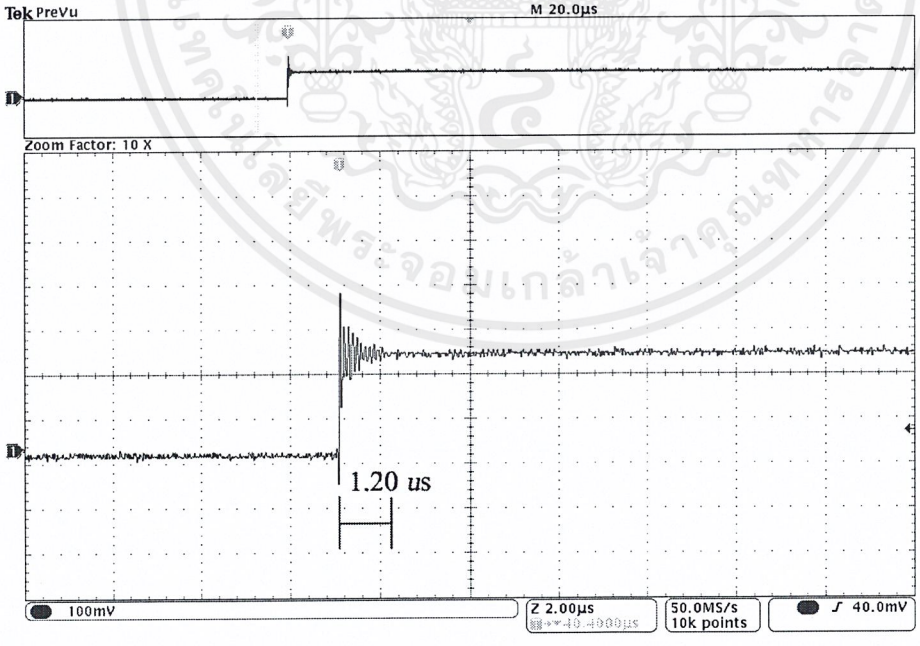
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μ H



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

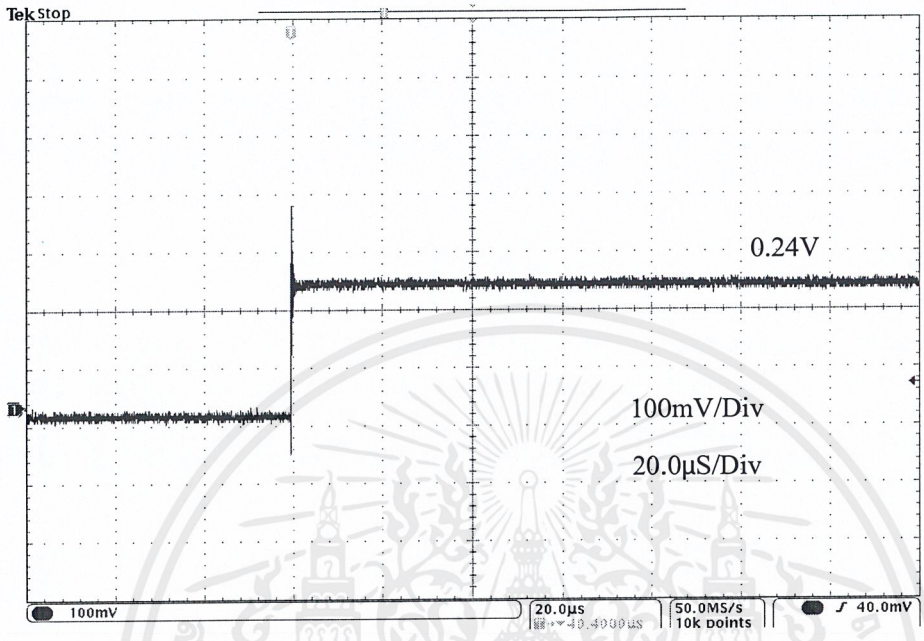
รูปที่ 4.50 มี L ที่ด้าน high volt 1 μ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

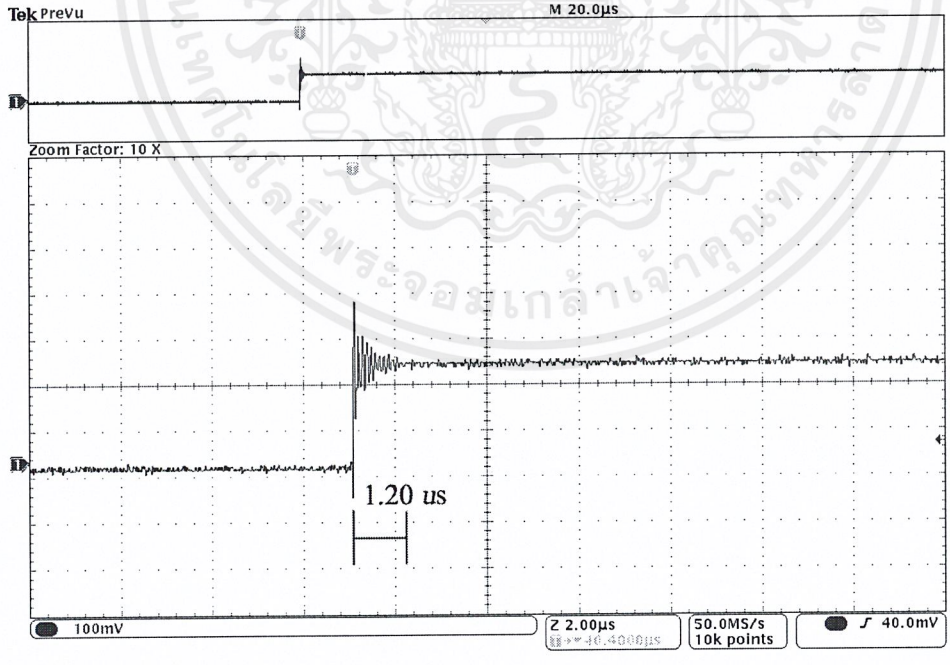
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μ H



ก) time/div 20 μ s/div



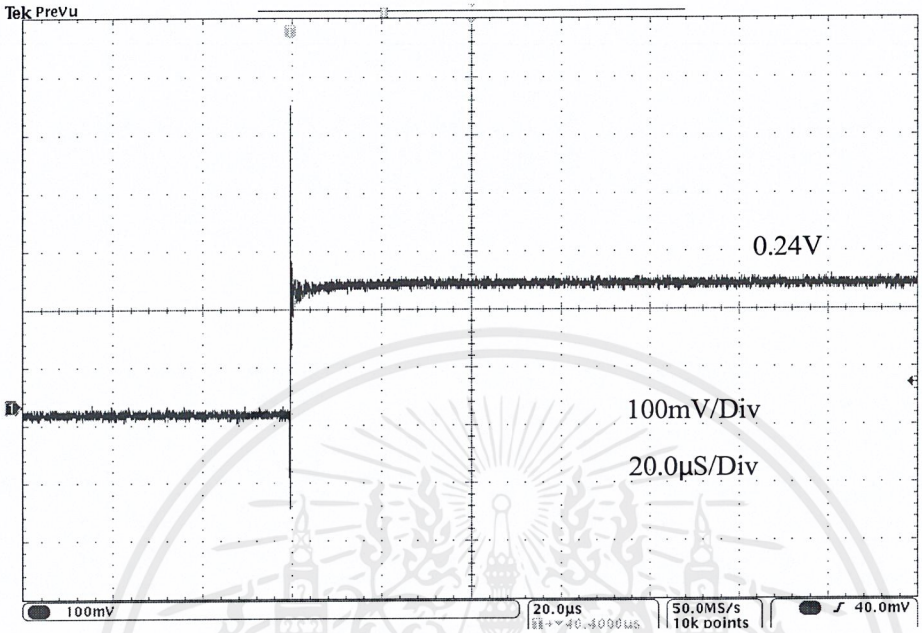
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.51 มี L ที่ด้าน high volt 3 μ H

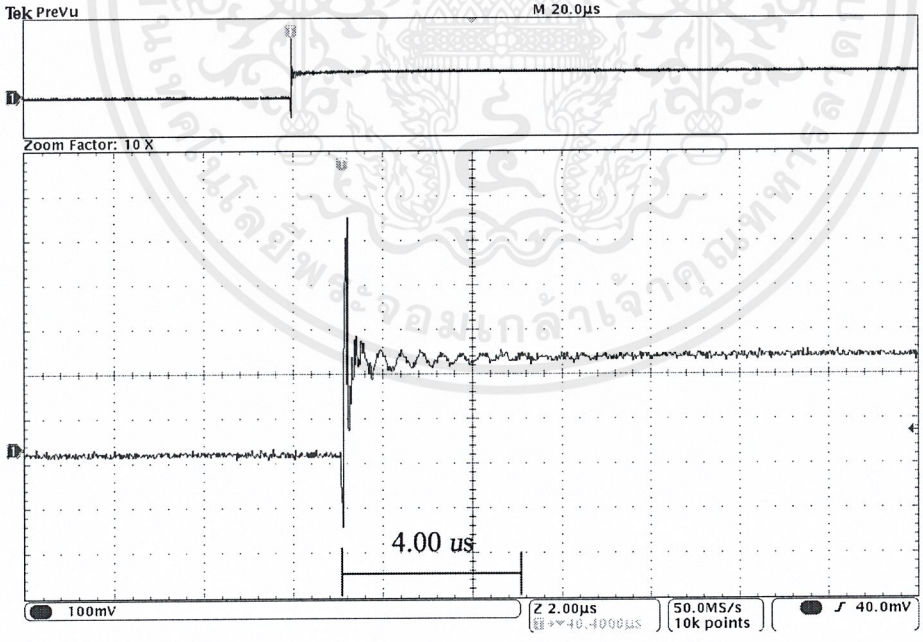
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μ H



ก) time/div 20 μ s/div



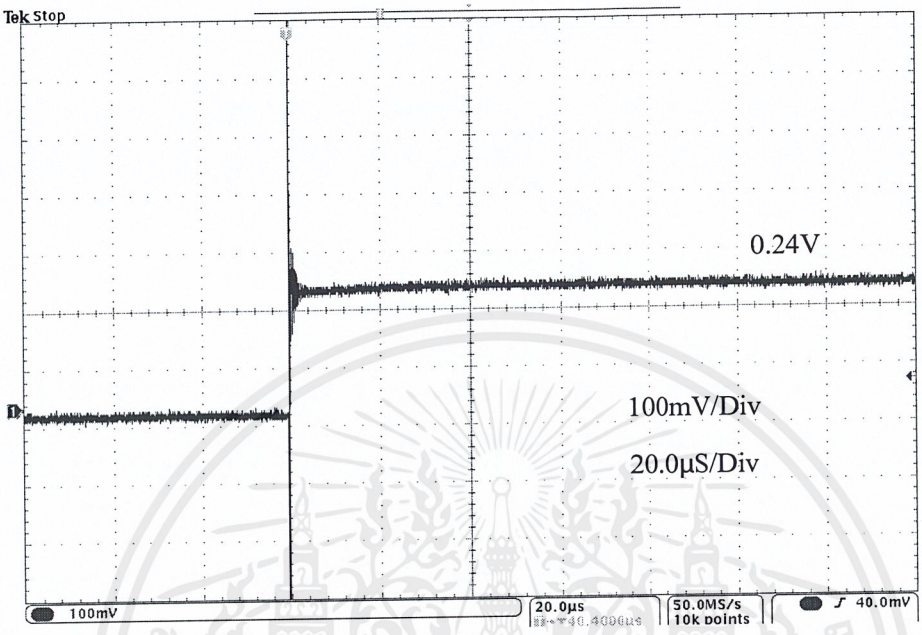
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.52 มี L ที่ด้าน low volt 1 μ H

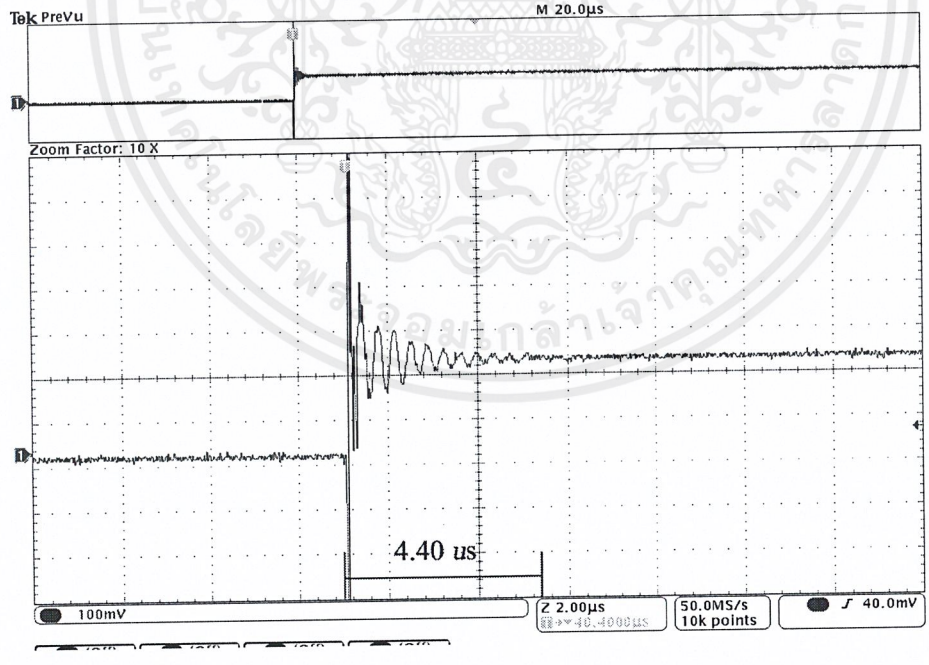
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH



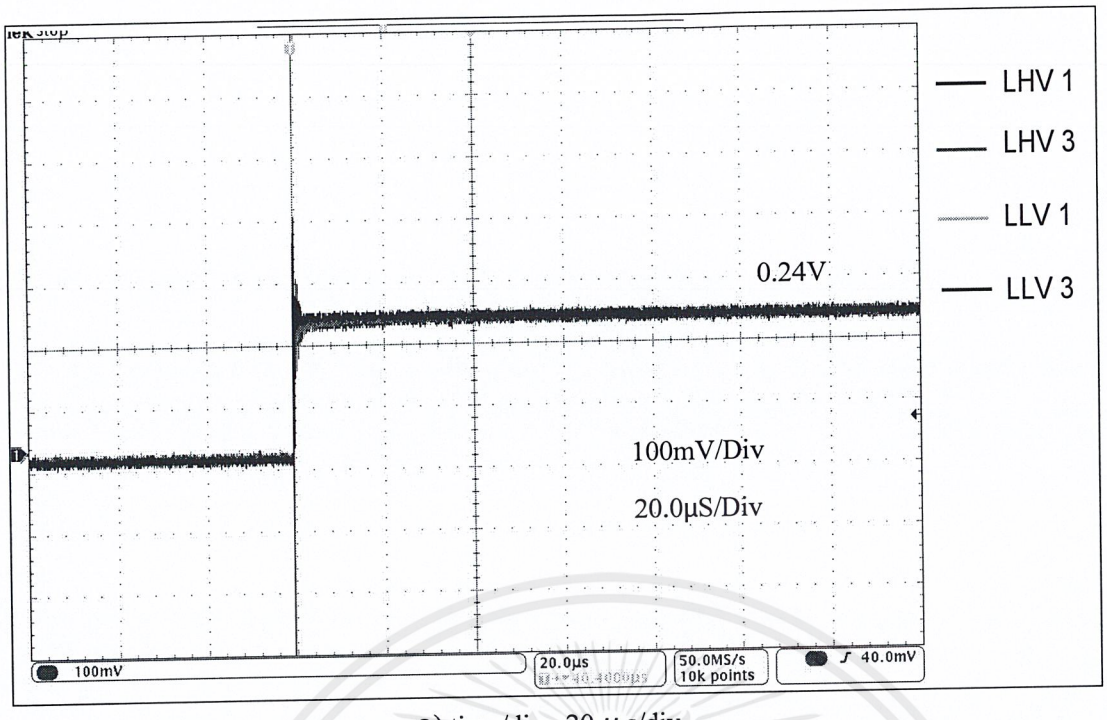
ก) time/div 20 μ s/div



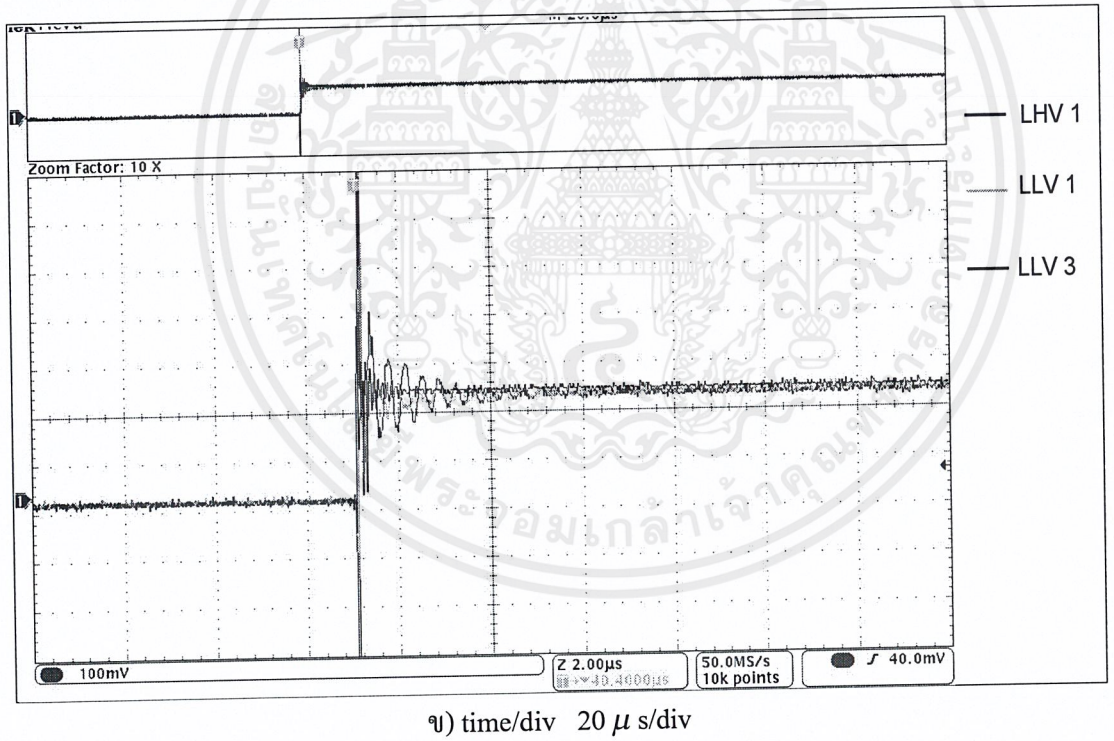
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.53 มี L ที่ด้าน low volt 3 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 20 μ s/div

รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำค่าต่างๆ

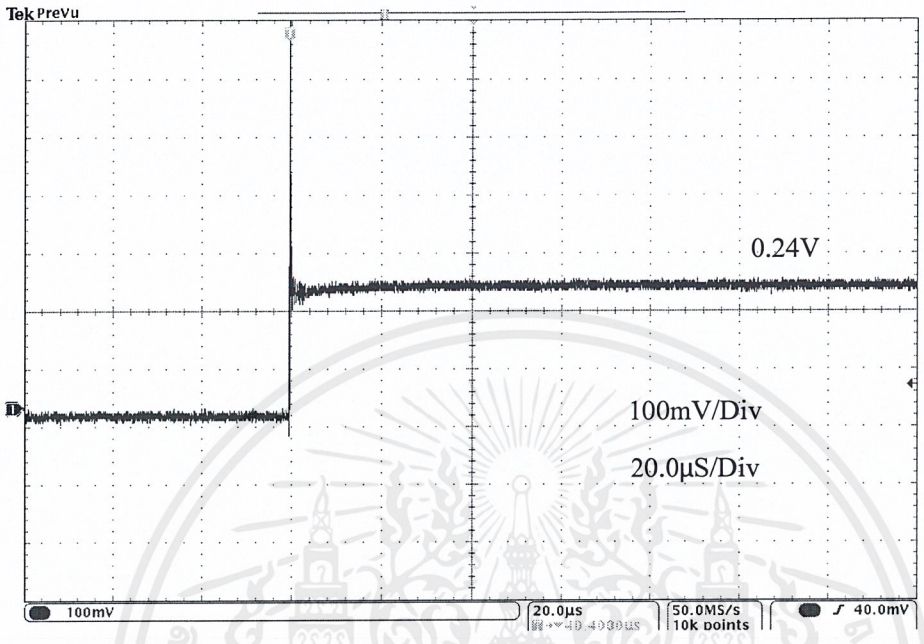
- จากการทดลอง ถ้าเกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นในปริมาณที่เท่ากัน ที่ภาคแรงต่ำนั้นจะเกิดผลกระทบ ต่อผลตอบสนองรูปขั้นมากกว่าและออสซิเลทจะเพิ่มขึ้นตามขนาดความเหนี่ยวนำที่เกิด แต่จาก ผลการ Simulate ถ้าเกิดความเหนี่ยวนำในอัตราส่วนเดียวกับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ (1001:1) ผลกระทบจากการเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำและแรงสูงนั้นจะมีค่าเท่าๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

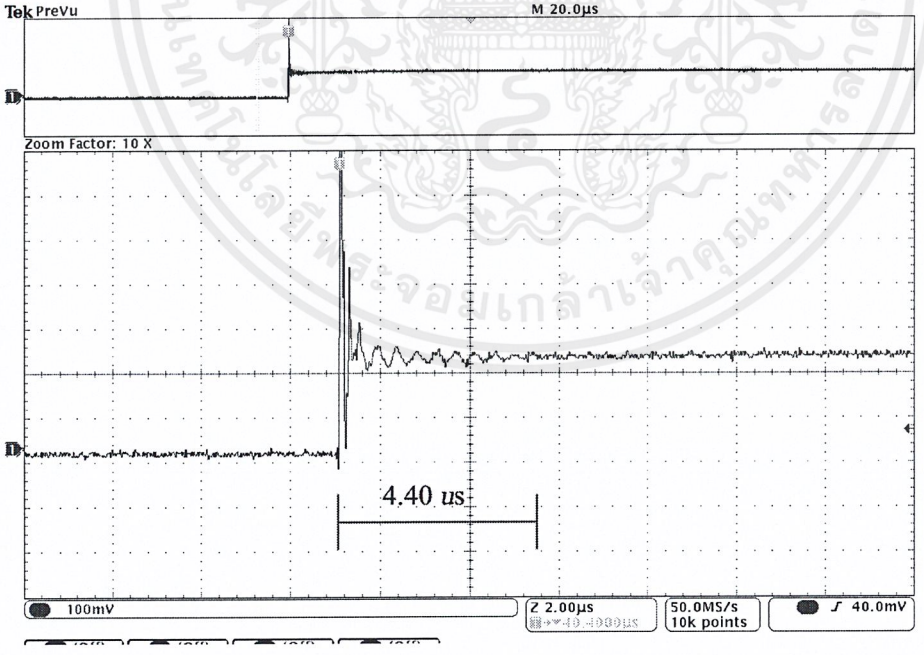
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μ Hและภาคแรงต่ำ 1 μ H



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

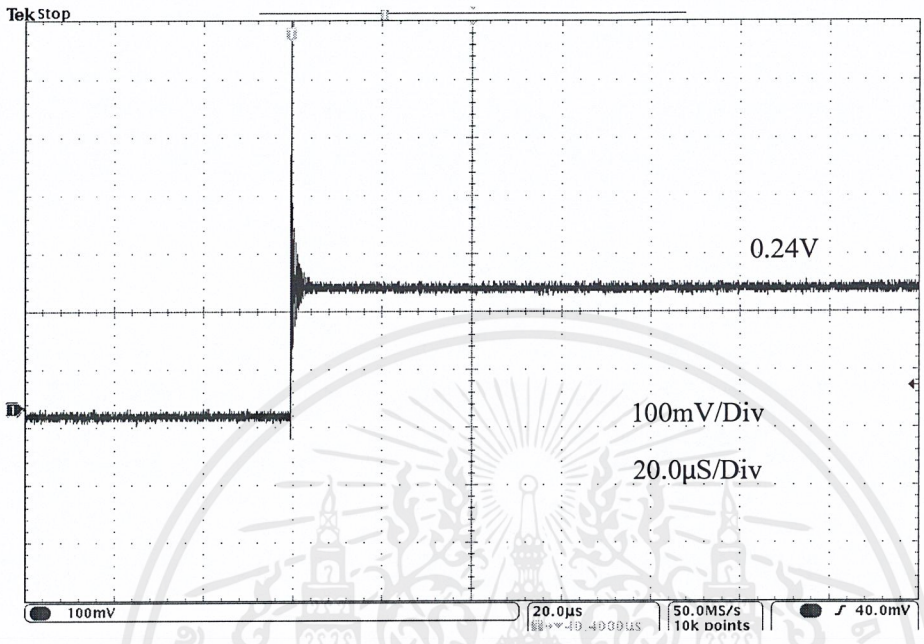
รูปที่ 4.55 มี L ที่ด้าน low volt 1 μ H และ high volt 1 μ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

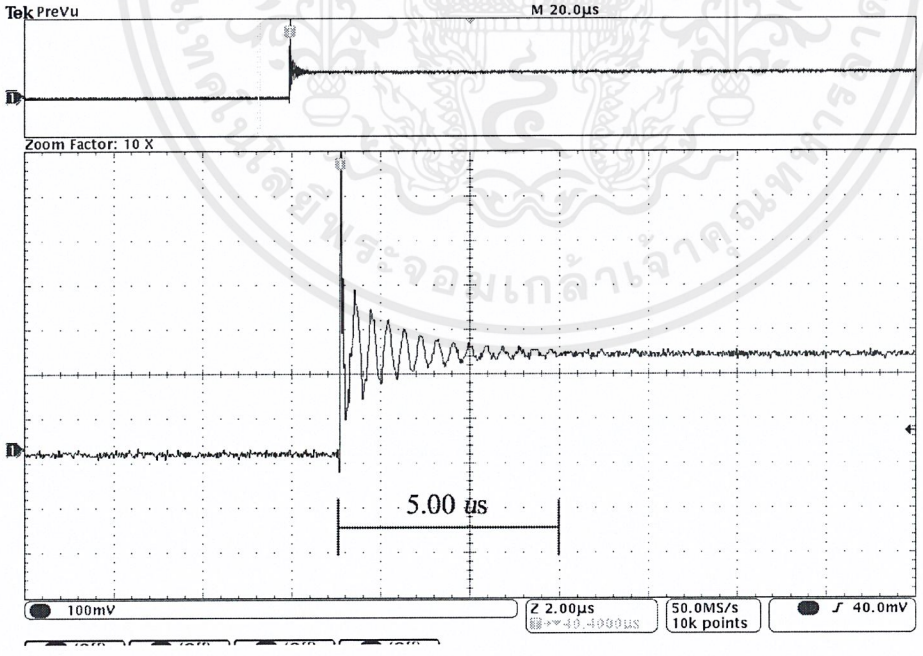
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 27 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 27 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 3.9 nF จำนวน 10 ตัว (ใช้ C = 3.9 nF ต่อขนานกัน 10 ตัว)

และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μ Hและภาคแรงต่ำ 3 μ H



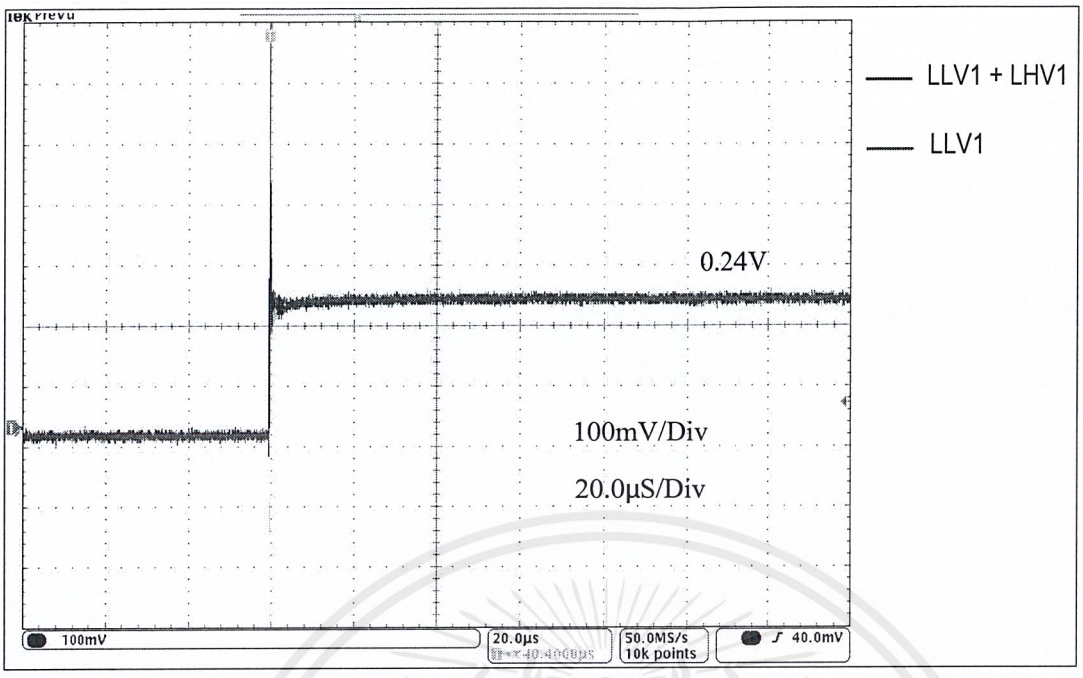
ก) time/div 20 μ s/div



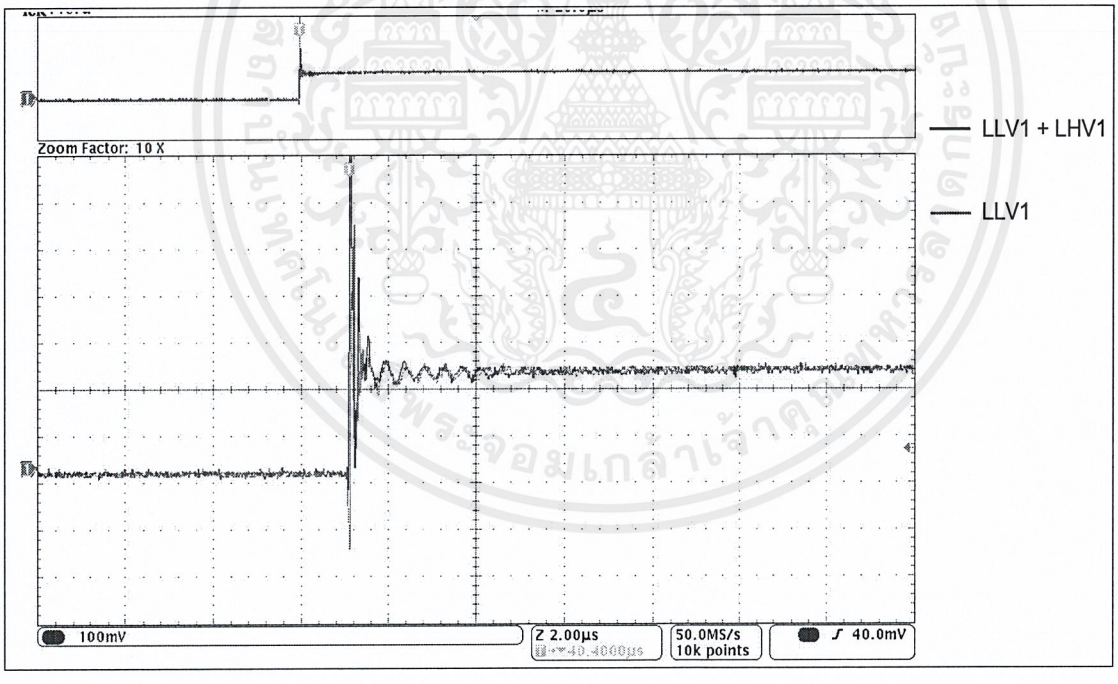
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.56 มี L ที่ด้าน low volt 3 μ H และ high volt 3 μ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.57 เปรียบเทียบมี L ที่ LV และ HV อย่างละ 1 μH กับ กับมี L ที่ LV 1 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 C-divider ที่มีการกระจายค่า R เข้าไป อัตราส่วนแรงดัน 1001:1

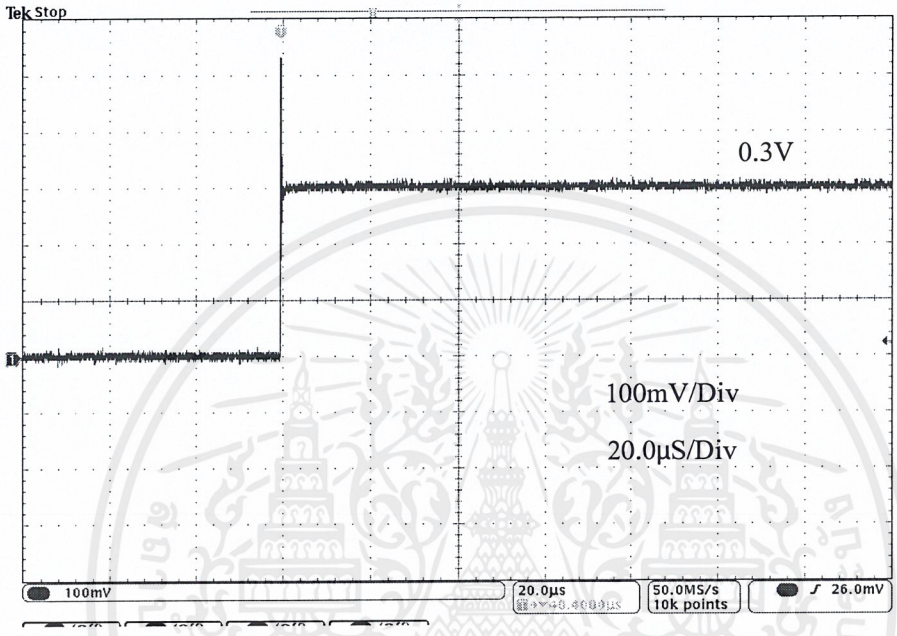
4.2.3.1 $C_1 \approx$ 66 pF(ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว) mix R= 5 kΩ (ใช้ R = 330 Ω 15 ตัว)

$C_2 \approx$ 66 nF (ใช C = 10nFต่อขนาน 7 ตัว) mix R= 5 Ω (ใช้ R = 15 Ω 3 ตัว)

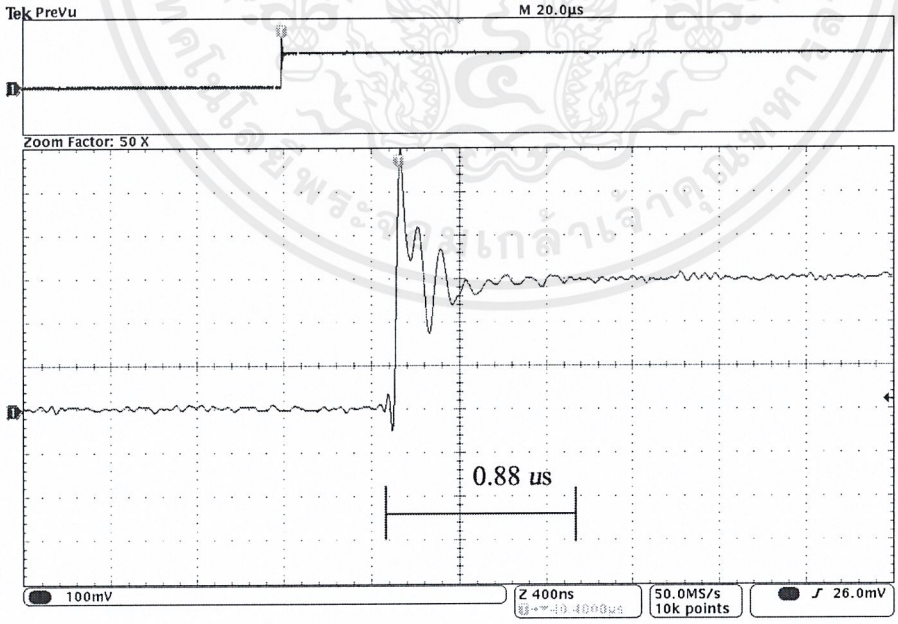
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 kΩ

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 Ω

การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400ns/div

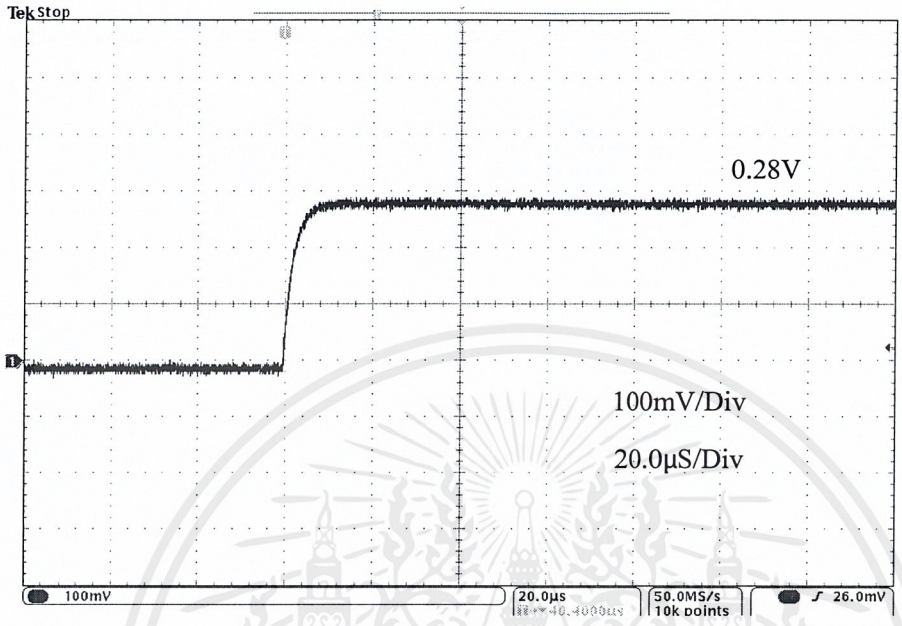
รูปที่ 4.58 ต่อ MIX R แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

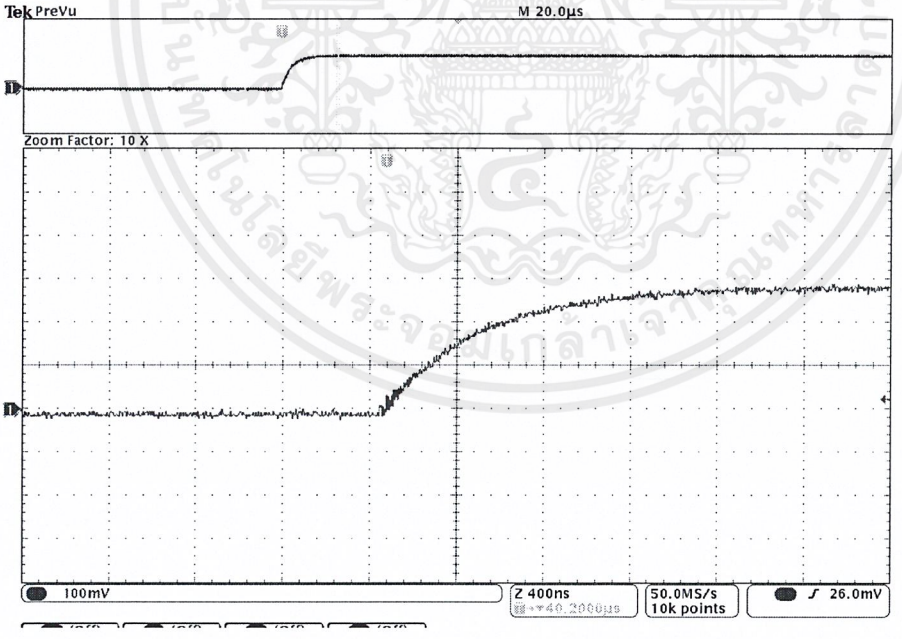
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 kΩ

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 5 Ω

การกระจายความต้านทานเป็นแบบอนุกรม



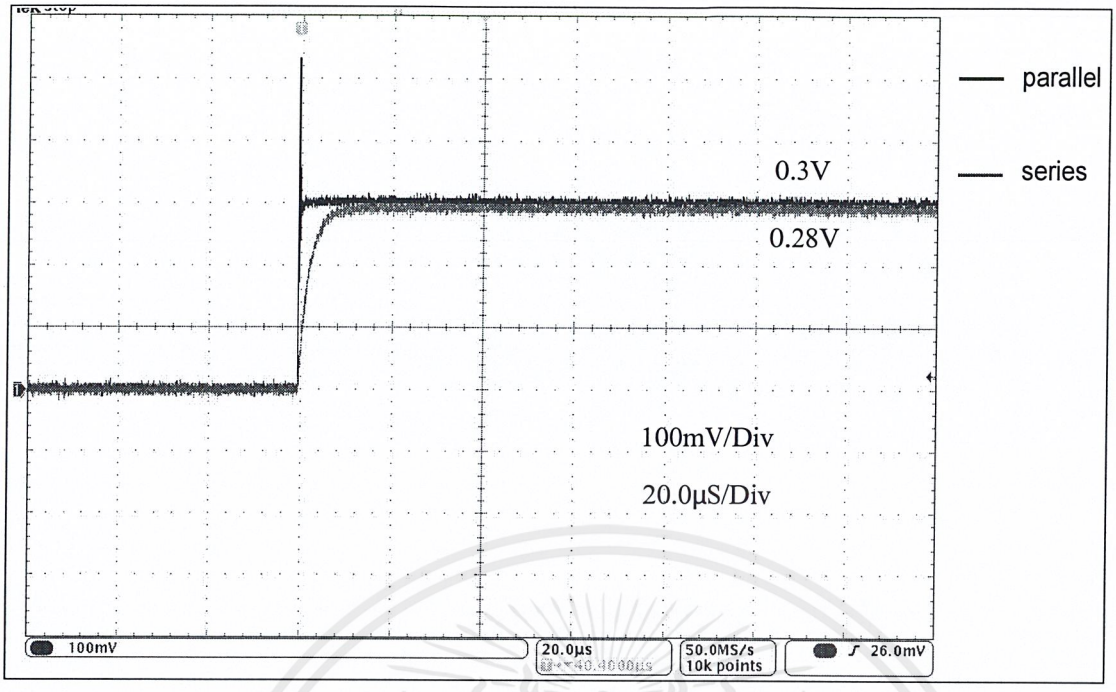
ก) time/div 20 μ s/div



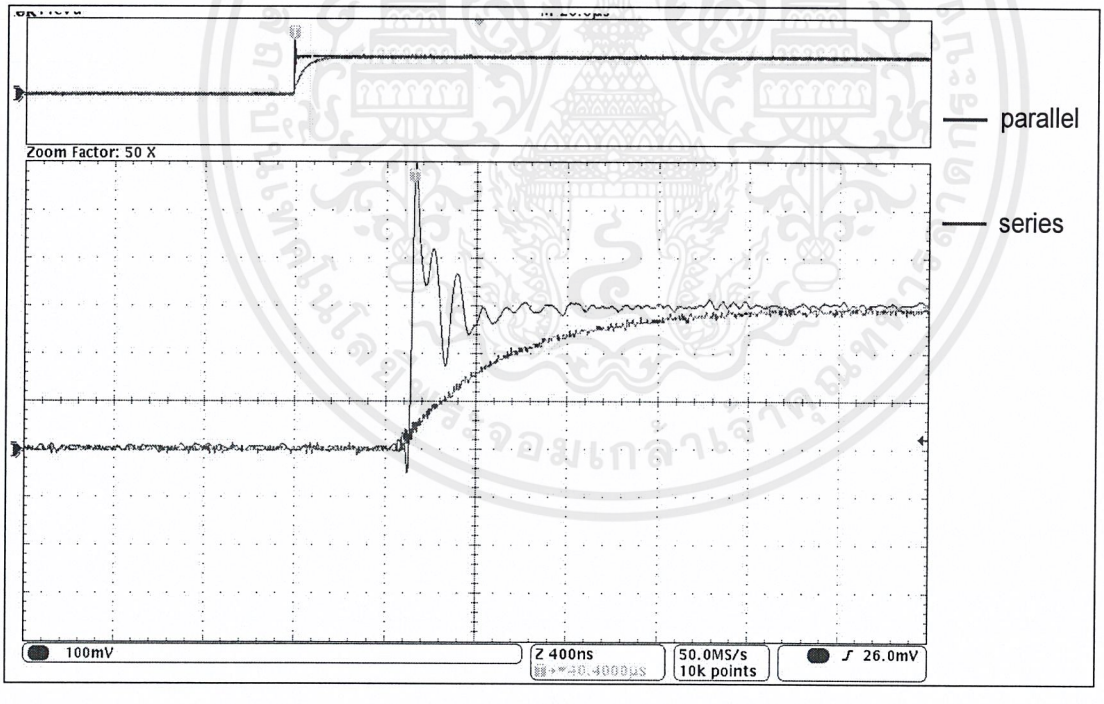
ข) time/div 400ns/div

รูปที่ 4.59 ต่อ MIX R แบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400ns/div

รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบอนุกรมและแบบขนาน

- จากการทดลอง การกระจาย R แบบอนุกรมนั้น ลดการเกิดออสซิเลทได้ดีกว่าการกระจาย R แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

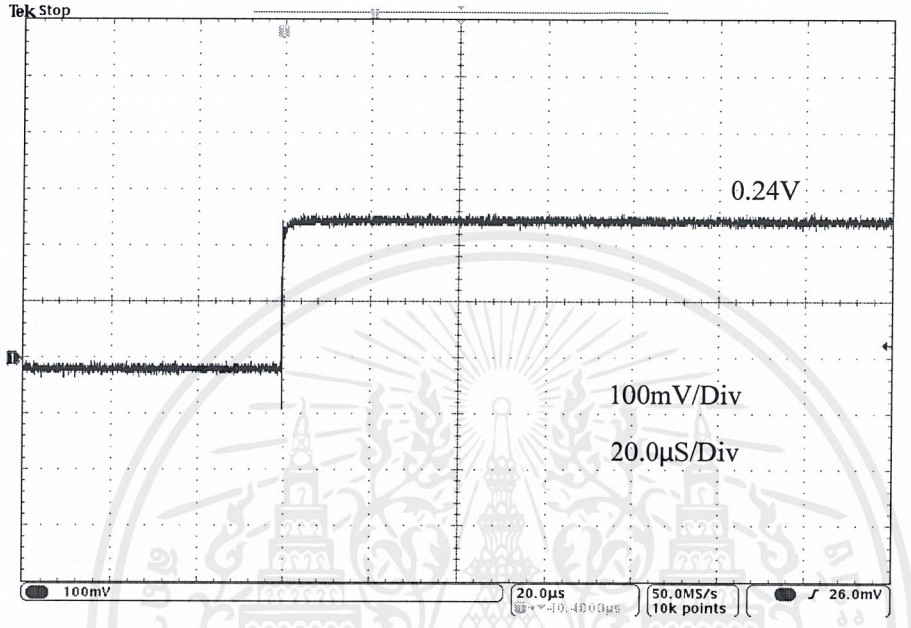
4.2.3.2 $C_1 \approx 66$ pF(ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว) mix R= 11 kΩ (ใช้ R = 2.2kΩ 5 ตัว)

$C_2 \approx 66$ nF(ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว) mix R= 10 Ω (ใช้ R = 30 Ω 3 ตัว)

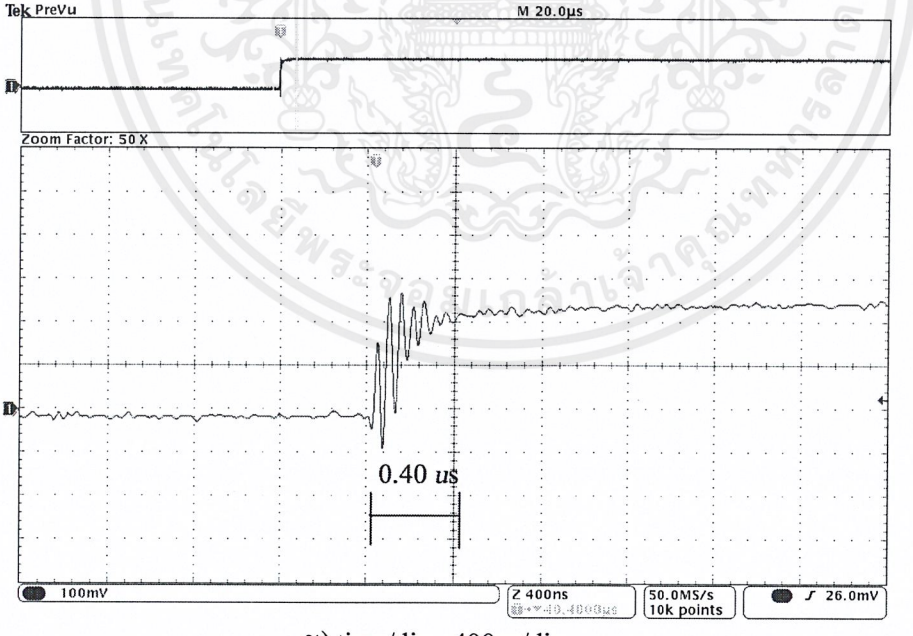
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 11 kΩ

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 10 Ω

การกระจายความต้านทานเป็นแบบอนุกรม



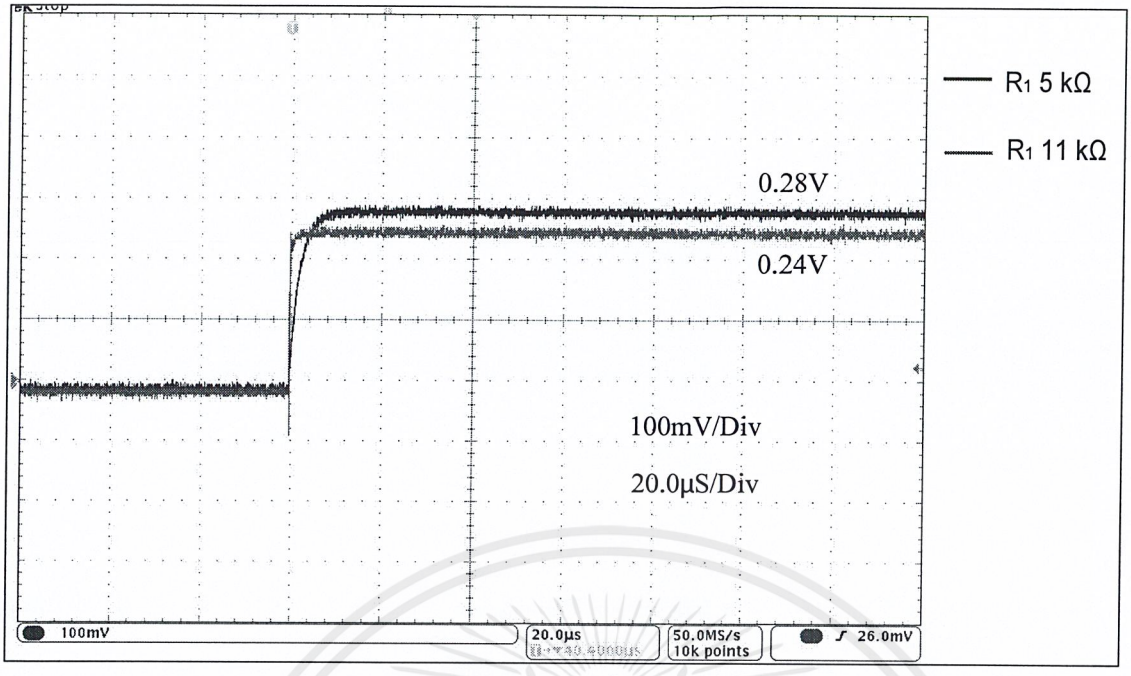
ก) time/div 20 μ s/div



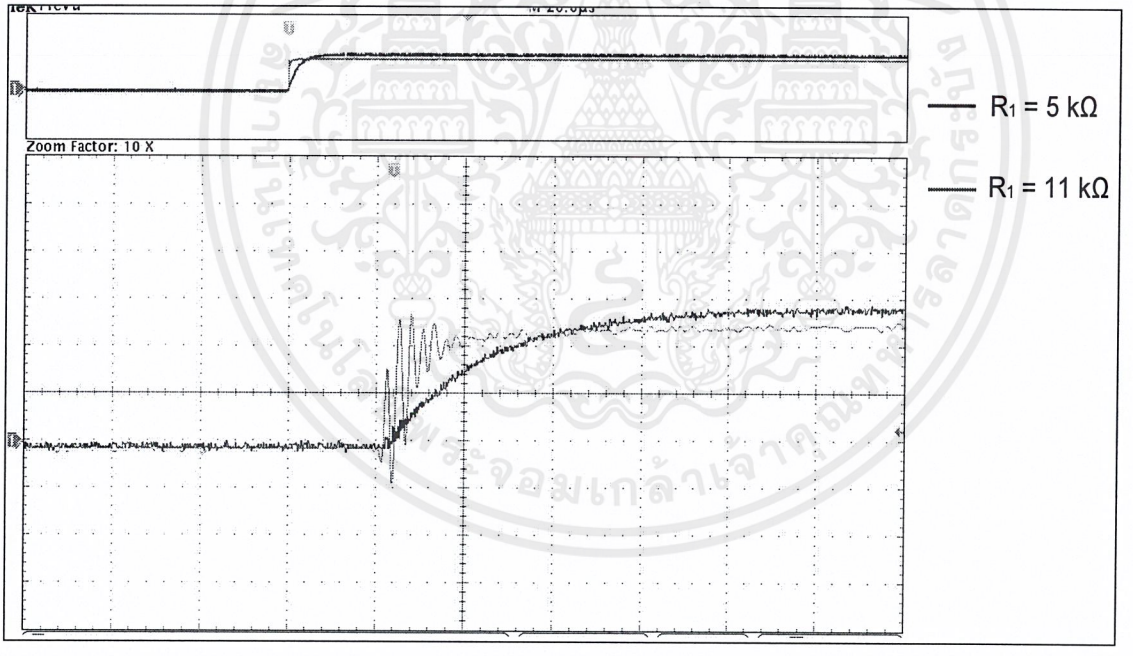
ข) time/div 400ns/div

รูปที่ 4.61 ต่อ MIX R แบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400ns/div

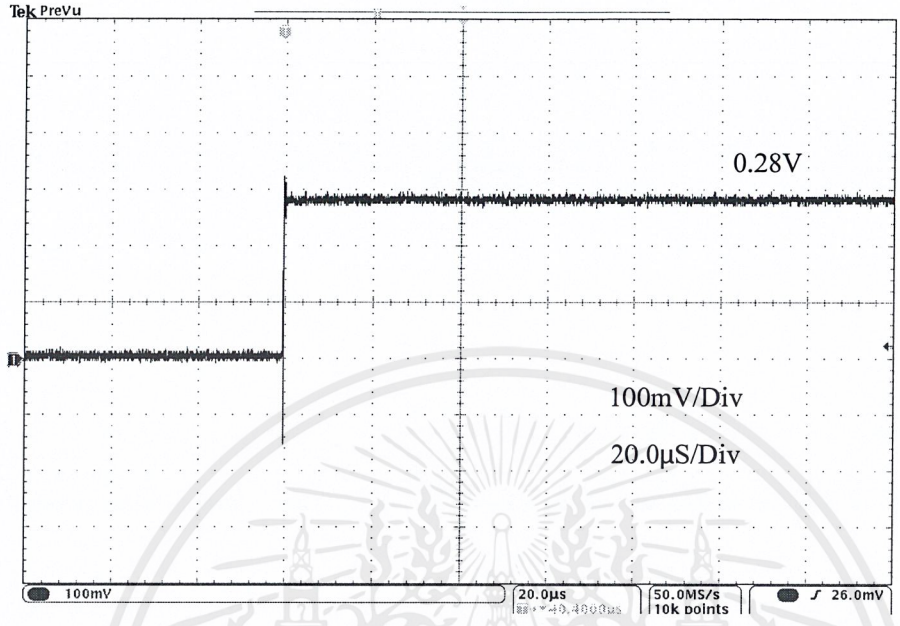
รูปที่ 4.62 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบอนุกรม R_1 = 5 kΩ กับ 11 kΩ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

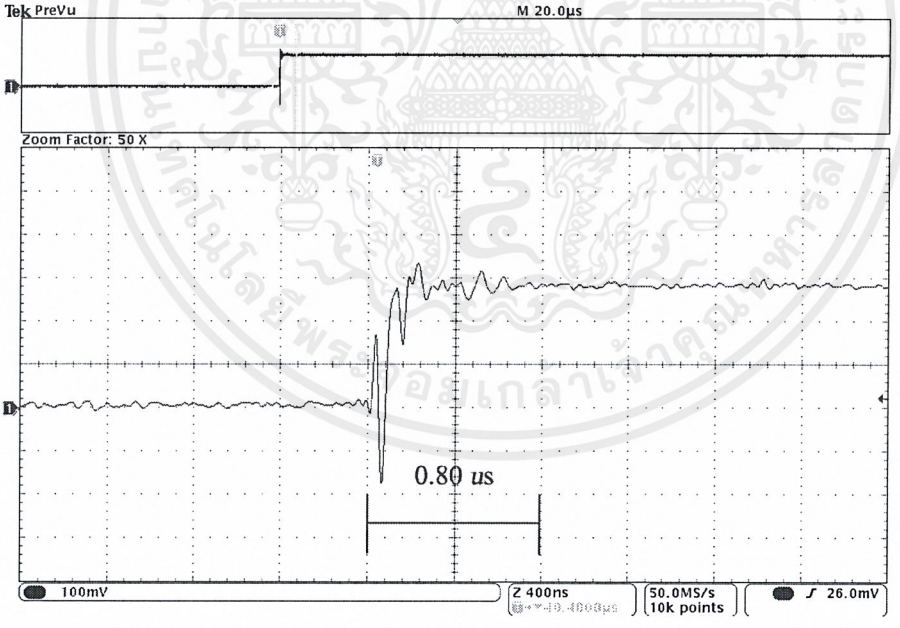
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 10 kΩ

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 10 Ω

การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน



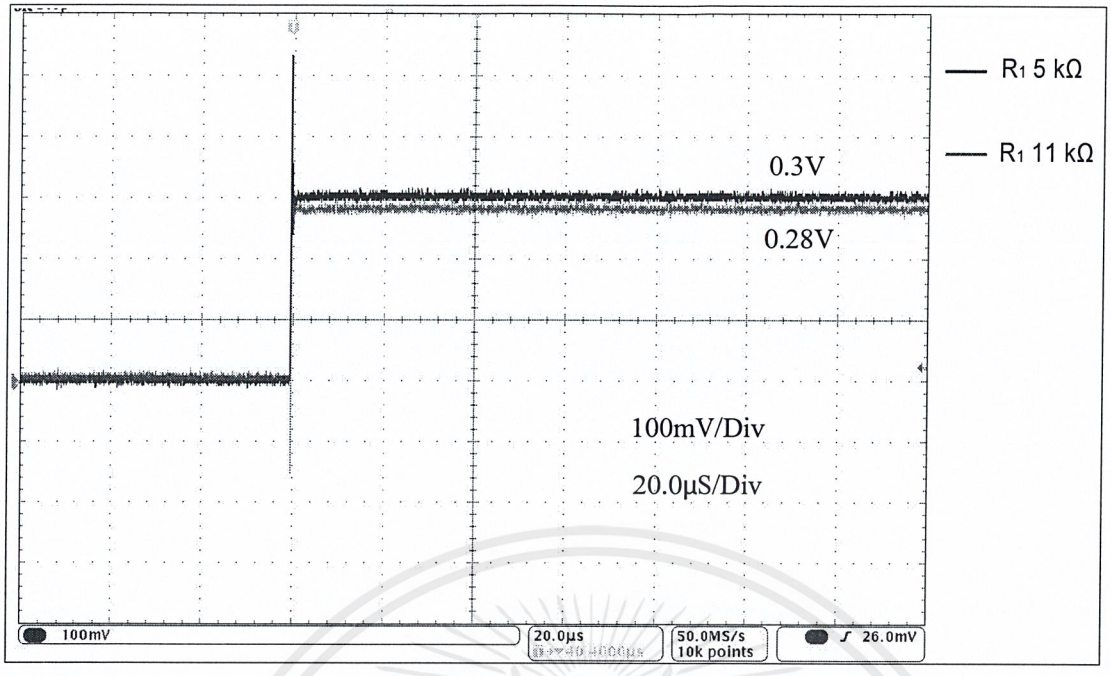
ก) time/div 20 μ s/div



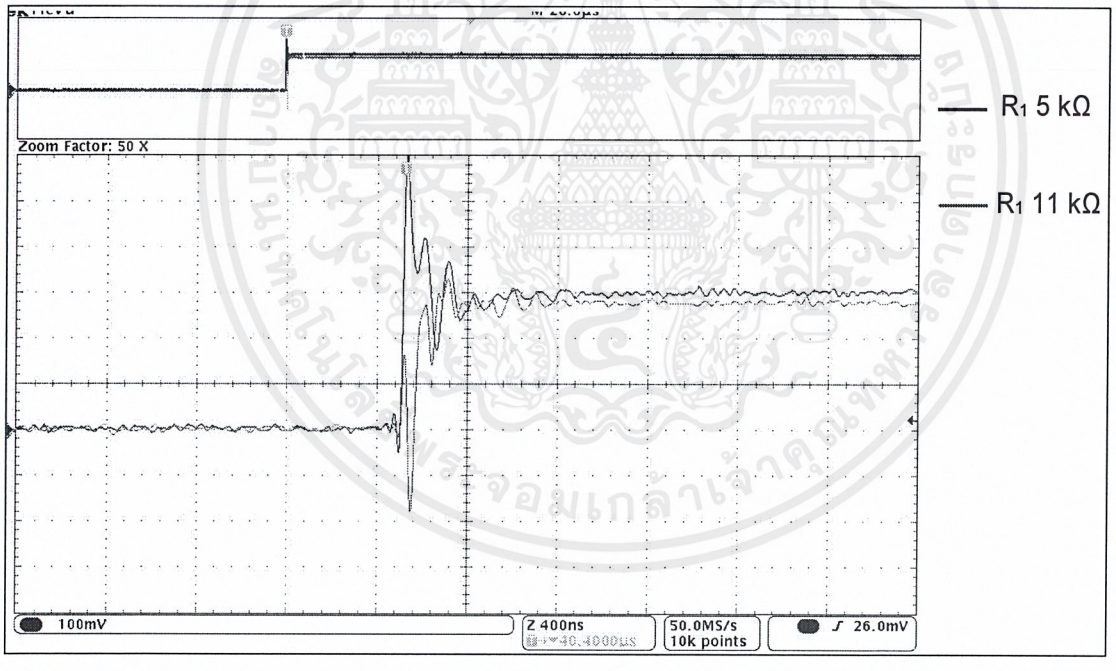
ข) time/div 400ns/div

รูปที่ 4.63 ต่อ MIX R แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400 ns/div

รูปที่ 4.64 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบขนาน R_1 = 5 kΩ กับ 11 kΩ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

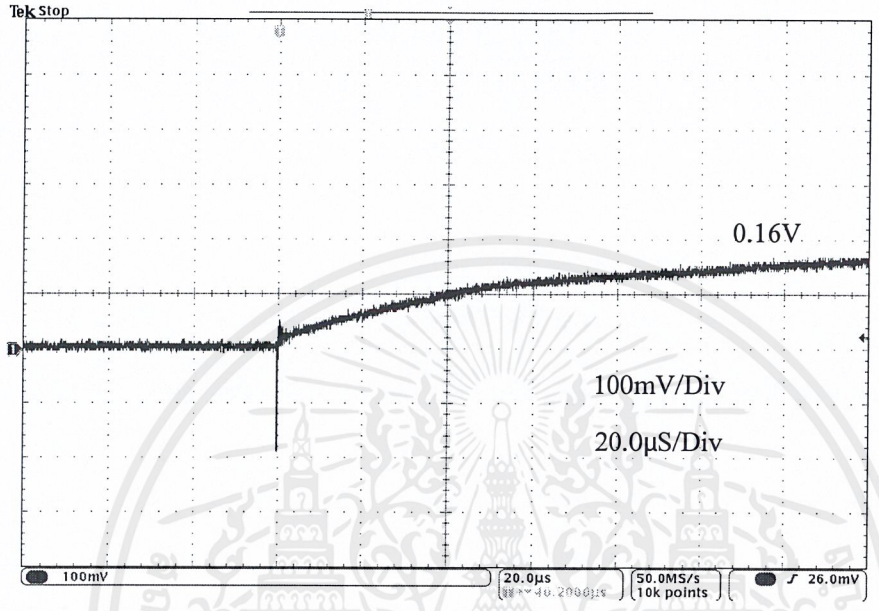
4.2.3.3 $C_1 \approx 66$ pF(ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว) mix R= 750 Ω (ใช้ R = 150 Ω 5 ตัว)

$C_2 \approx 66$ nF(ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว) mix R= 0.75 Ω (ใช้ R = 3 Ω 4 ตัว)

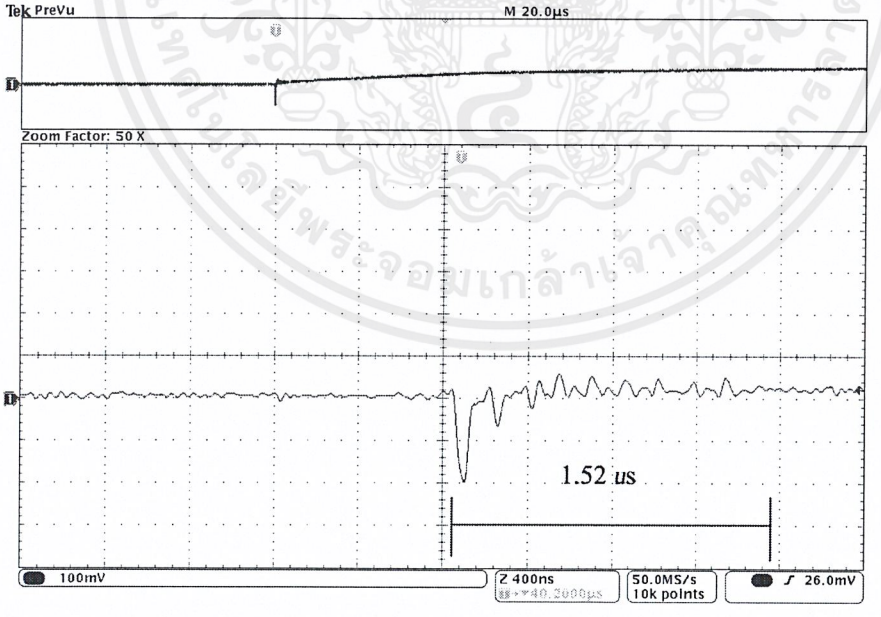
ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัวและกระจายความต้านทาน 750 Ω

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัวและกระจายความต้านทาน 0.75 Ω

การกระจายความต้านทานเป็นแบบขนาน



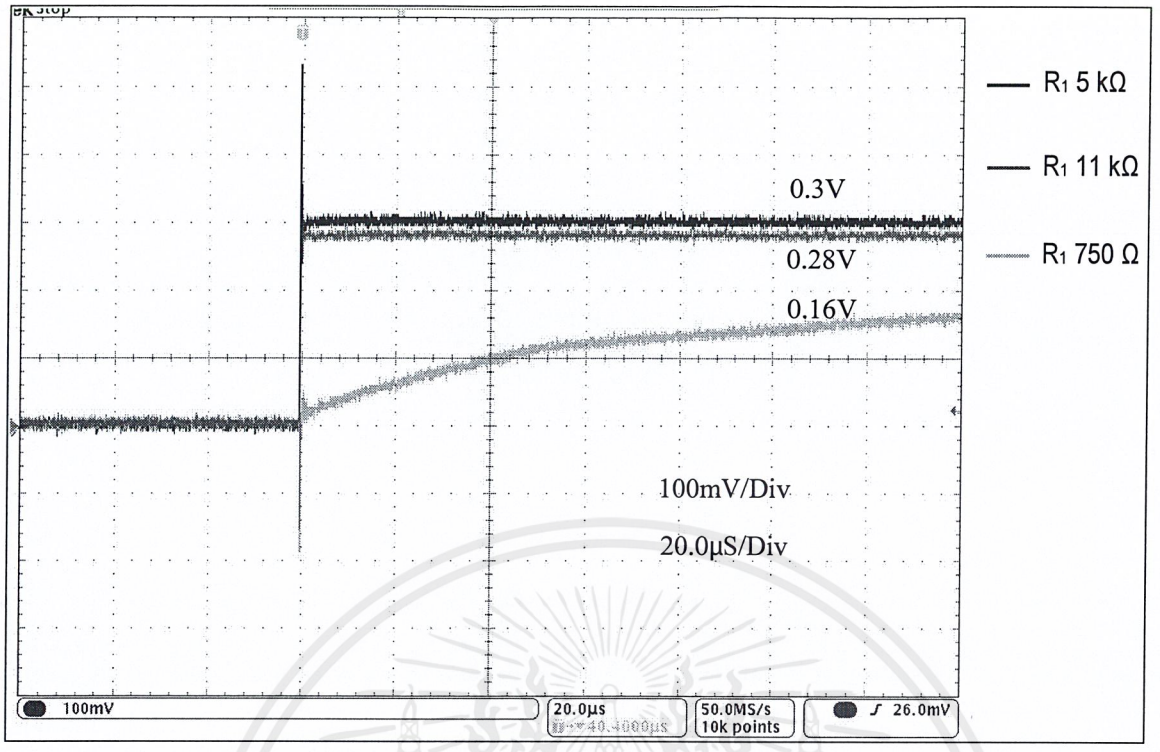
ก) time/div 20 μ s/div



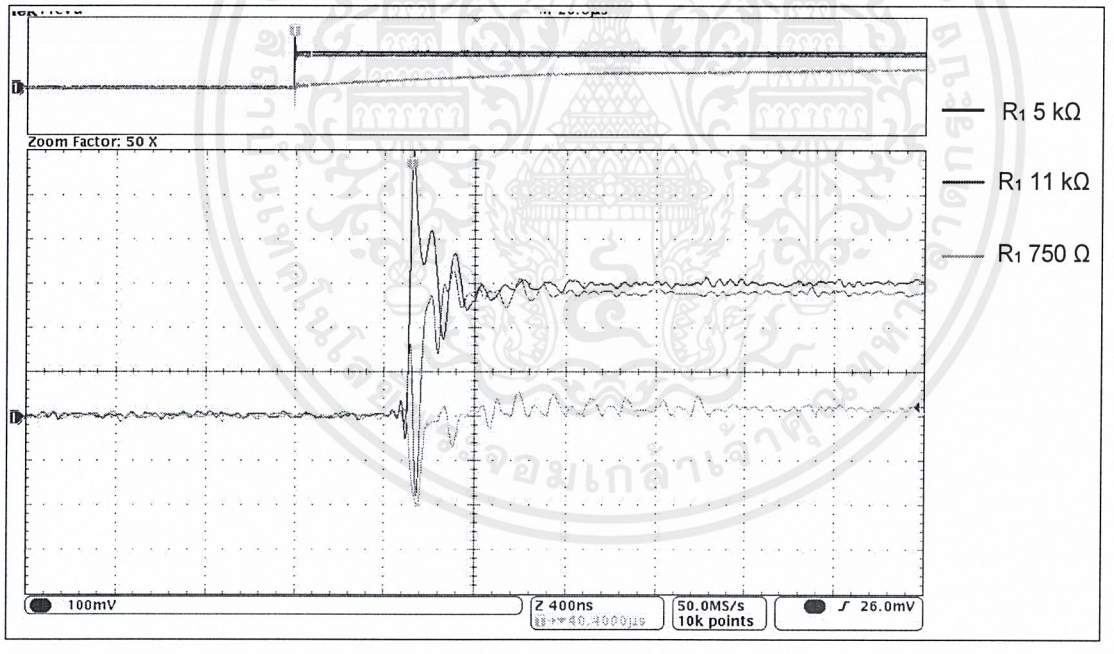
ข) time/div 400ns/div

รูปที่ 4.65 ต่อ MIX R แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 400ns/div

รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบการต่อ MIX R แบบขนาน R_1 = 5 kΩ , R_1 = 11 kΩ กับ R_1 = 750 Ω

- จากการทดลองการกระจาย R_1 = 5 kΩ ได้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดีทั้งแบบอนุกรมและขนาน ดังนั้น จะเลือกแบบใช้การกระจาย R_1 = 5 kΩ (R_2 = 5Ω) ในการศึกษาผลกระทบที่เกิด จากความเหนี่ยวนำที่มีการกระจายความต้านทานเข้าไปด้วย

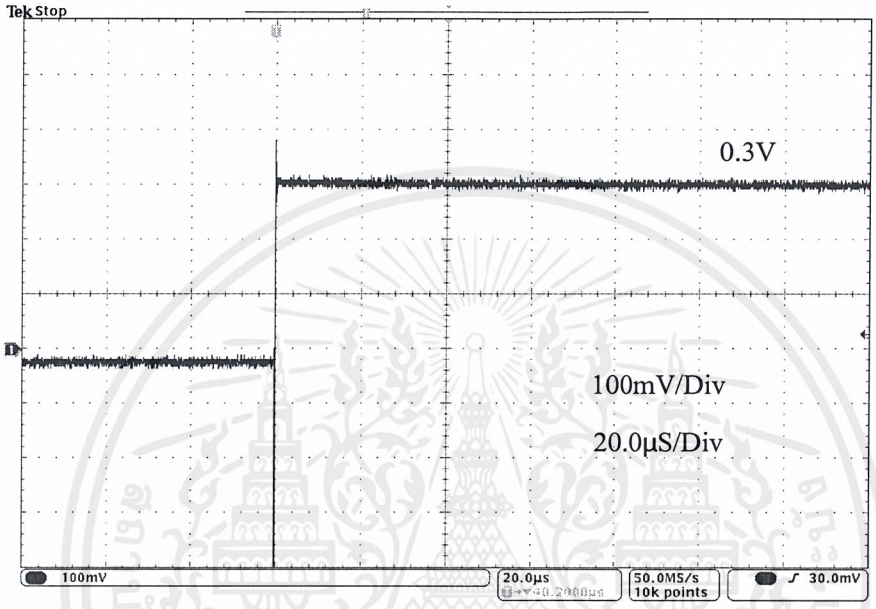
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ศึกษาผลกระทบของ C-divider ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำ และ การกระจายค่า R แบบต่าง ๆ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความเหนี่ยวนำ

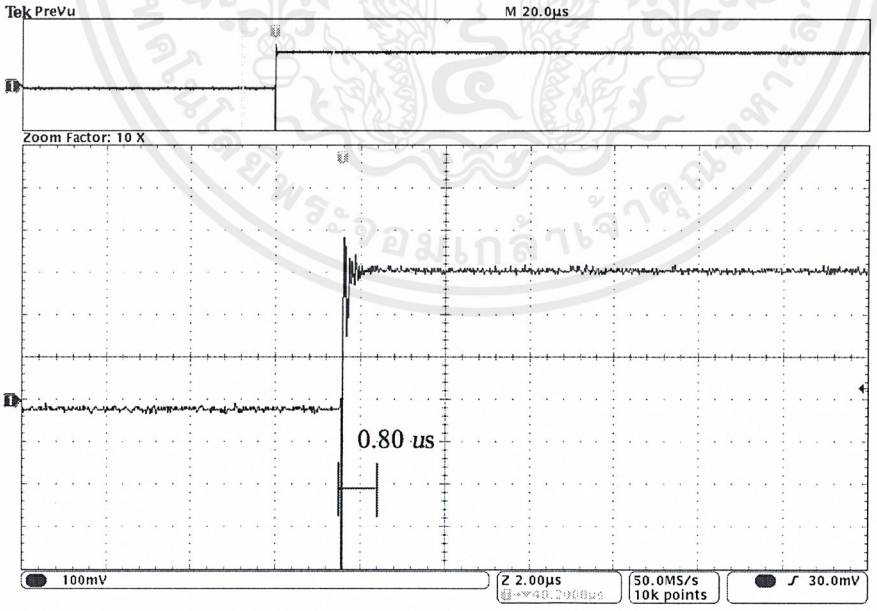
4.2.4.1 เลือกใช้ $C_1 \approx 66$ pF, $C_2 \approx 66$ nF

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว(ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว) และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH



ก) time/div 20 μ s/div



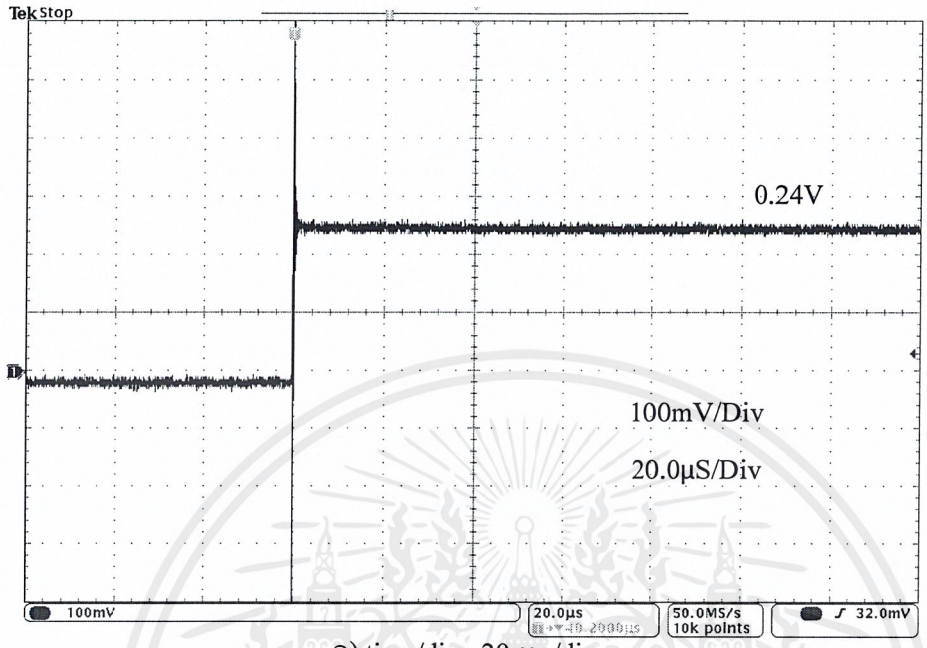
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.67 มี L ที่ด้าน high volt 1 μH

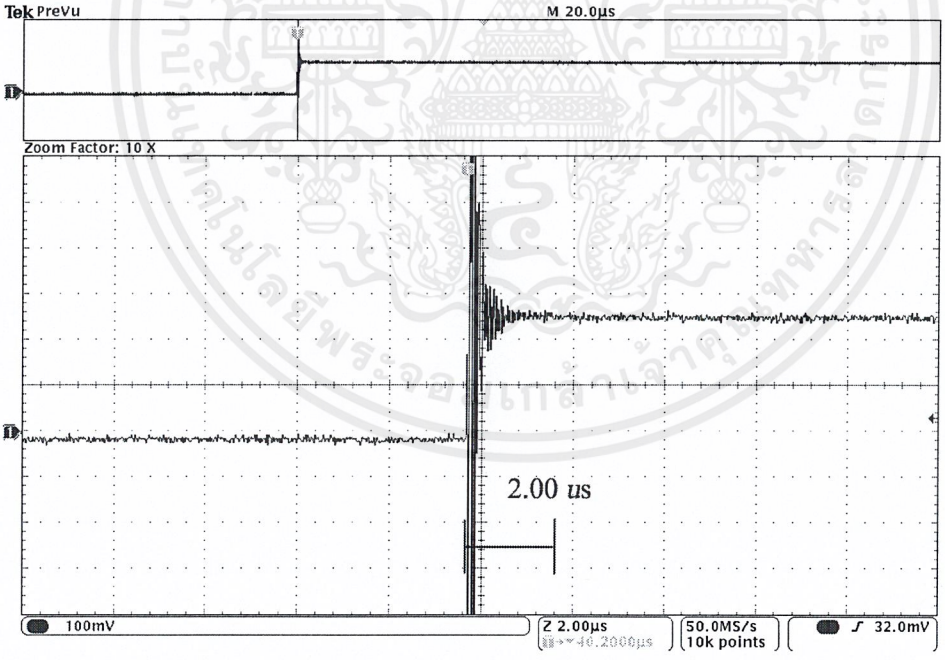
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH



ก) time/div 20 μ s/div



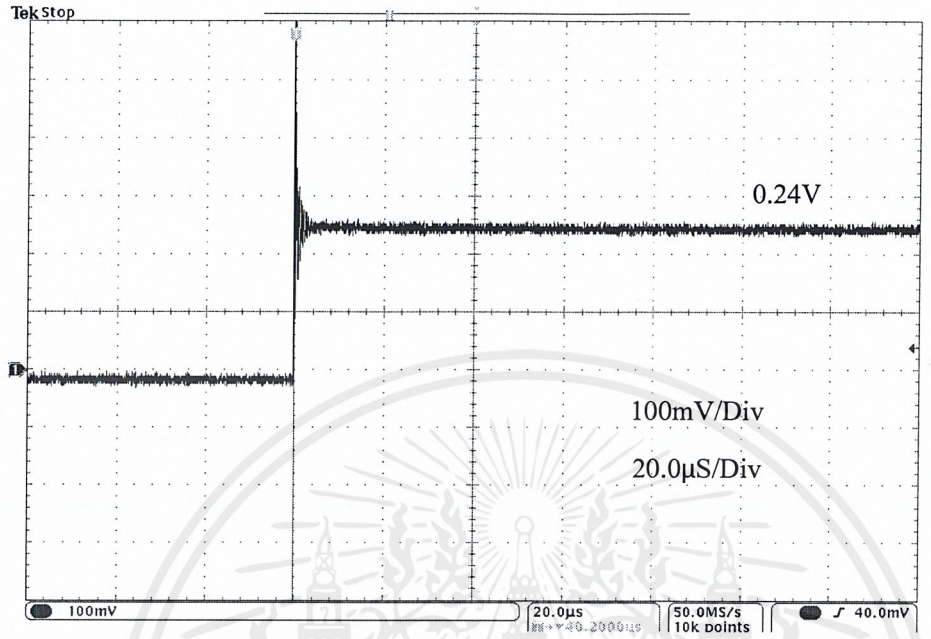
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.68 มี L ที่ด้าน high volt 3 μH

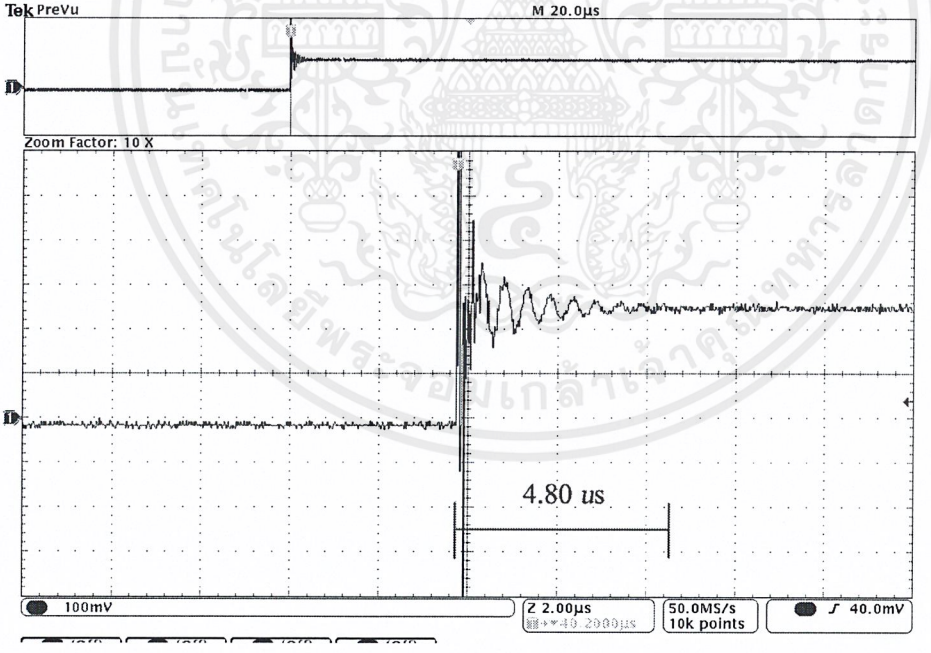
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μ H



ก) time/div 20 μ s/div



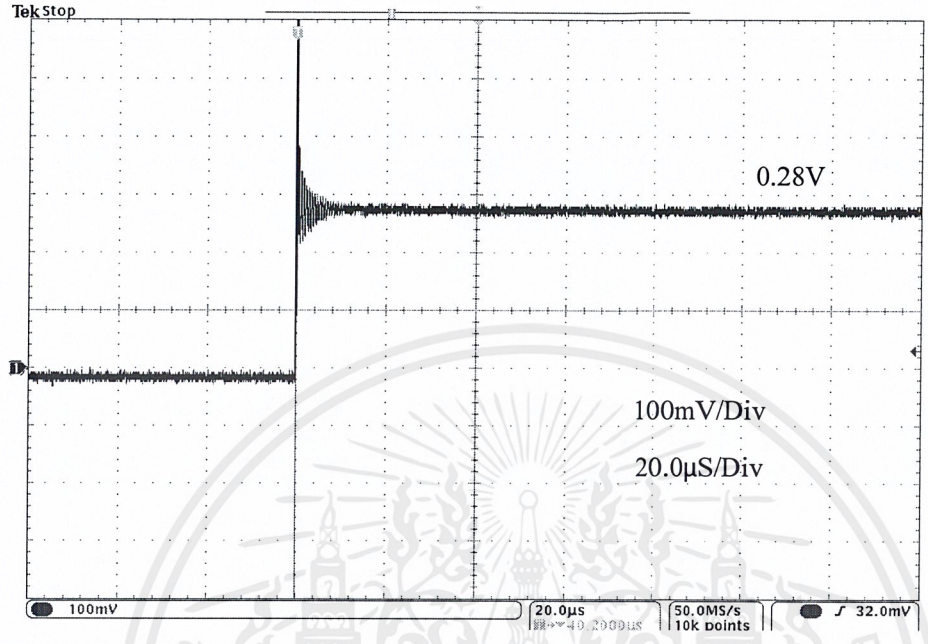
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.69 มี L ที่ด้าน low volt 1 μ H

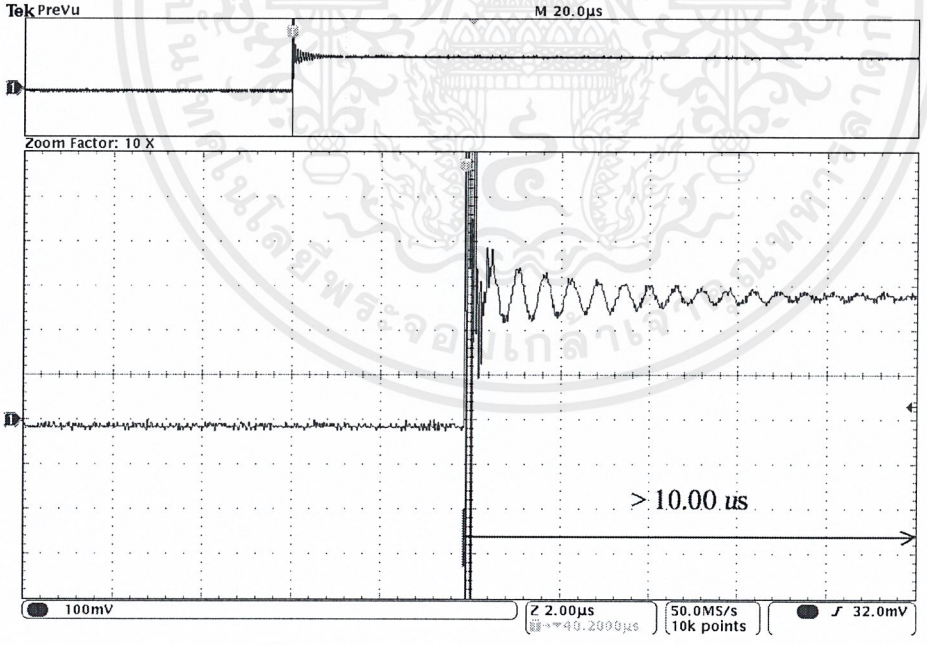
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)
และระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH



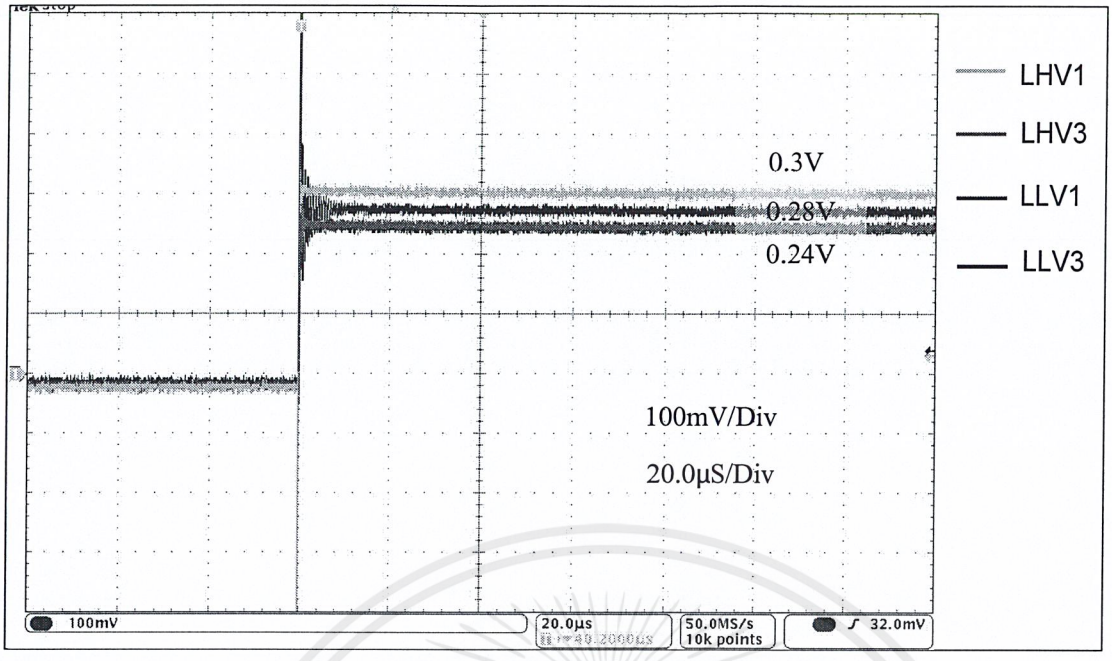
ก) time/div 20 μ s/div



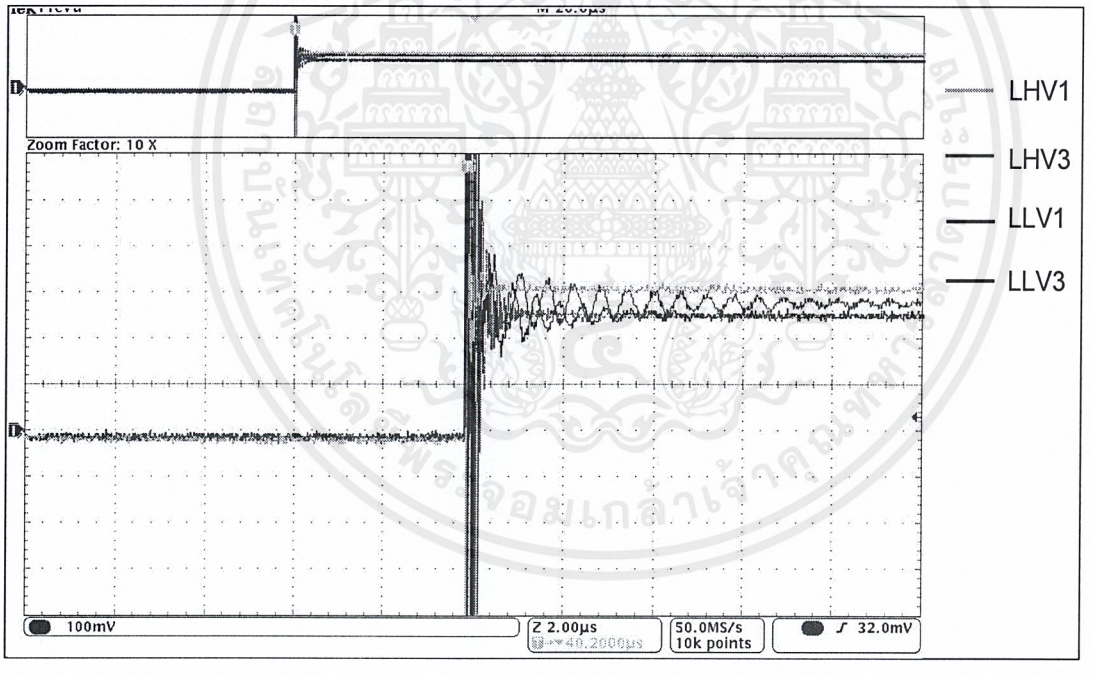
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.70 มี L ที่ด้าน low volt 3 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.71 เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

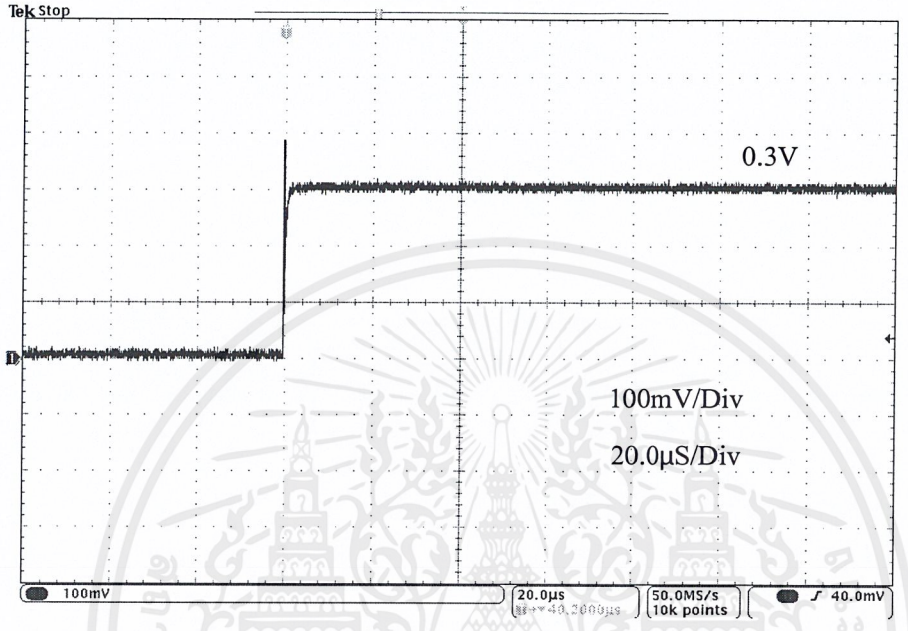
4.2.4.2 ศึกษาการกระจายค่า R แบบต่างๆ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความเหนี่ยงนำ

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

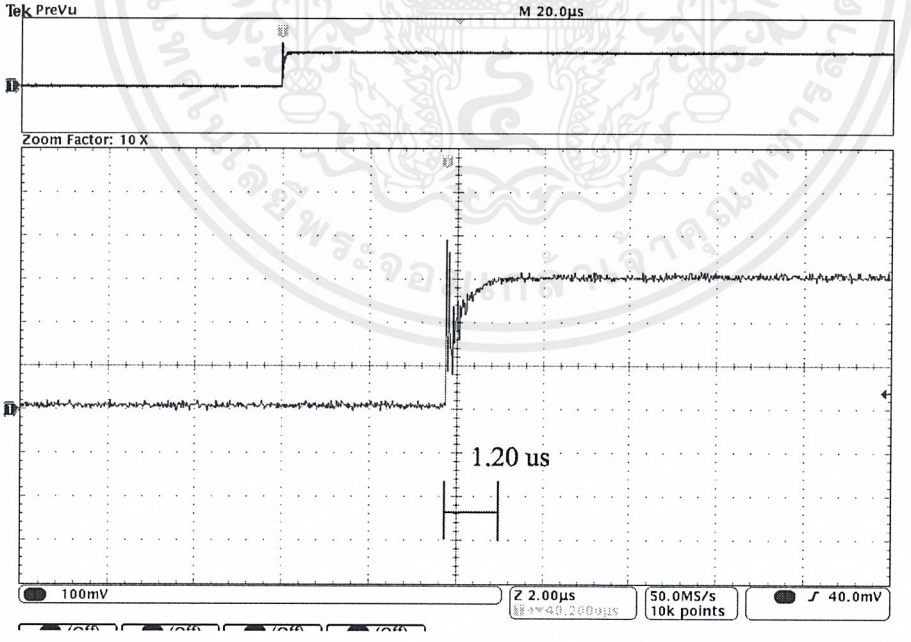
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH

และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ, แรงต่ำ 5Ω)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.72 มี L ที่ด้าน HV 1 μ Hและ MIX R ขนาน

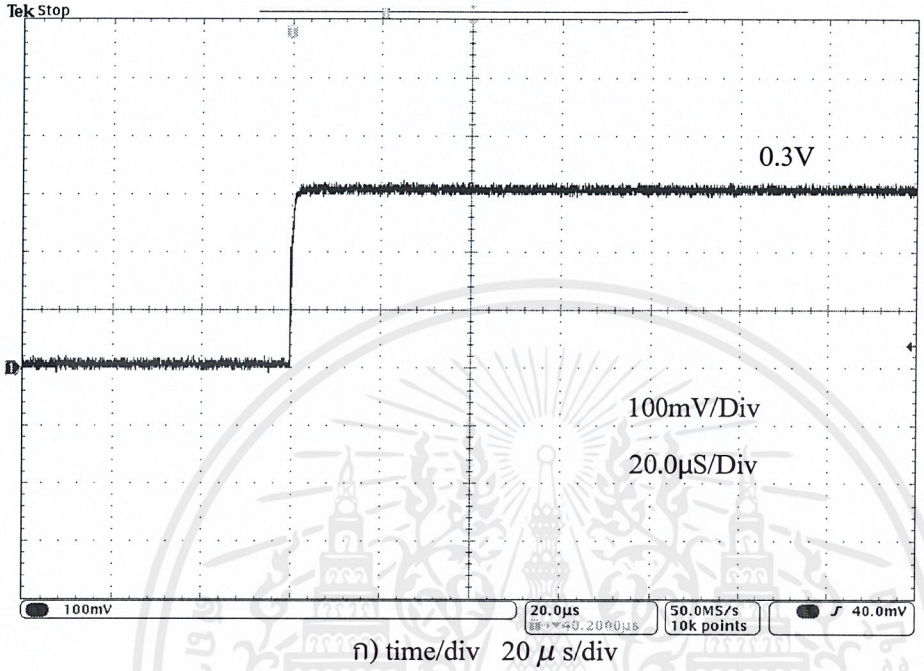
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

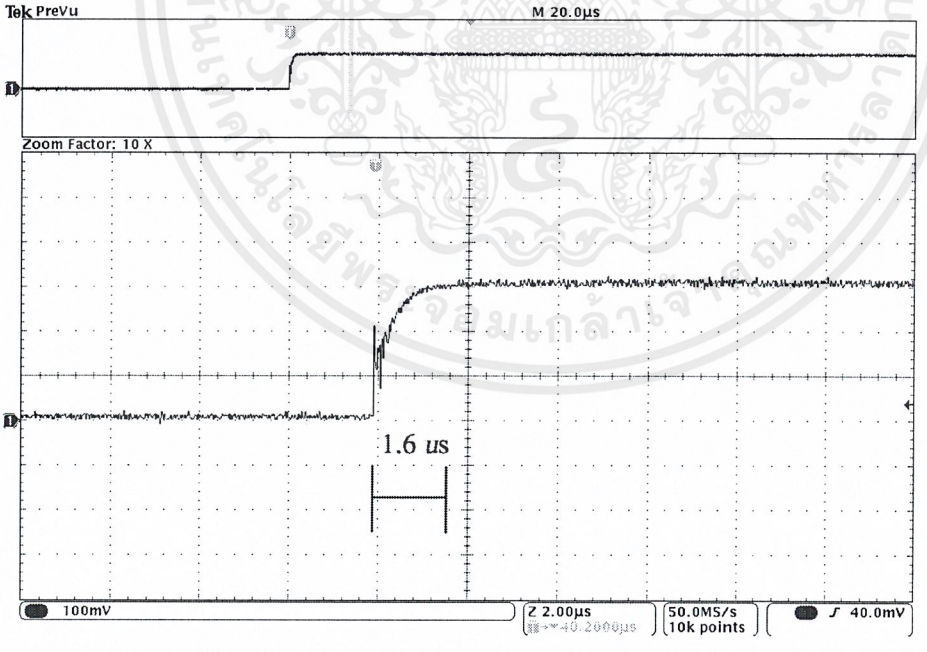
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μ H

และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ , แรงต่ำ 5Ω)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.73 มี L ที่ด้าน HV 3 μ Hและ MIX R ขนาน

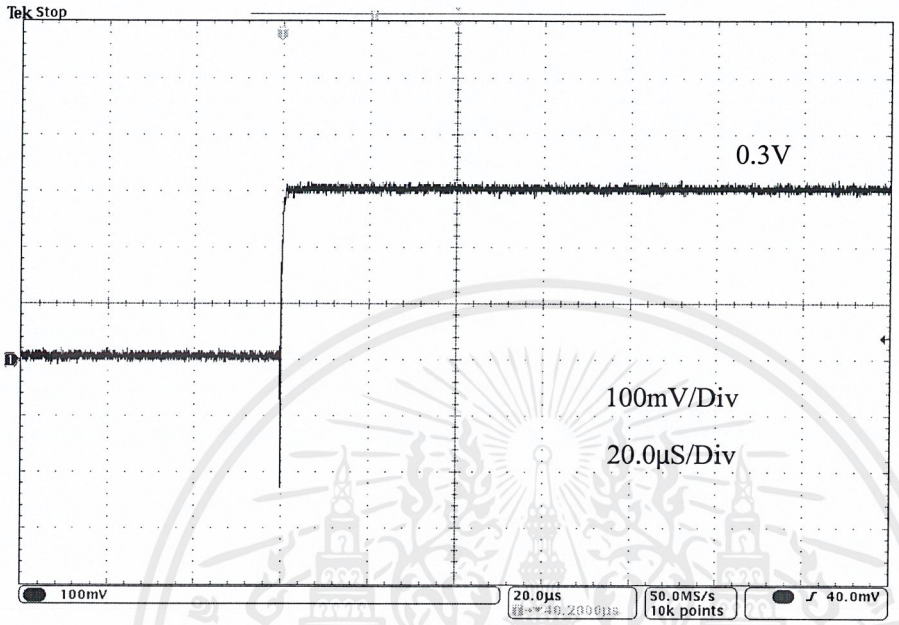
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

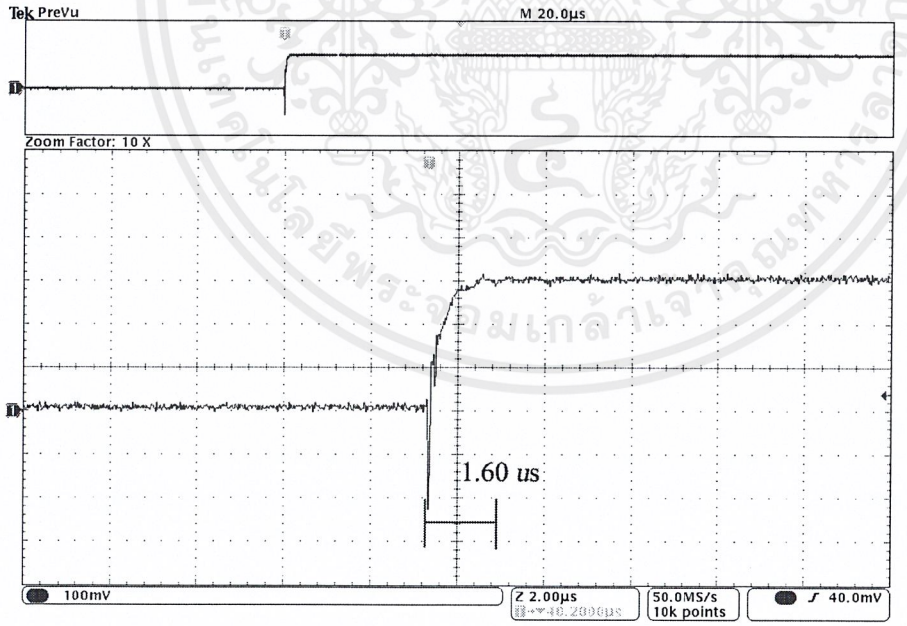
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μ H

และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ , แรงต่ำ 5Ω)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.74 มี L ที่ด้าน LV 1 μ Hและ MIX R ขนาน

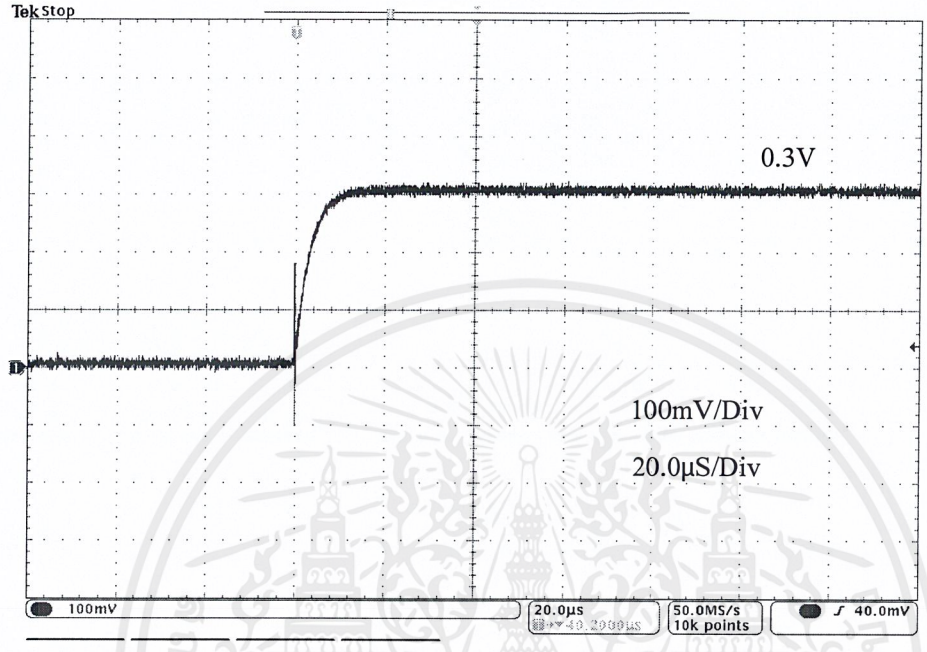
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

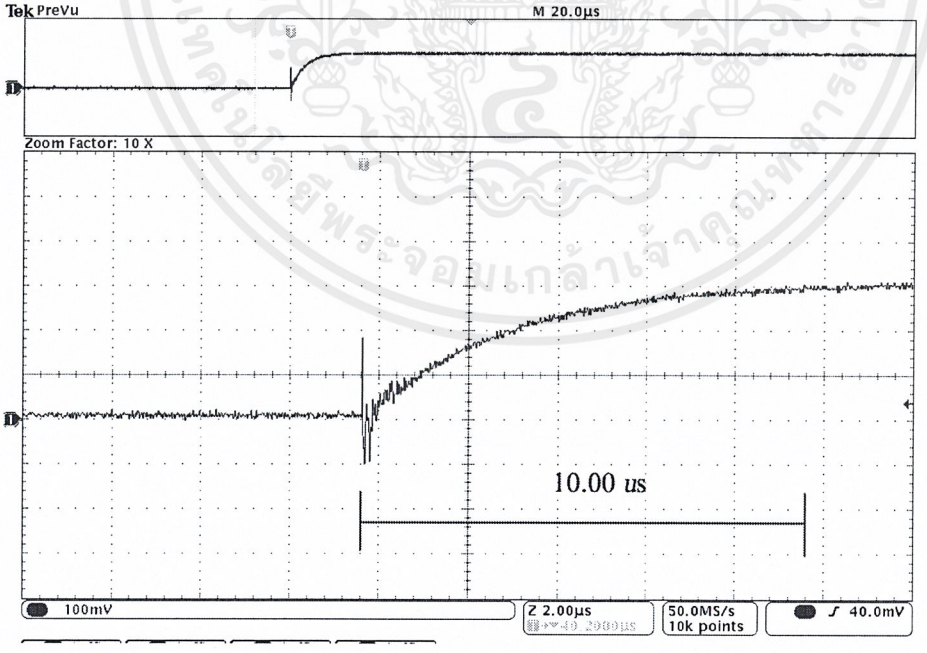
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μH

และกระจายความต้านทานแบบขนาน(ภาคแรงสูง 5 kΩ, แรงต่ำ 5Ω)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.75 มี L ที่ด้าน LV 3 μHและ MIX R ขนาน

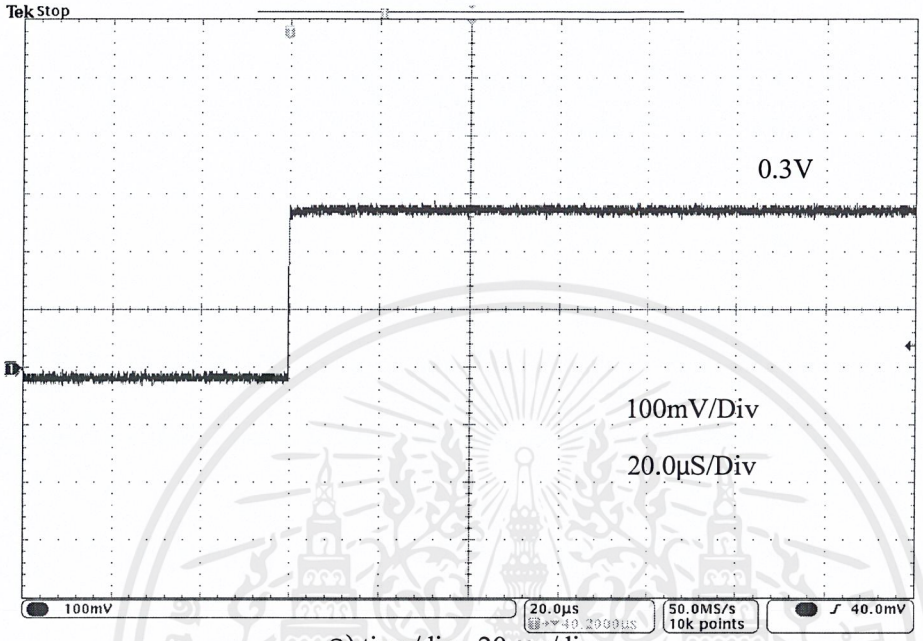
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

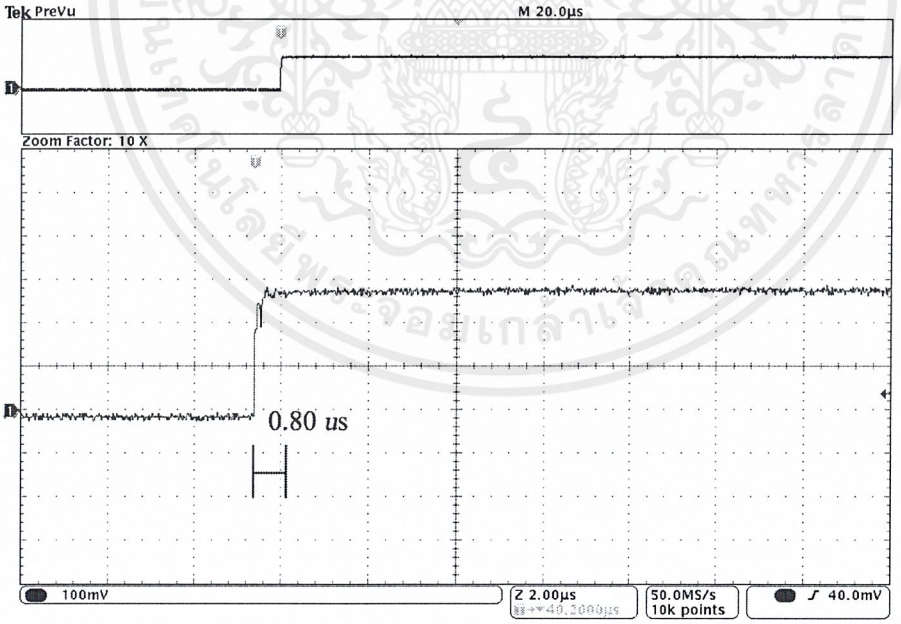
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 1 μH

และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ, แรงต่ำ 5Ω)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.76 มี L ที่ด้าน HV 1 μ Hและ MIX R อนุกรม

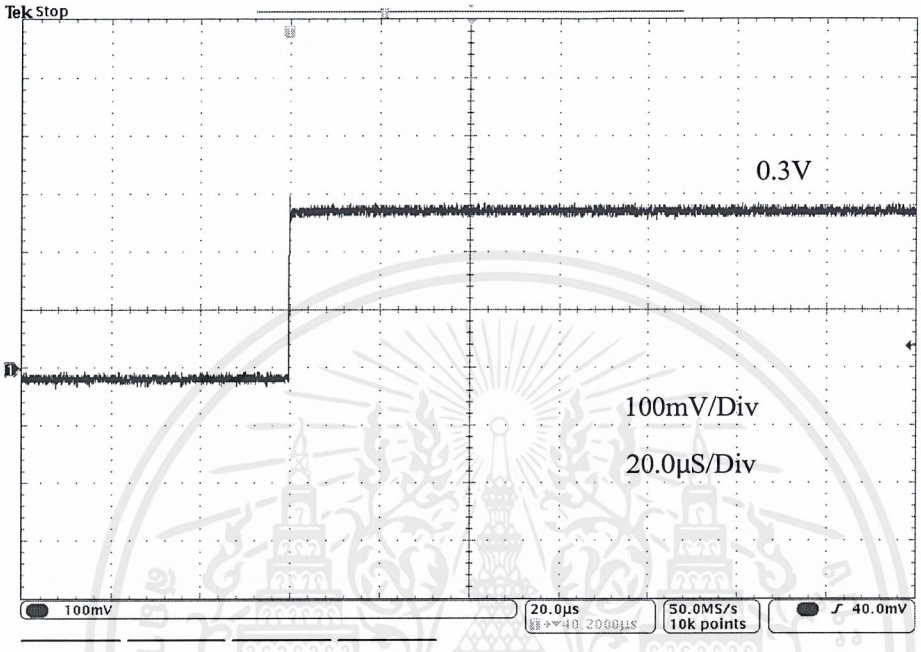
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

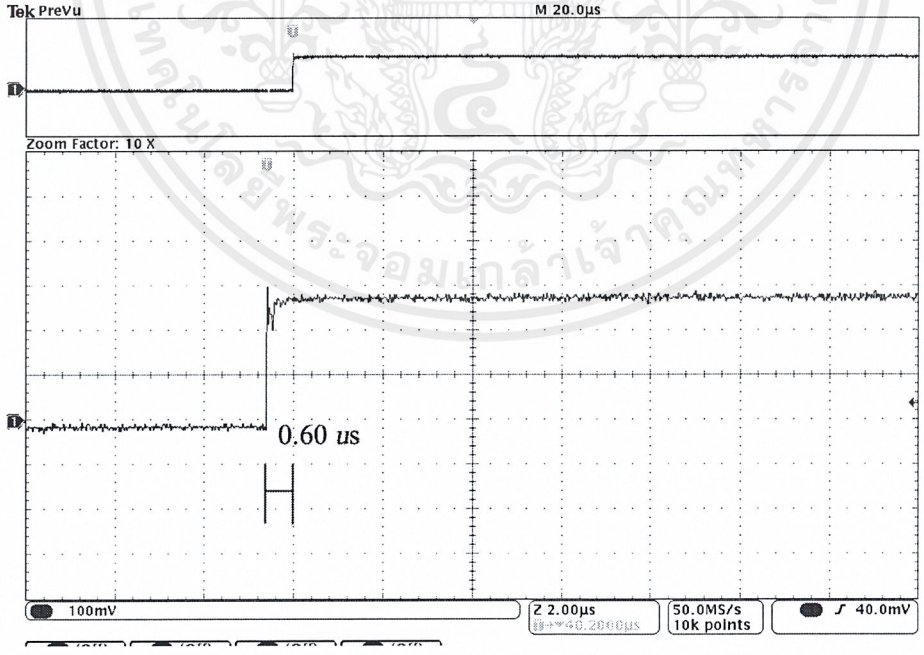
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูง 3 μH

และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ, แรงต่ำ 5Ω)



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.77 มี L ที่ด้าน HV 3 μ Hและ MIX R อนุกรม

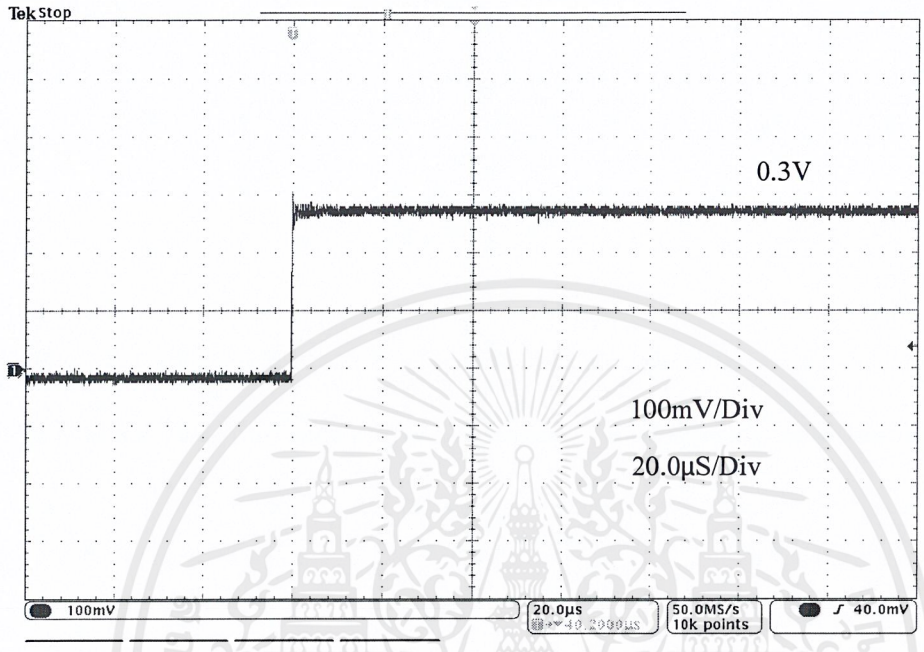
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

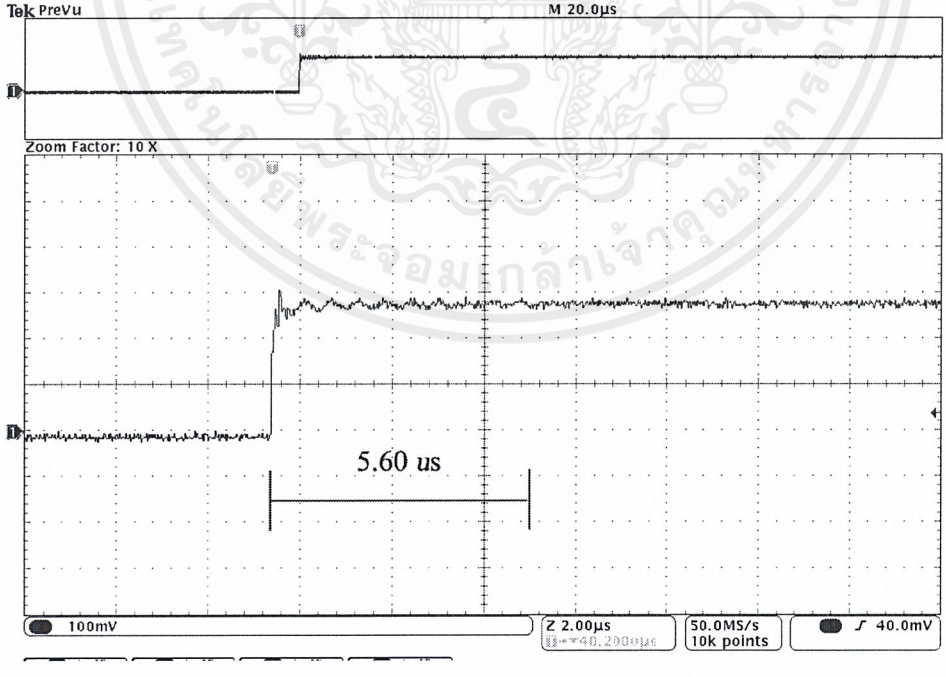
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 1 μH

และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ, แรงต่ำ 5Ω)



ก) time/div 20 μ s/div



ก) time/div 20 μ s/div

รูปที่ 4.78 มี L ที่ด้าน LV 1 μ Hและ MIX R อนุกรม

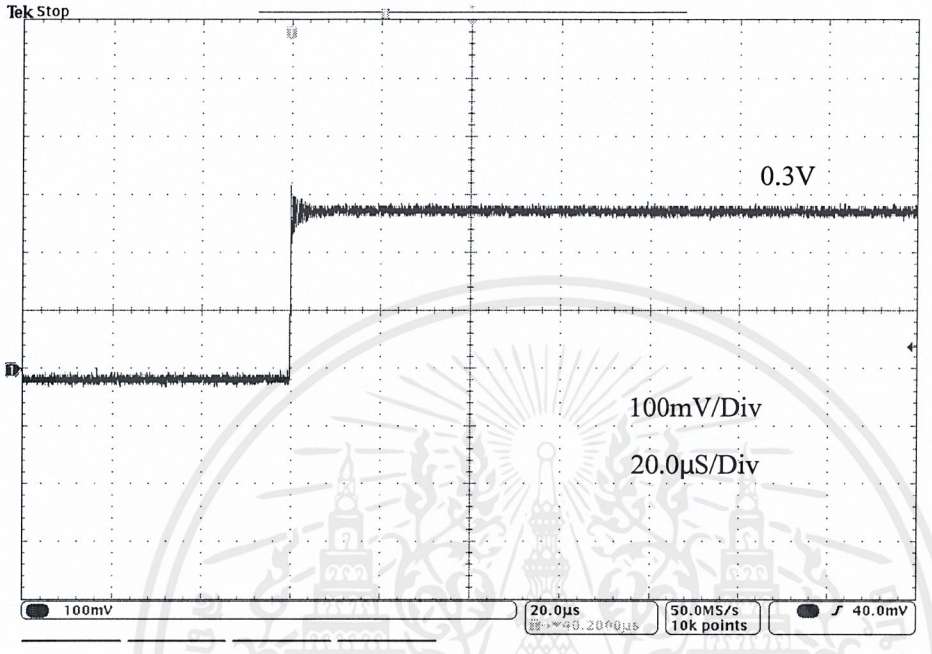
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF จำนวน 15 ตัว (ใช้ C = 1nF ต่ออนุกรม 15 ตัว)

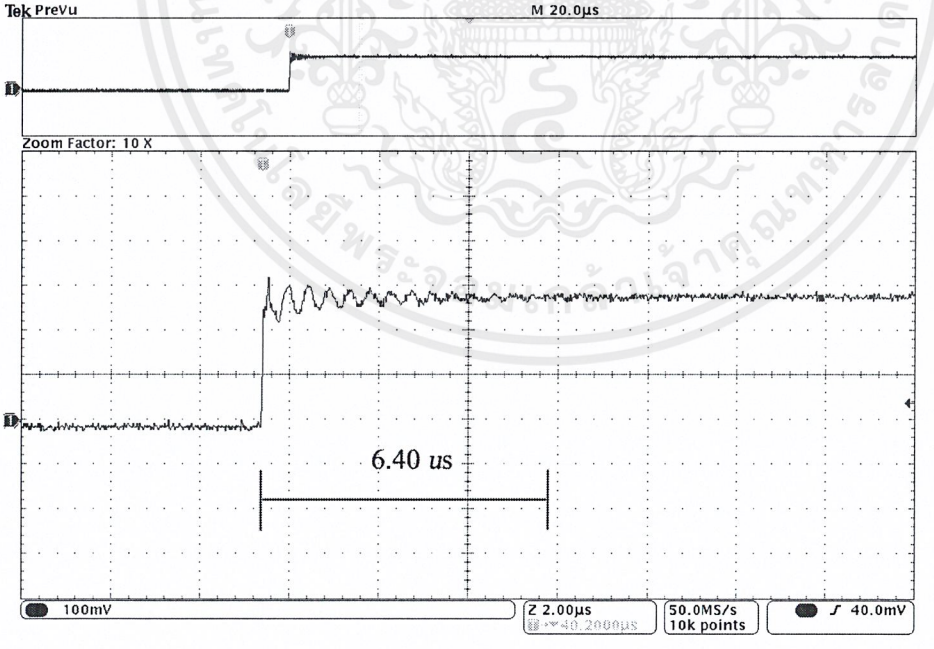
ภาคแรงต่ำ ตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 7 ตัว (ใช้ C = 10nF ต่อขนาน 7 ตัว)

ระบบเกิดความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงต่ำ 3 μ H

และกระจายความต้านทานแบบอนุกรม(ภาคแรงสูง 5 kΩ , แรงต่ำ 5Ω)



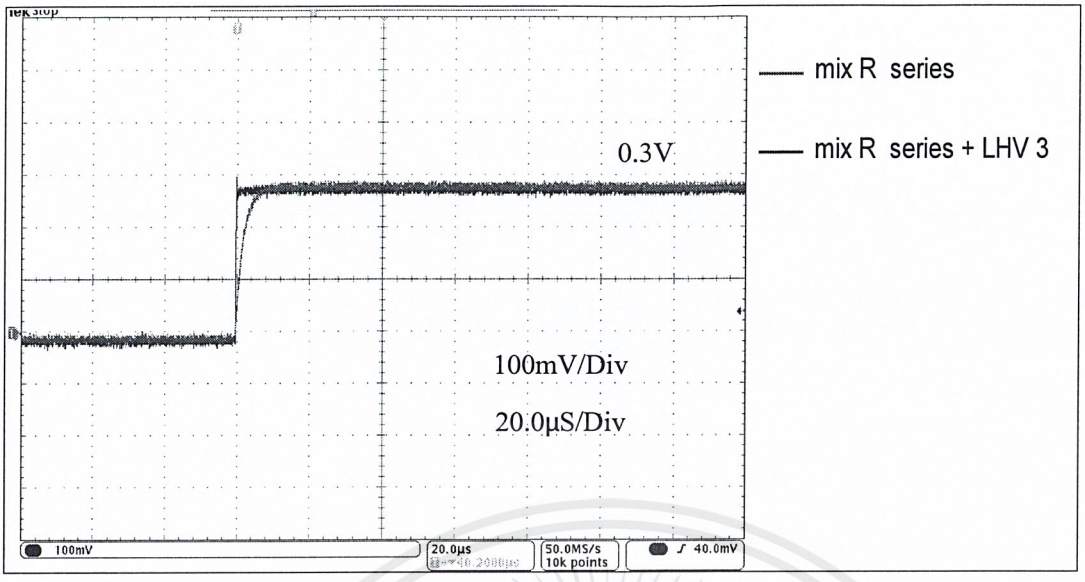
ก) time/div 20 μ s/div



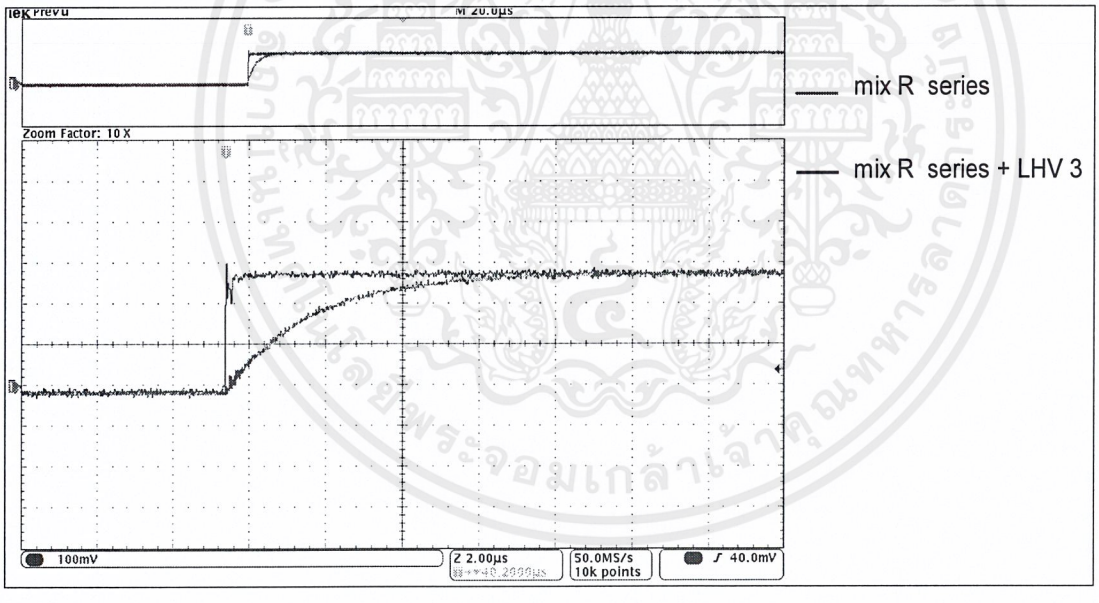
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.79 มี L ที่ด้าน LV 3 μ Hและ MIX R อนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div

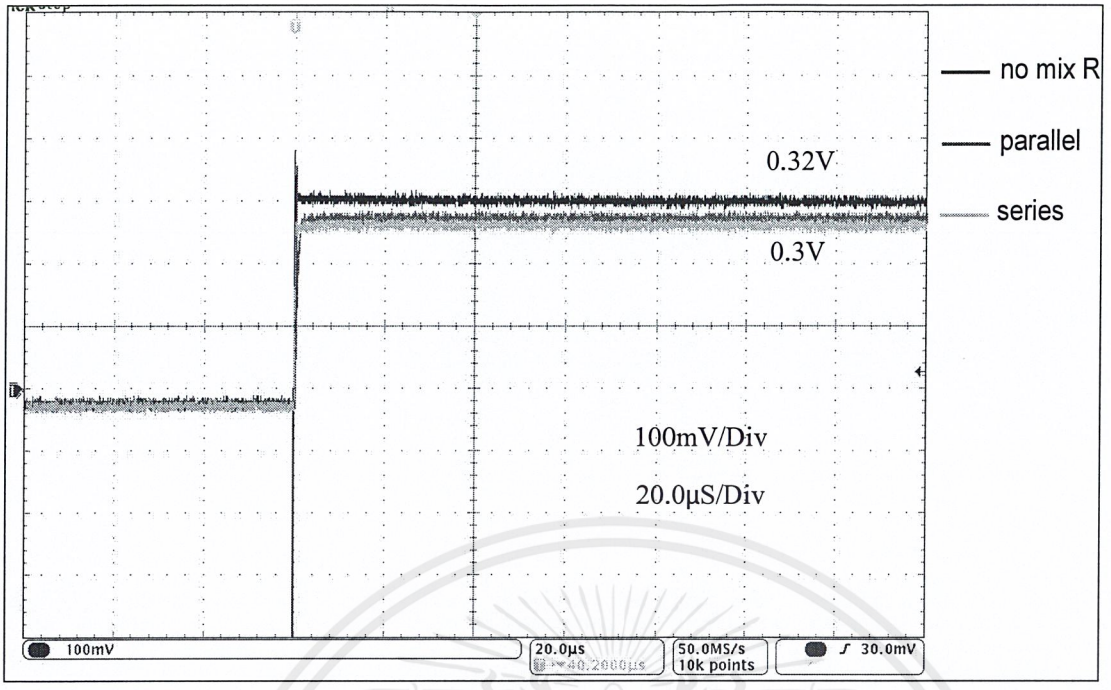


ข) time/div 2 μ s/div

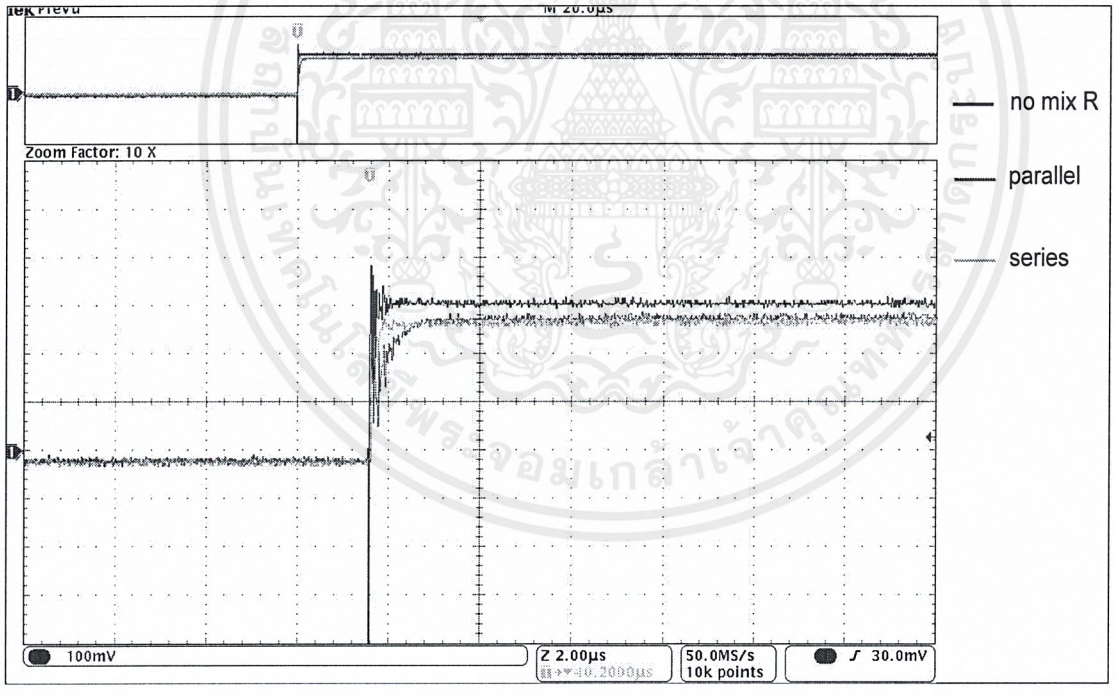
รูปที่ 4.80 เปรียบเทียบระหว่าง MIX R อนุกรม กับ MIX Rอนุกรม+LHV 3

- จากการทดลอง จะพบว่า การมีค่าความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นนั้นแม้จะทำให้ผลตอบสนองรูปขั้นมีออสซิเลทมากขึ้นแต่ก็จะทำให้ผลตอบสนองเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



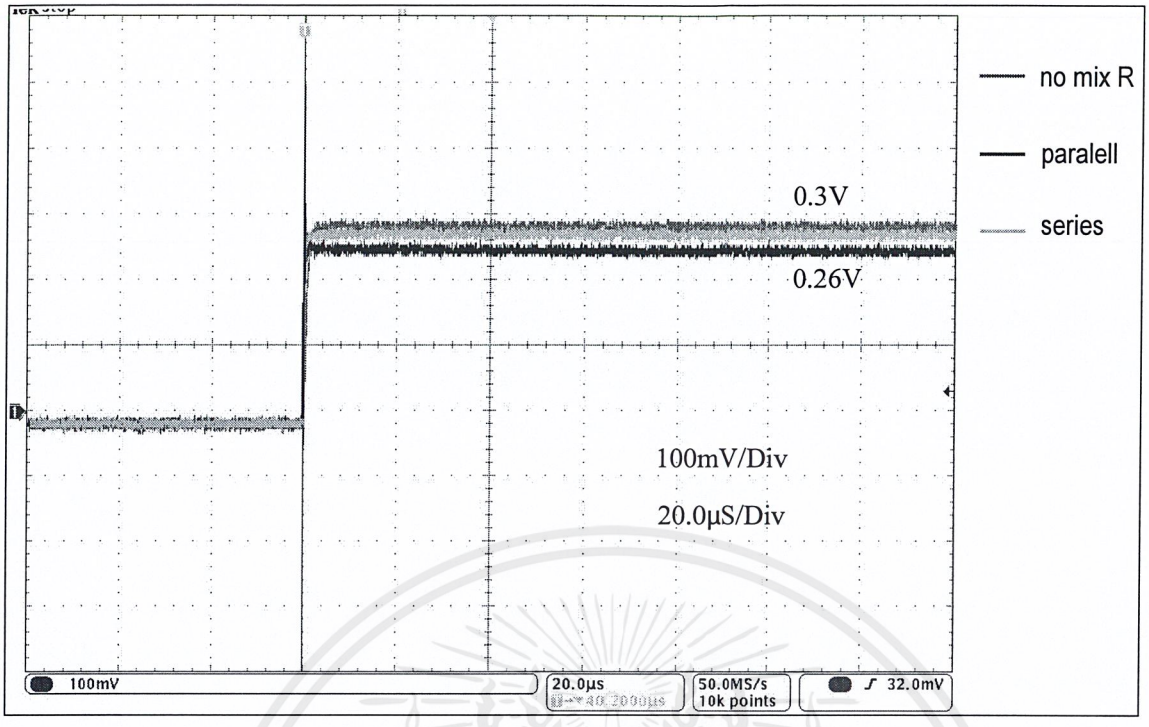
ก) time/div 20 μ s/div



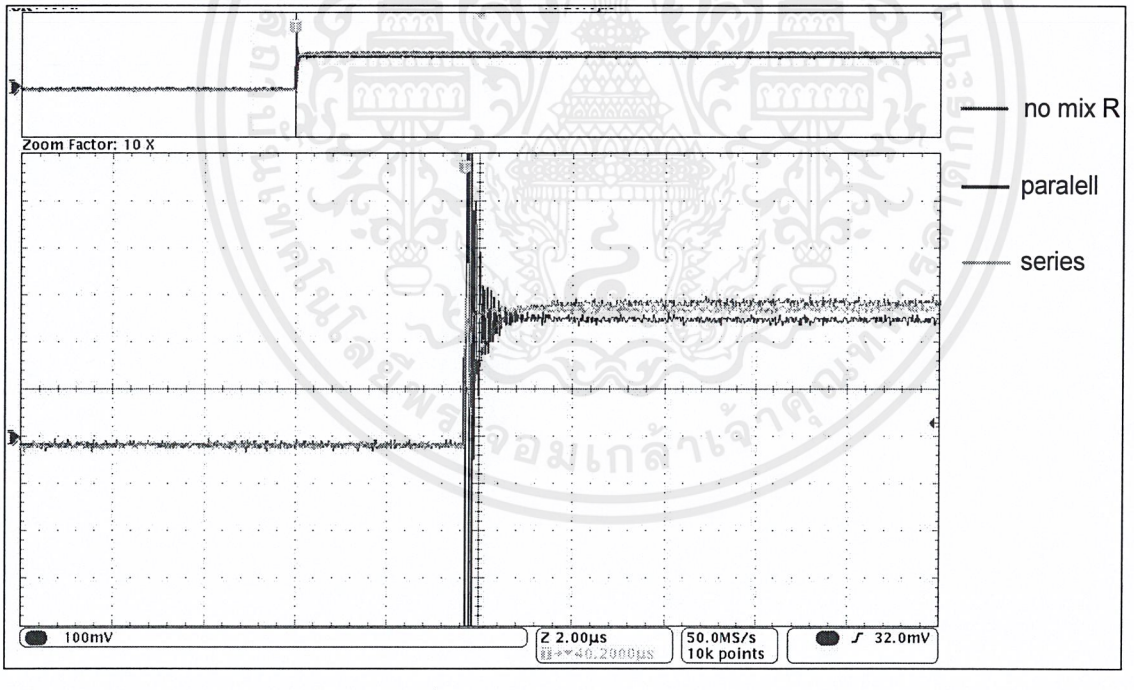
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.81 มี L ที่ HV 1 μ H ไม่ได้ MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



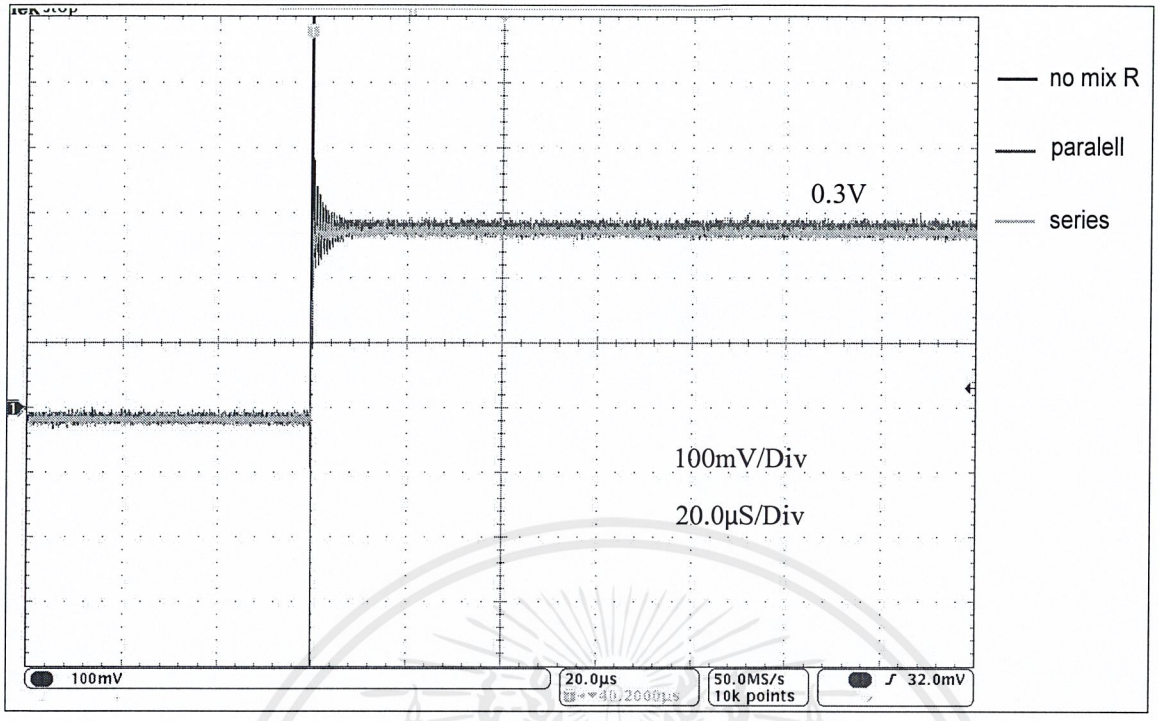
ก) time/div 20 μ s/div



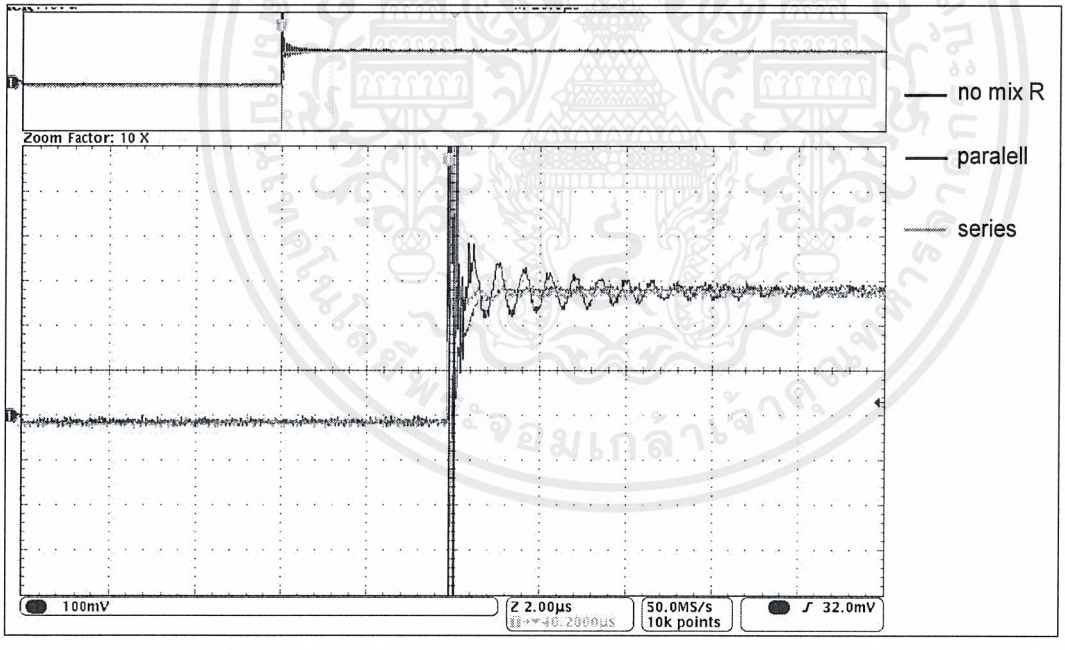
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.82 มี L ที่ HV 3 μ H ไม่ได้ MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



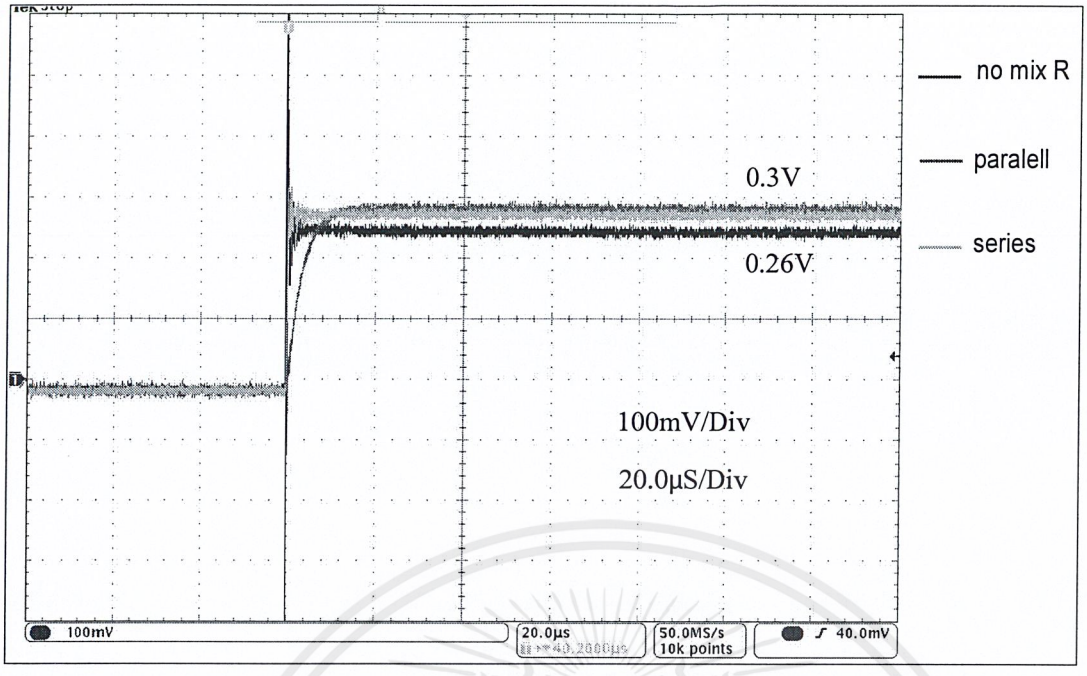
ก) time/div 20 μ s/div



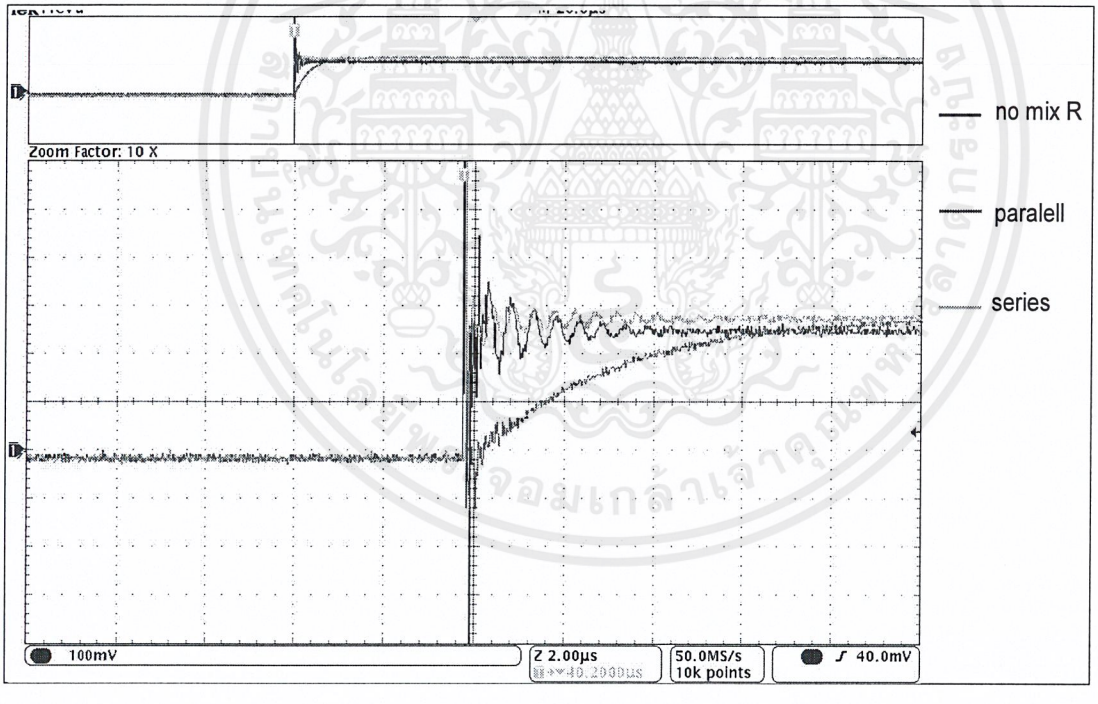
ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.83 มี L ที่ LV 1 μ H ไม่ได้ MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) time/div 20 μ s/div



ข) time/div 2 μ s/div

รูปที่ 4.84 มี L ที่ LV 3 μ H ไม่ได้ MIX R, MIX Rอนุกรม และ MIX R ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองจากชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง ได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวมทั้งมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อทำการจัดเตรียมอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง และได้ทำการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้น(Unit Step) ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) High Votage Test Techniques-Past2 : Measuring System โดยผลการทดลองที่ได้จะเป็นผลให้ทราบถึงลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดของความต้านทานและขนาดของตัวเก็บประจุมีผลต่อผลตอบสนองรูปขั้น (Unit Step Response) คือ เมื่อขนาดของความต้านทานหรือตัวเก็บประจุมากขึ้นเวลาตอบสนองจะช้าลง

2. โวลต์เตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานล้วนการต่อความต้านทานสมคู่(Matching Resister) มีผลต่อแรงดันที่วัดได้ โดยผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

- ถ้าใช้สายเคเบิลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 50Ω และต่อแมชชิ่ง 75Ω แรงดันที่ได้จะมีค่ามากกว่า กรณีที่ต่อแมทชิงตรงกับค่าอิมพิแดนซ์ของสายเคเบิล
- ถ้าใช้สายเคเบิลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 75Ω และต่อแมชชิ่ง 50Ω แรงดันที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า กรณีที่ต่อแมทชิงตรงกับค่าอิมพิแดนซ์ของสายเคเบิล
- ถ้าไม่ได้ทำการแมทชิง แรงดันที่ได้จะมีค่ามากกว่ากรณีที่ต่อแมทชิงตรงกับค่าอิมพิแดนซ์ของสายเคเบิลประมาณ 2 เท่า
- ในการต่อสายเคเบิลที่มีค่าอิมพิแดนซ์ต่างกัน จากสูตร สัมประสิทธิ์การสะท้อน(Γ)

$$\Gamma = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}$$

$$U_R = U[\,1+\Gamma\,]$$

- ต่อสายเคเบิลจาก เคเบิล RG-8 ไป เคเบิล RG-11 แรงดัน 300 โวลต์

$$\Gamma = \frac{75-50}{75+50} = 0.2 \longrightarrow U_R = 300[\,1+0.2\,] = 360 \text{ โวลต์}$$

- ต่อสายเคเบิลจาก เคเบิล RG-11 ไป เคเบิล RG-8 แรงดัน 300 โวลต์

$$\Gamma = \frac{50-75}{50+75} = -0.2 \longrightarrow U_R = 300[\,1-0.2\,] = 240 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้น สรุปได้ว่าการต่อแมทชิงทำเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากคลื่นสะท้อน โดยมีหลักเกณฑ์ว่า ถ้าจ่ายไฟวิ่งจากอิมพิแดนซ์น้อยไปมากแรงดันที่สะท้อนจะเป็นบวก ถ้าจ่ายไฟจากอิมพิแดนซ์มากไปน้อยแรงดันสะท้อนจะเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ในการทดลองโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ การต่อความต้านทานสมคู่ (Matching Resister) แบบต่างๆ แทบไม่มีผลต่อแรงดันที่วัดได้เลย เนื่องจากกรณีโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ถ้าเราใช้ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำมากพอ จะทำให้ผลที่เกิดจากคลื่นสะท้อนของสายเคเบิลมีค่าไม่มากนัก

4. การทดสอบดูกราฟผลตอบสนองรูปขั้นเมื่อเราใส่ตัวเหนี่ยวนำในขนาดที่เท่ากันลงไปที่โวลเตจดิไวเดอร์โดยไม่คิดถึงอัตราส่วนการลดทอนแรงดัน ได้ออกแบบผลการทดลองเป็น 3 แบบ คือ ได้ใส่ตัวเหนี่ยวนำลงไปที่ภาคแรงสูง ภาคแรงต่ำ และใส่ลงไปทั้งภาคแรงสูงและแรงต่ำ ผลที่ได้ดังนี้

- เมื่อเราใส่ตัวเหนี่ยวนำลงไปที่ภาคแรงสูง ผลของกราฟผลตอบสนองรูปขั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปเท่าไรนัก คือ เกิดออสซิเลทเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ถึงแม้จะเพิ่มค่าตัวเหนียงนำไปแล้วก็ตาม

- เมื่อเราใส่ตัวเหนียวนำลงไปที่ภาคแรงต่ำ ผลของกราฟผลตอบสนองรูปขั้นจะเกิดการแกว่งอย่างมาก และเมื่อเพิ่มค่าตัวเหนียวนำลงไปอีกก็จะทำให้กราฟผลตอบสนองแกว่งมากยิ่งขึ้น

- เมื่อเราใส่ตัวเหนียวนำลงไปที่ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำพร้อมกัน เราจะสังเกตุได้ว่าเกิดการแกว่งขึ้น ทำให้ทราบว่าความเหนี่ยวนำมีผลอย่างมากที่ภาคแรงต่ำ

แต่จากผลการ simulate จากโปรแกรมถ้าเกิดความเหนี่ยวนำในอัตราส่วนเดียวกับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ (1001:1) คือ ใส่ขนาดค่าความเหนี่ยวนำที่ภาคแรงสูงและแรงต่ำในอัตราส่วน 1001:1 ด้วย ผลกระทบจากการเกิดความเหนี่ยวนำที่เกิดที่ภาคแรงต่ำและแรงสูงนั้นจะมีค่าเท่าๆ กัน

5. การกระจายความต้านทานหน่วง (R damp) เพื่อลดการแกว่งหรือออสซิเลทในโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุนั้น การกระจายความต้านทานแบบอนุกรมจะลดออสซิเลทได้ดีกว่าการกระจายความต้านทานแบบขนาน

6. เมื่อเราใส่ค่าความเหนี่ยวนำในโวลเตจดิไวเดอร์ที่มีความต้านทานกระจายอยู่นั้น จะทำให้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้นั้นเร็วขึ้น จึงสรุปได้ว่า การเกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสีย คือ

ข้อเสีย คือ ทำให้ผลตอบสนองที่ได้เกิดการแกว่ง(ออสซิเลท)มากขึ้น

ข้อดี คือ ทำให้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้นั้นเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

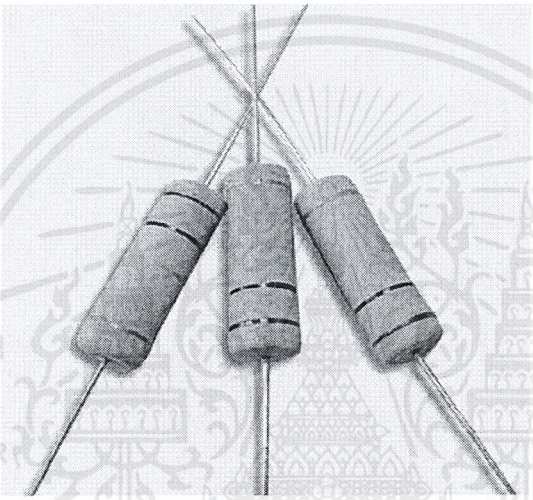
ภาคผนวก ก

ความต้านทานและตัวเก็บประจุชนิดอื่นๆที่มีในท้องตลาด

ตัวต้านทาน

1. เม็ททอลฟิลม์รีซิสเตอร์ (Metal Film Resistors)

ที่เหมาะกับงานทั่วๆไป ซึ่งอยู่ในย่านการทำงานที่ 0.1-0.5 เมกกะโอห์ม อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำ ให้เสถียรภาพสูงมีการรบกวนของสัญญาณต่ำมาก ความต้านทานชนิดนี้เหมาะกับใช้ในวงจรที่มีการรบกวนของสัญญาณต่ำมาก อัตราการทนกำลังไฟฟ้าถึง 10 W ค่าความคลาดเคลื่อน 0.1 – 2 % แต่มีราคาแพง



รูปที่ ก.1 เม็ททอลฟิลม์รีซิสเตอร์ (Metal Film Resistors)

2. ความต้านทานแบบไวร์วาวด์ (Wire Would Resistors)

ความต้านทานแบบไวร์วาวด์ สามาถแบ่งออกเป็น 3 แบบใหญ่ๆคือ

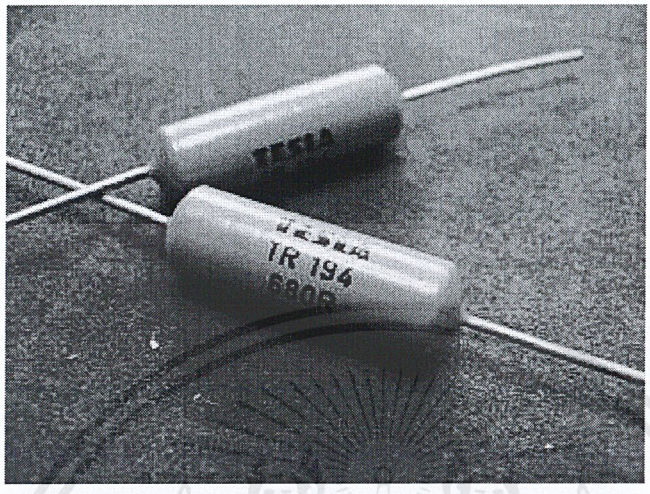
2.1 แบบมีกำลังสูง (High Power Wire Would Resistors) มีย่านการใช้งาน 1-100 กิโลโอห์ม อยู่ในย่าน 5-20 W ค่าผิดพลาด 5 – 10 % ความต้านทานประเภทนี้ถูกนำไปใช้งานประเภทเครื่องเสียงต่อร่วมกับทรานซิสเตอร์

2.2 แบบมีความถูกต้องสูง(High Accuracy Wire Would Resistors) มีคุณสมบัติคือสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมีค่าต่ำ มีเสถียรภาพสูงมาก มีความเที่ยงตรงสูงโดยทั่วไปอยู่ในย่านความถูกต้อง 1% ความต้านทานอยู่ในช่วง 1-100 กิโลโอห์ม

2.3 แบบทั่วๆไป(General Purpose Wire Would Resistors) ช่วงการทำงานอยู่ในช่วง 0.25-10 กิโลโอห์ม มีลักษณะคล้ายๆกับความต้านทานแบบคาร์บอน และมีสัมประสิทธ์การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

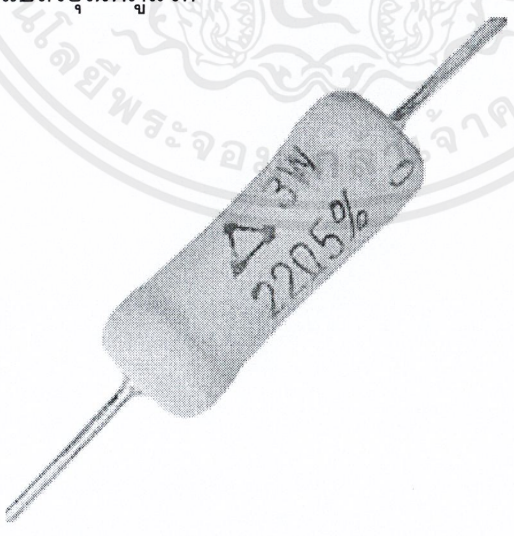
นอกจากนี้ยังมีความต้านทานแบบ Wire Would Resistors ทีมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ คือ Bifila Wire Would Resistors แต่เป็นความต้านทานที่ราคาแพง ไม่เป็นที่นิยม



รูปที่ ก.2 ความต้านทานแบบไวร์วาวด์ (Wire Would Resistors)

3.ตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide Resistor)

ตัวต้านทานชนิดนี้มีโครงสร้างตัวต้านทานที่เคลือบด้วยออกไซด์โลหะ ประเภทดีบุกลงบนวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน โดยอัตราส่วนของออกไซด์โลหะจะเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานให้กับตัวต้านทานชนิดนี้ คุณสมบัติพิเศษสำหรับตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ คือ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้



รูปที่ ก.3 ตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide Resistor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา (Thick - Film Resistor)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มหนามีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ SIP (Single in – line Package) และ DIP (Dual in – Line Package) ตัวต้านทานแบบ SIP จะต่อลวดตัวนำออกจากความต้านทานภายในเพียงแถวเดียว ส่วนตัวต้านทานแบบ DIP จะมีลวดตัวนำ 2 แถว ต่อออกมาภายนอก ซึ่งตัวต้านทานแบบฟิล์มหนาทั้งสองแบบจะได้รับการปรับแต่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2% โดยค่าความต้านทานที่ใช้ในงานทั่วไปของตัวต้านทานชนิดนี้อยู่ระหว่าง 22 โอห์ม ถึง 2.2 เมกะโอห์ม และมีอัตราทนกำลัง ประมาณ 1/2วัตต์

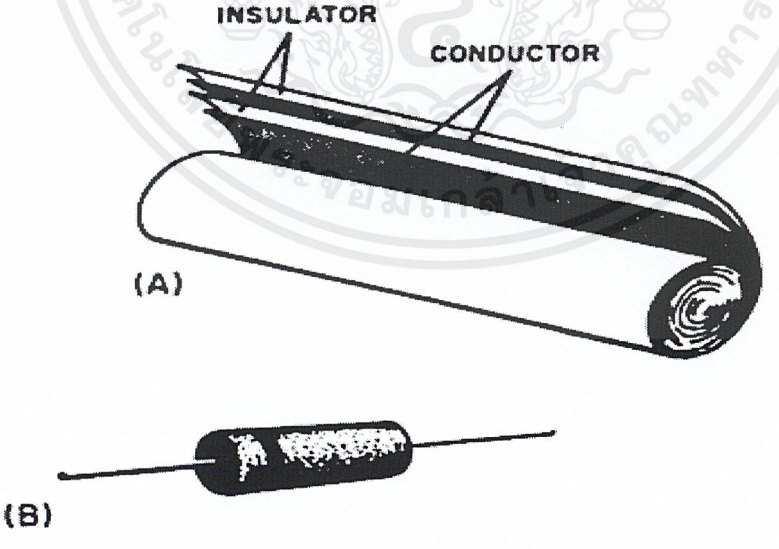
ตัวเก็บประจุ

การเรียกชื่อตัวเก็บประจุมักจะเรียกตามชนิดของไดอิเล็กตริกที่ใช้เป็นตัวคั่นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

1. ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่

1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ ใช้แผ่นโลหะบางสองแผ่นประกบกับแผ่นกระดาษที่เคลือบสารประเภทฉนวน เช่น น้ำมันหรือไข แล้วนำมาม้วนปลายข้างหนึ่งของแผ่นโลหะทั้งสองตัดเว้าขยักปลายไว้สำหรับปิดท้ายและติดกับลวดภายนอกสำหรับต่อใช้งาน กรณีต้องการให้ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษสามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้าได้สูง จะเพิ่มกระดาษที่เคลือบฉนวนให้หนาขึ้นหรือเปลี่ยนชนิดของฉนวนที่ชุบกระดาษตัวเก็บประจุแบบกระดาษจะมีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัด ถึง 1 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟฟ้าที่ 200-1600 โวลต์



รูปที่ ก.4 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

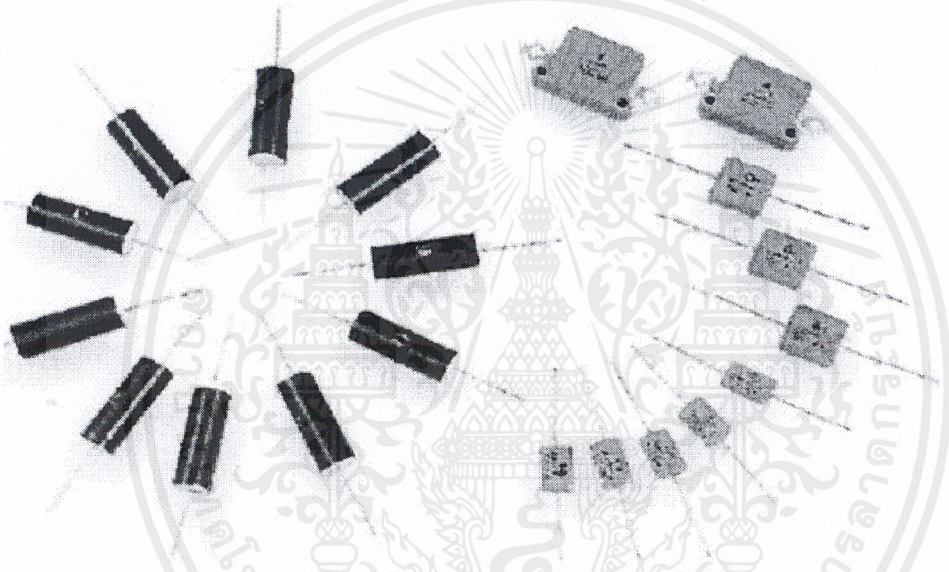
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไมก้าเป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งจะเป็นฉนวนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และถือเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีที่สุด ค่าความจุของคาร์ปาซิเตอร์ชนิดนี้มีค่าประมาณ 1 พิโคฟารัด-0.1 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟฟ้าที่ 100-2500 โวลต์ โดยตัวเก็บประจุแบบไมก้านั้นแบ่งตามชนิดของตัวนำที่ใช้อยู่ 2 ชนิดคือ

1.2.1 แบบโลหะฟอยด์ จะใช้ฟิล์มของโลหะบาง ๆทำเป็นไดอิเล็กตริกของคาร์ปาซิเตอร์ซึ่งจะเป็นแบบที่เรียกว่า ไมก้าก้อน

1.2.2 แบบซิลเวอร์ไมก้า ประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กตริกซึ่งทำมาจากโลหะเงินบริสุทธิ์ฉาบลงบนแผ่นไมก้า เพื่อที่จะทำให้คุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบนี้ดีขึ้น



รูปที่ ก.5 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค

รูปร่างโดยทั่วไปจะแบนกลมหรือแบนสี่เหลี่ยม โครงสร้างภายในจะมีเพลตโลหะที่ใช้แผ่นเงินที่เคลือบด้วยแผ่นเงินติดกับฉนวนผิวของทั้งสองด้าน ฉนวนหรือไดอิเล็กตริกจะใช้แทนทาลัมไดออกไซด์หรือสารประเภทส่วนผสมของซิลิเกตซึ่งเป็นฉนวนที่ทนศักย์ไฟได้สูง แล้วจึงหุ้มด้วยพลาสติกแข็งอีกชั้น ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกนี้นิยมใช้ในวงจรผ่านสัญญาณ (bypass) วงจรฟิลเตอร์ วงจรเรโซแนนซ์ วงจรชดเชยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกแบ่งได้เป็นตัวเก็บประจุชั้น 1 ซึ่งมีคุณสมบัติของอุณหภูมิต่อค่าความจุซึ่งสามารถทำนายได้ บางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ตัวเก็บประจุชั้น 2 จะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นโดยค่าสัมประสิทธ์ต่ออุณหภูมิจะระบุโดยรหัส 3 ตัว ซึ่งจะระบุถึงย่านอุณหภูมิต่ำย่านอุณหภูมิสูงและการเปลี่ยนแปลงค่าความจุมากสุดที่อุณหภูมิ 25 °C ตัวเก็บประจุแบบเซรามิ

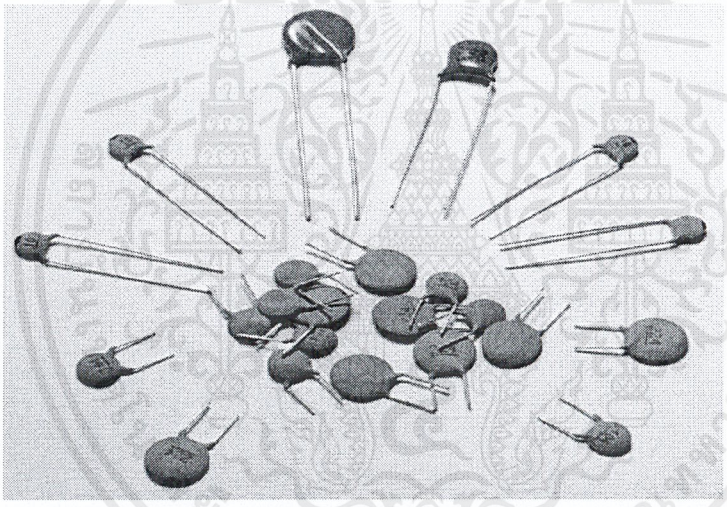
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กถูกทำจากสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน 3 ค่า กล่าวคือตัวเก็บประจุขนาดเล็กมากใช้สารไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงถึง1,200 แต่จะมีความไวต่ออุณหภูมิมาก สำหรับชนิดที่มีค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกปานกลางจะมีค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิทางลบ สำหรับชนิดที่มีค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกต่ำ จะมีค่าตอบสนองความถี่ดีมากแต่มีขนาดการทนแรงดันต่ำ ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 คือ

1.3.1 Low Dielectric จะใช้เซรามิคพวก Titanium Oxide ที่มีค่าไดอิเล็กตริกประมาณ 4-200 ค่าความจุไม่ค่อยสูงนัก

1.3.2 High Dielectric จะใช้เซรามิคพวก Titanium Acid Barium ค่าไดอิเล็กตริกประมาณ 1000-20000 ใช้ทำตัวคาร์ปาซิเตอร์มีค่าสูงและขนาดเล็ก

1.3.3 Semi Conductor Ceramic Capacitor ใช้สารไม่บริสุทธิ์เติมลงไปใน Titanium Acid Barium กลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งแล้วนำมาทำเป็นฐานรองไดอิเล็กตริกสามารถทำให้มีความจุมากและมีขนาดเล็ก



รูปที่ ก.6 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค

1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิลม์

เป็นตัวเก็บประจุที่นิยมใช้มากในวงจรบายพาสและวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มไมลาร์หรือแผ่นฟิล์มไพลีเอสเตอร์ ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาไดอิเล็กตริกให้มีคุณภาพดีขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้แก่

1.4.1 ตัวเก็บประจุชนิดโพลีคาร์บอเนต (MKC) มีคุณสมบัติดีกว่าชนิดโพลีเอสเตอร์ใช้ใน วงจรเครื่องเสียงมีค่าความจุคงที่สูญเสียต่ำ มีความจุ 50 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟฟ้า 1000 VDC

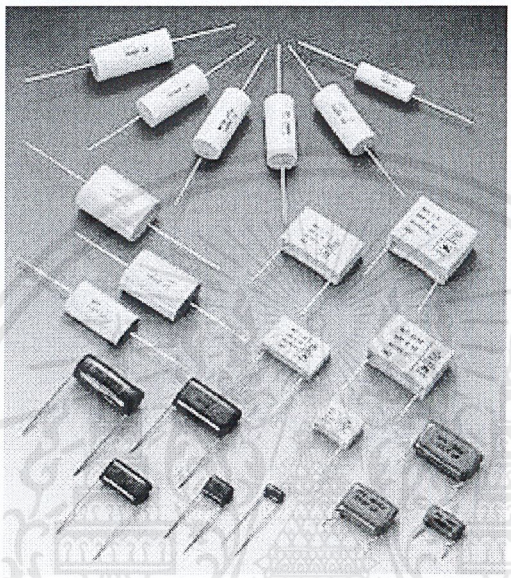
1.4.2 ตัวเก็บประจุชนิดโพลีไพลีน (MKP) มีคุณสมบัติดีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวเคลือบด้วยเงินใช้เป็นแผ่นเพลตโลหะทั้งสองใช้สารฟีนอลิกสำหรับเป็นตัวเคลือบสายต่อออกมาภายนอกขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมติดกับเพลตเซรามิกไดอิเล็กตริก ต่ำ มีความจุ 10 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟฟ้า 400 VDC และ 250 VAC

1.4.3 ตัวเก็บประจุชนิดโพลีสไตลีน (MKS) เป็นชนิดดีที่สุดที่จะนำมาใช้ในวงจรเครื่องเสียง เหมาะสมกับวงจรความถี่สูง วงจรจูนวงจรกรองความถี่มีความจุ 10 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟฟ้า1000 VDC

1.4.4 ตัวเก็บประจุชนิดโพลีเอสเตอร์ (MKT) มีค่าความจุ 0.001-100 ไมโครฟารัด ทนแรงดัน 1500 VDC



รูปที่ ก.7 ตัวเก็บประจุแบบฟิลม์

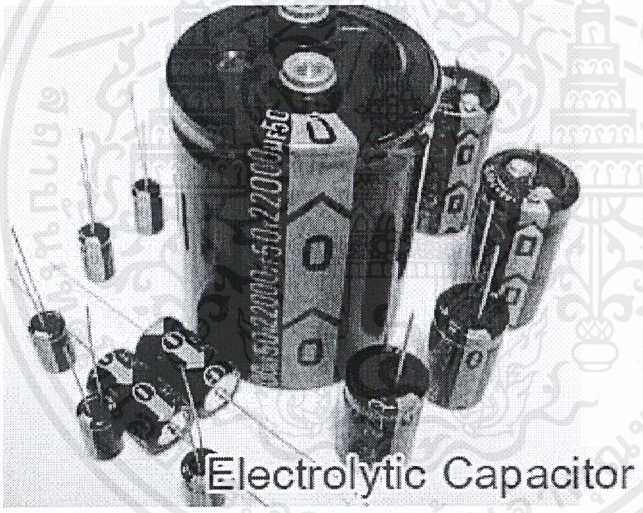
1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลอิก

โครงสร้างจะประกอบด้วยแผ่นฟอยล์โลหะ ที่ด้านหนึ่งจะเป็นออกไซด์ประกบกับกาวตัวนำ (แบบแห้ง)หรือน้ำยาอิเล็กโทรลิติก (แบบเปียก) ทำหน้าที่เป็นแผ่นตัวนำ อีกด้านของออกไซด์บนแผ่นฟอยล์จะทำหน้าที่

เป็นฉนวน ซึ่งจะอยู่ระหว่างฟอยล์โลหะกับน้ำยา กรณีแผ่นฟอยล์โลหะทำจากอะลูมิเนียมจะเรียกว่าตัวเก็บประจุชนิดอะลูมิเนียมโทรลิติก ถ้าแผ่นฟอยล์โลหะทำมาจากแทนทาลัมจะเรียกว่าตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรลิติก ตัวเก็บประจุชนิดอะลูมิเนียมอิเล็กโทรลิติกโดยปกติจะมีขนาดใหญ่กว่าแบบแทนทาลัมอิเล็กโทรลิติกและมีราคาถูกกว่า ปัญหาของตัวเก็บประจุชนิดอะลูมิเนียมคือ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งเนื่องจากขั้วซึ่งเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกับอิเล็กโทรด ทำให้ค่าความจุลดลงประมาณร้อยละสิบของอัตราที่ระบุมา ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีอายุการเก็บไว้เฉย ๆ จำกัด เนื่องมาจากการเสื่อมของชั้นฟิล์มออกไซด์และจะต้องมีการ “ก่อรูปขึ้นใหม่” (re - formed) หลังจากเก็บไว้เป็นระยะเวลานานการก่อรูปขึ้นใหม่ทำได้โดยการป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุขนาดเท่ากับอัตราทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันสูงสุดที่ระบุบนตัวเก็บประจุตัวนั้นเป็นเวลา 30 นาที การก่อรูปขึ้นใหม่เป็นการป้องกันการทะลุของไดอิเล็กตริกหรือการลัดวงจร ด้วยวิธีการป้องกันการระเหยของสารอิเล็กโทรลิติกจะมีการผนึกตรงปลายด้วยอีพอกซี ตัวเก็บประจุชนิดนี้อาจเกิดการระเบิดได้ ถ้าป้อนแรงดันเกินโดยเฉพาะตัวเก็บประจุซึ่งมีค่ามาก ตัวเก็บประจุแบบอะลูมิเนียมอิเล็กโทรลิติกนิยมใช้ในวงจรกรองสัญญาณ วงจรส่งผ่านสัญญาณที่ใช้กับความถี่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากโครงเป็นแผ่นโลหะม้วนจึงมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวเหนี่ยวนำ ความถี่สูงจึงผ่านได้ลำบาก ข้อดีของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมคือจะให้ค่าความจุสูง ในขณะที่ตัวถังบรรจุมีขนาดเล็กและมีอายุการเก็บไว้เฉย ๆ ดีมาก เนื่องจากตัวเก็บประจุชนิดนี้มีคุณสมบัติในการดูดกลืนของสารไดอิเล็กตริกสูง แม้ว่าจะถูกคายประจุจนเป็นศูนย์แล้วก็ยังคงมีประจุเหลืออีกทำให้เกิดความ ผิดพลาดในการทำงาน นอกจากนั้นไม่ควรนำไปใช้ในวงจรผลิตสัญญาณสไปค์ (Spike) แรงดันสูง เพราะถ้าแรงดันในวงจรมีค่าสูงเกินกว่าอัตราทนแรงดันของตัวเก็บประจุเพียง 2-3 โวลต์ จะทำให้ตัวเก็บประจุเสียหายได้ โครงสร้างของอิเล็กโทรลิติกแบบไม่มีขั้วนั้นจะเพิ่มฉนวนกั้นที่แคโทดทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้น



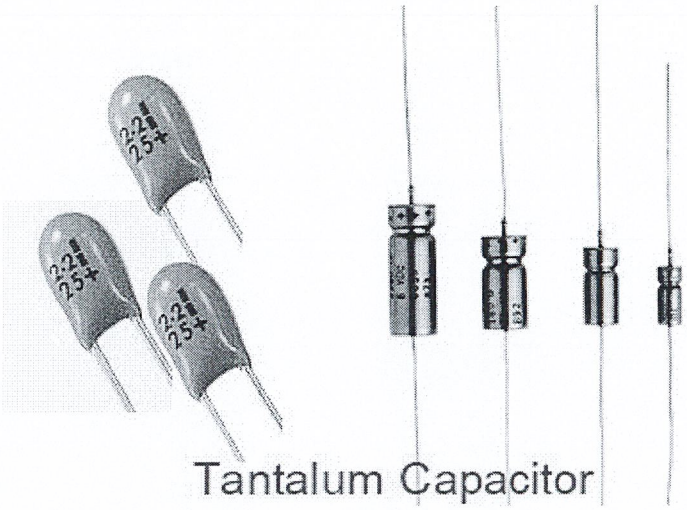
รูปที่ ก.8 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลอิก

1.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้สารแทนทาลัมทำเป็นขั้วบวกแทนอลูมิเยียม ส่วนสารอิเล็กโตรไลท์ที่ใช้ทำเป็นไดอิเล็กตริกนั้นจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบโซลิดอิเล็กโตรไลท์ ซึ่งใช้ MnO_2 และแบบซัลฟูริกแอซิด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบอลูมเนียมอิเล็กโตรไลอิกแล้วปรากฏว่ามีคุณสมบัติการรั่วของกระแส, ความถี่และอุณหภูมิ ที่ดีกว่า จึงนิยมใช้กับวงจรกำจัดสัญญาณรบกวน วงจรฟิลเตอร์

ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุตั้งแต่ 0.001-1000 ไมโครฟารัด มีอัตราทนแรงดัน 6-120 VDC

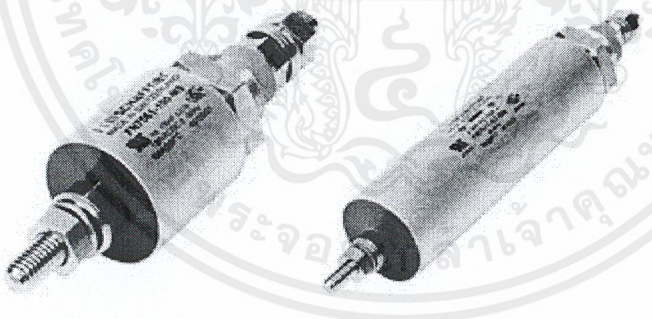
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

1.7 ฟีดทรูคาปาซิเตอร์ (feedthrough capacitor)

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ในเกี่ยวกับคลื่นวิทยุเช่นการกรองความถี่รบกวนของวิทยุติดรถยนต์ หรือพบในจูนเนอร์ของเครื่องรับโทรทัศน์ โครงสร้างเป็นแท่งทรงกลมมีแกนโลหะอยู่ตรงกลาง มีขาต่อใช้งาน 2 ขา หรือขาเดียวก็ได้ โครงสร้างภายนอกจะถูกต่อลงกราวด์ ดังแสดงไว้ในรูป

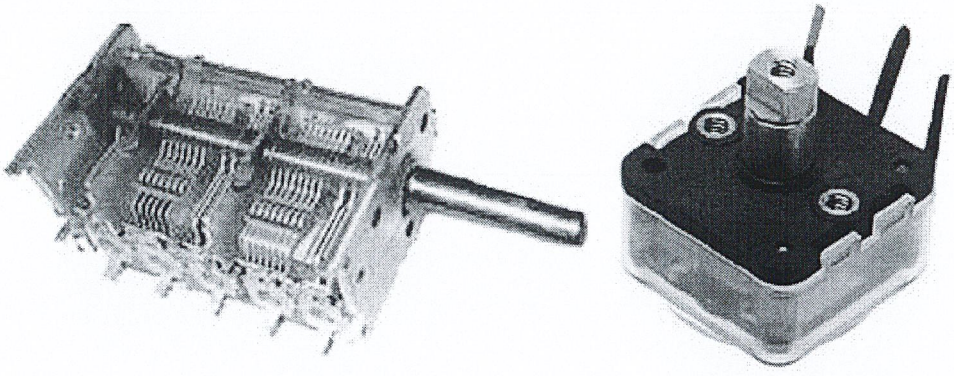


รูปที่ ก.10 ฟีดทรูคาปาซิเตอร์ feedthrough capacitor

2. ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้

เป็นตัวเก็บประจุชนิดที่ไม่ค่าคงที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งโครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นหรือมากกว่าวางใกล้กัน แผ่นหนึ่งจะอยู่กับที่ ส่วนอีกแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ โดยมีไดอิเล็กตริกหลายชนิดด้วยกัน คือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน โดยทั่วไปจะมีค่าความจุไม่มากนัก ไม่เกิน 1 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.11 ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

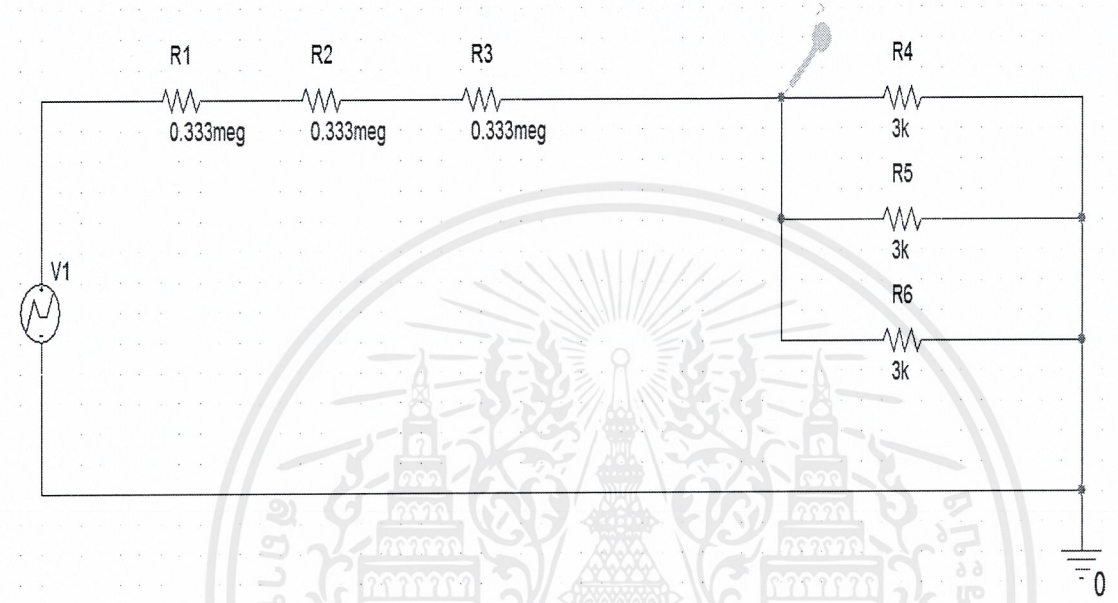
ภาคผนวก ข.

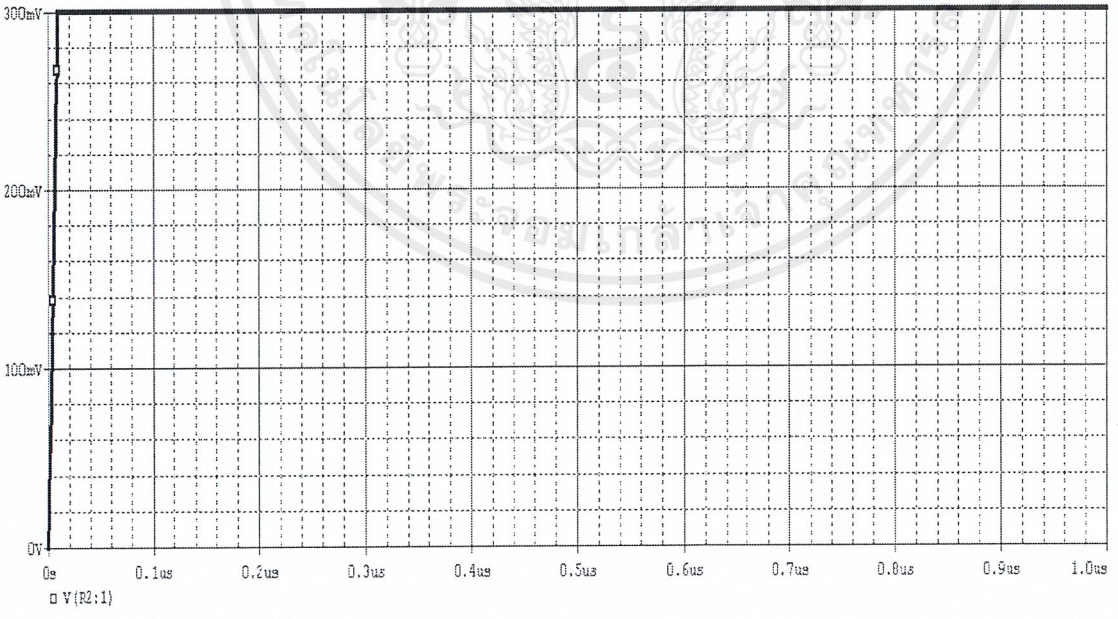
วงจรและผลการ simulation ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่าง ๆ

R divider

1. R ด้าน HV 1 เมกกะโอห์ม R ด้าน LV 1 กิโลโอห์ม

1.1 ไม่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำ

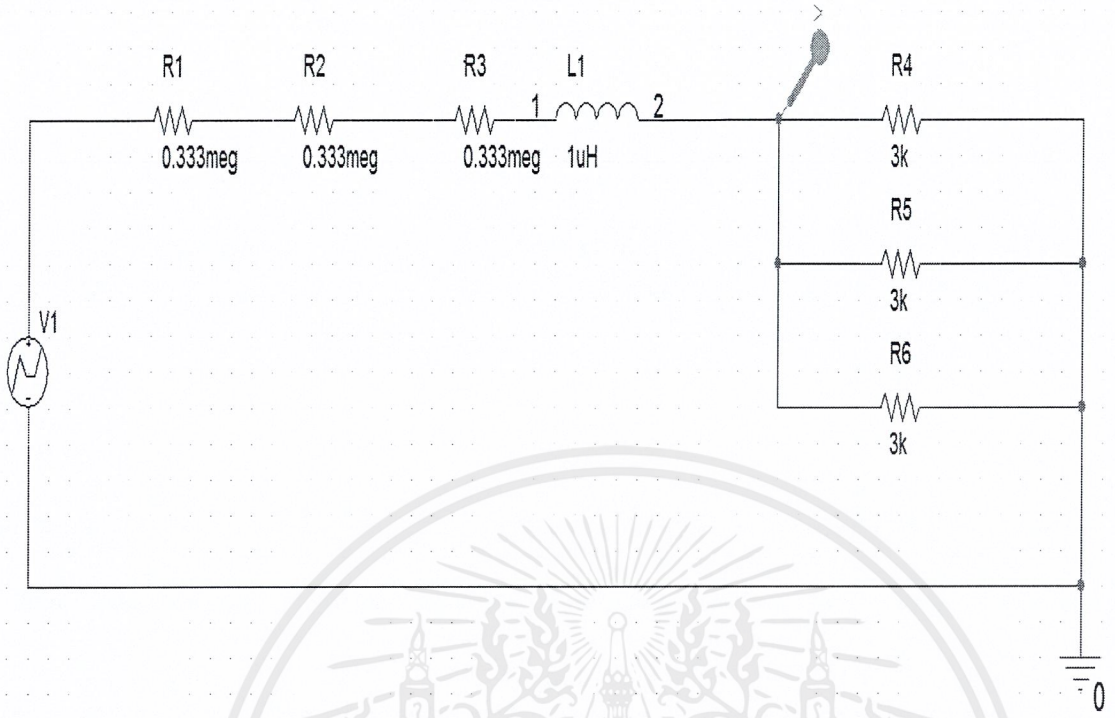


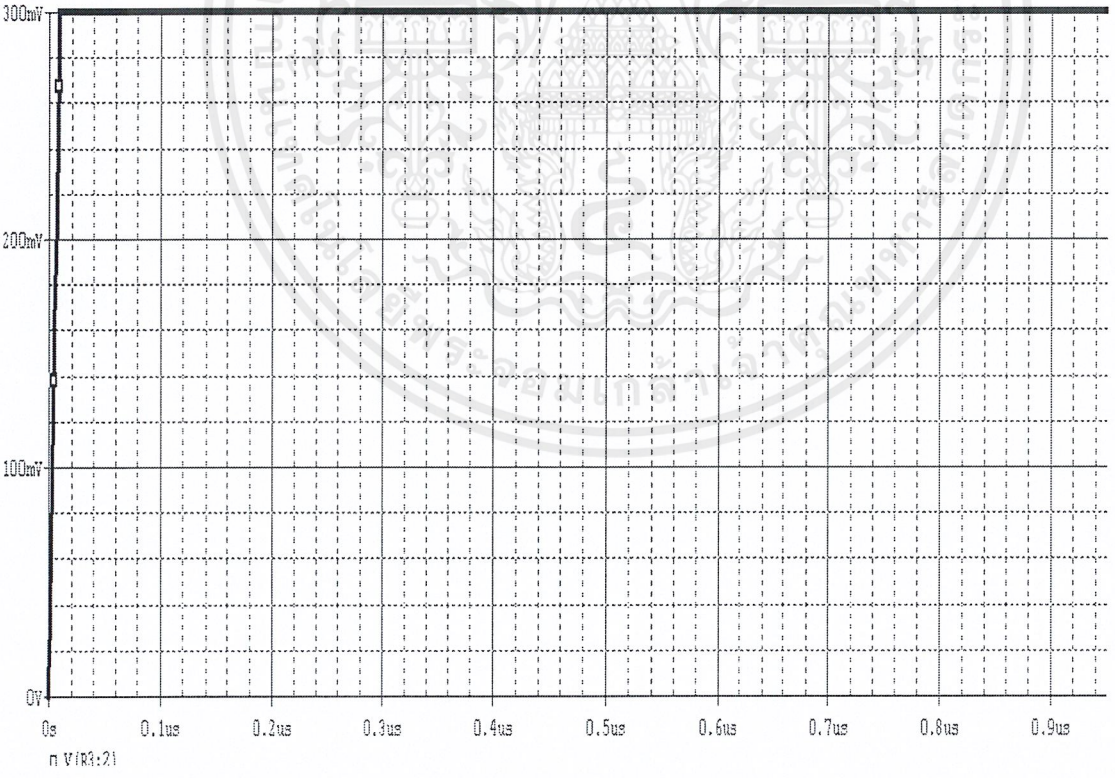


รูปที่ ข.1 R ด้าน HV 1 เมกกะโอห์ม R ด้าน LV 1 กิโลโอห์ม ไม่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 1ค่า

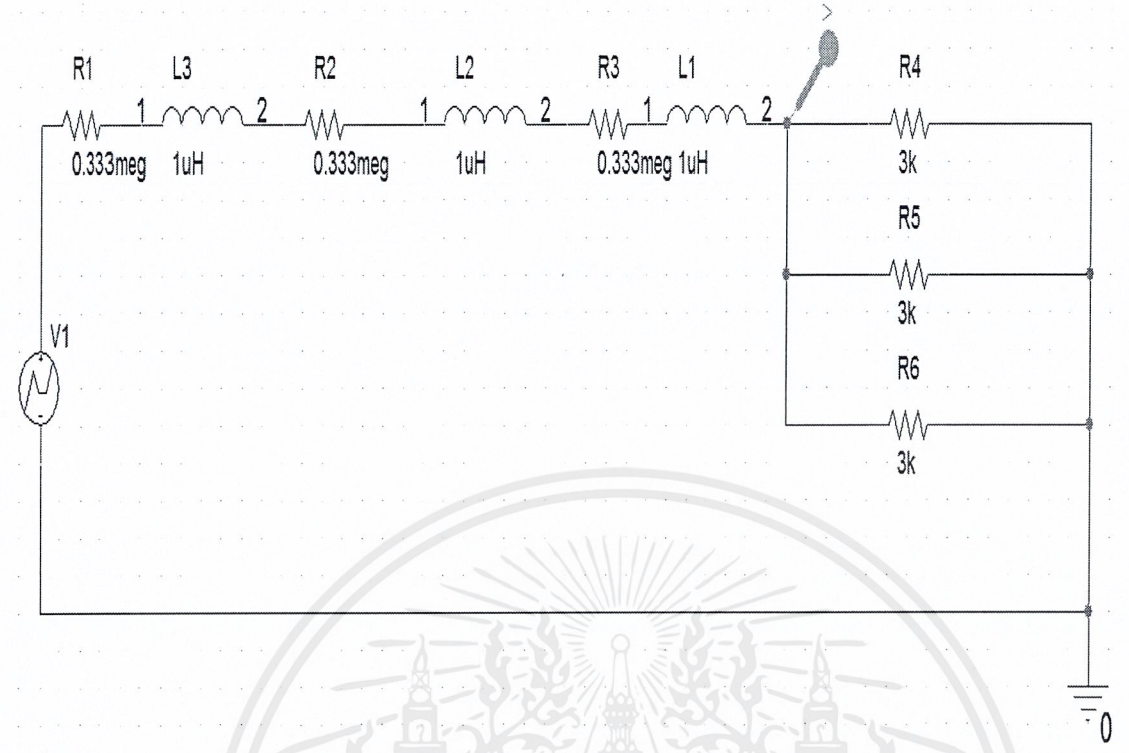


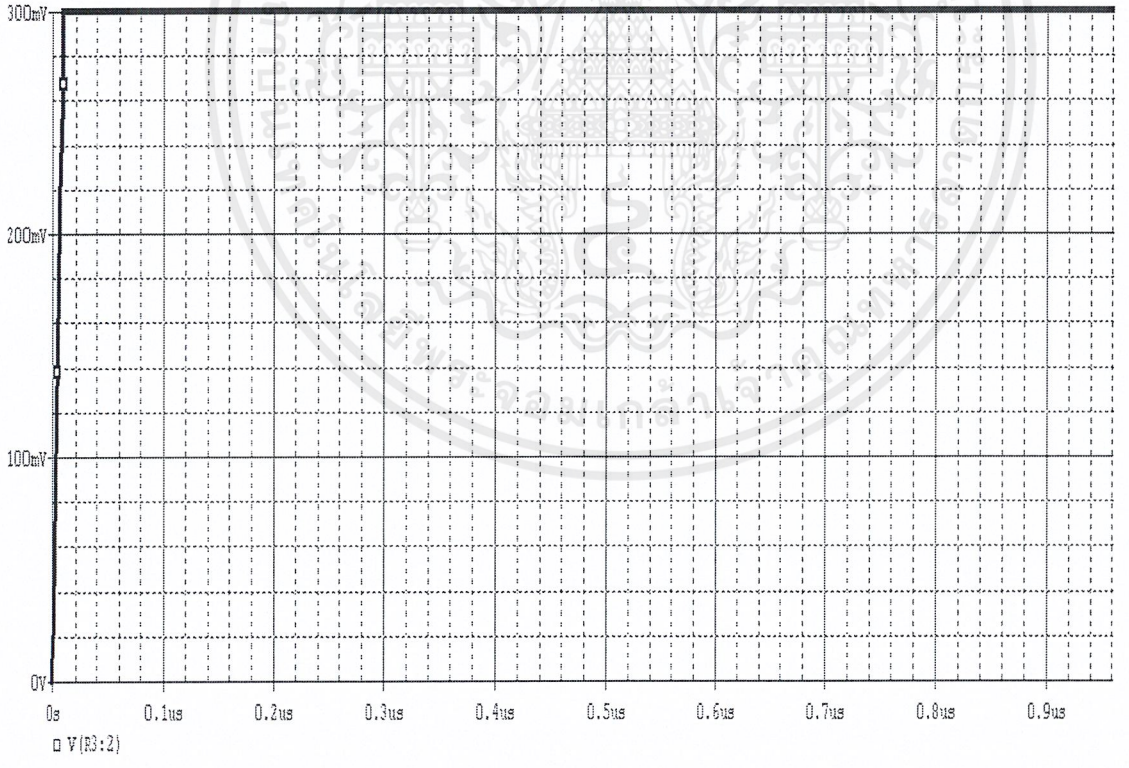


รูปที่ ข.2 R ด้าน HV 1 เมกกะโอห์ม R ด้าน LV 1 กิโลโอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวเกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 1ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 3 ค่า

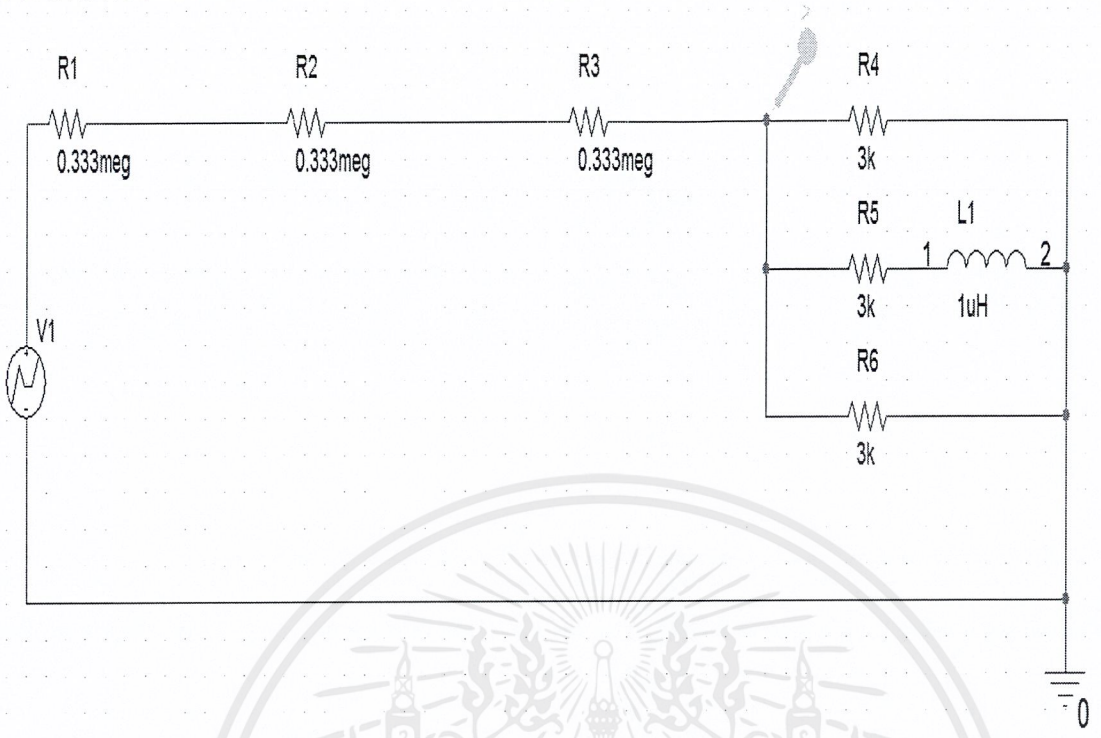


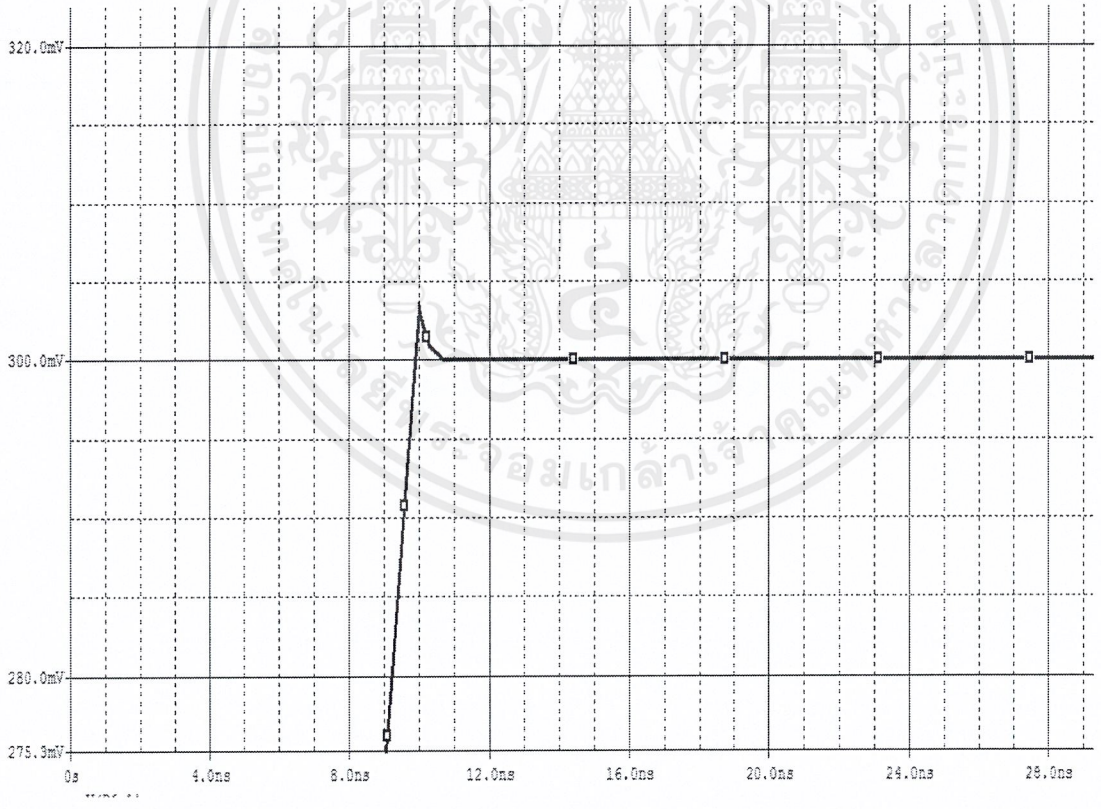


รูปที่ ข.3 R ด้าน HV 1 เมกกะโอห์ม R ด้าน LV 1 กิโลโอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวนำ เกิดความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 1ค่า

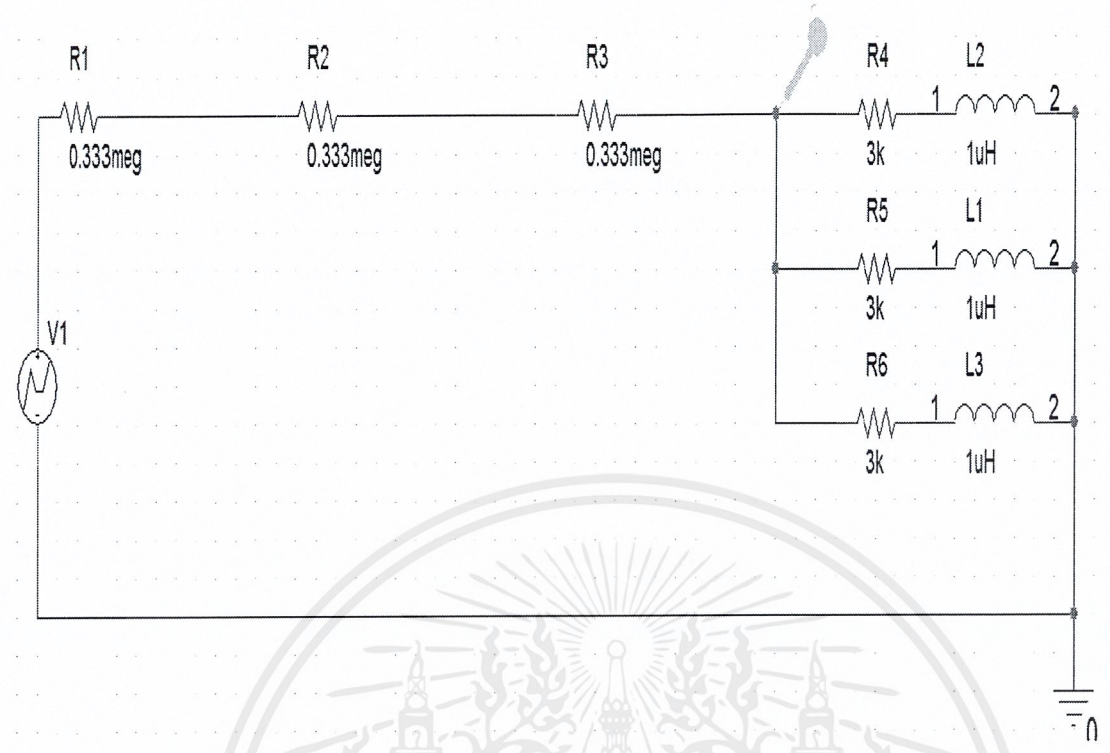


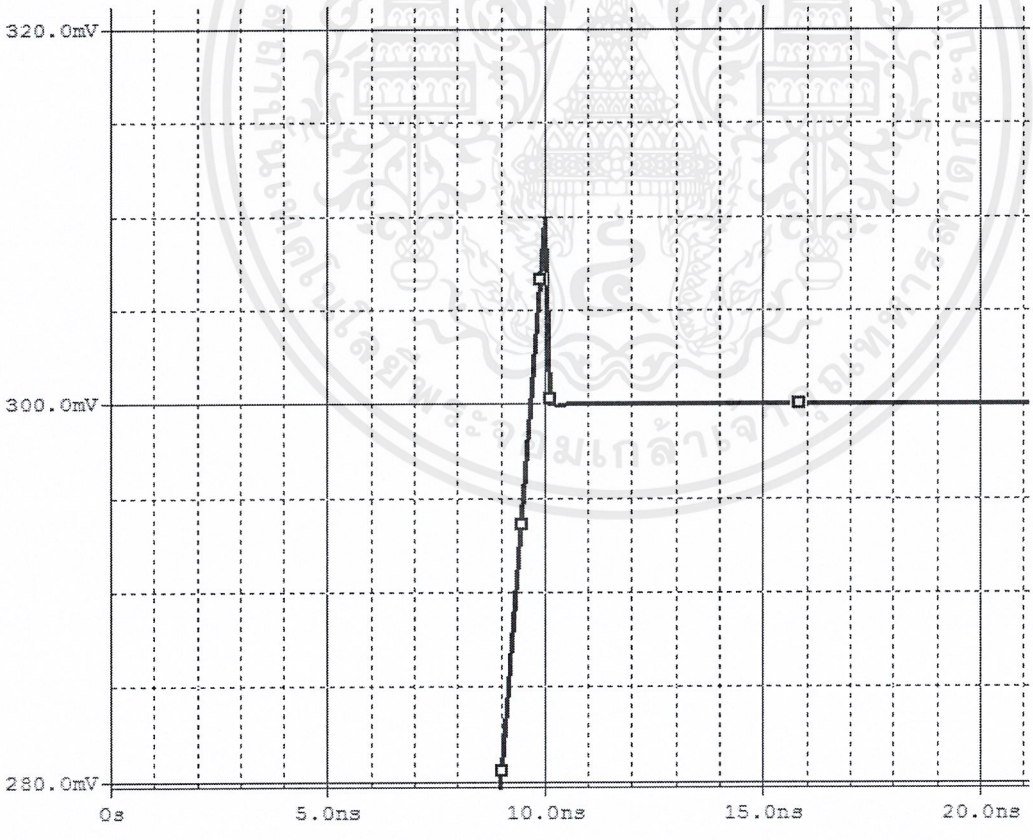


รูปที่ ข.4 R ด้าน HV 1 เมกกะโอห์ม R ด้าน LV 1 กิโลโอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวนเกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 3ค่า



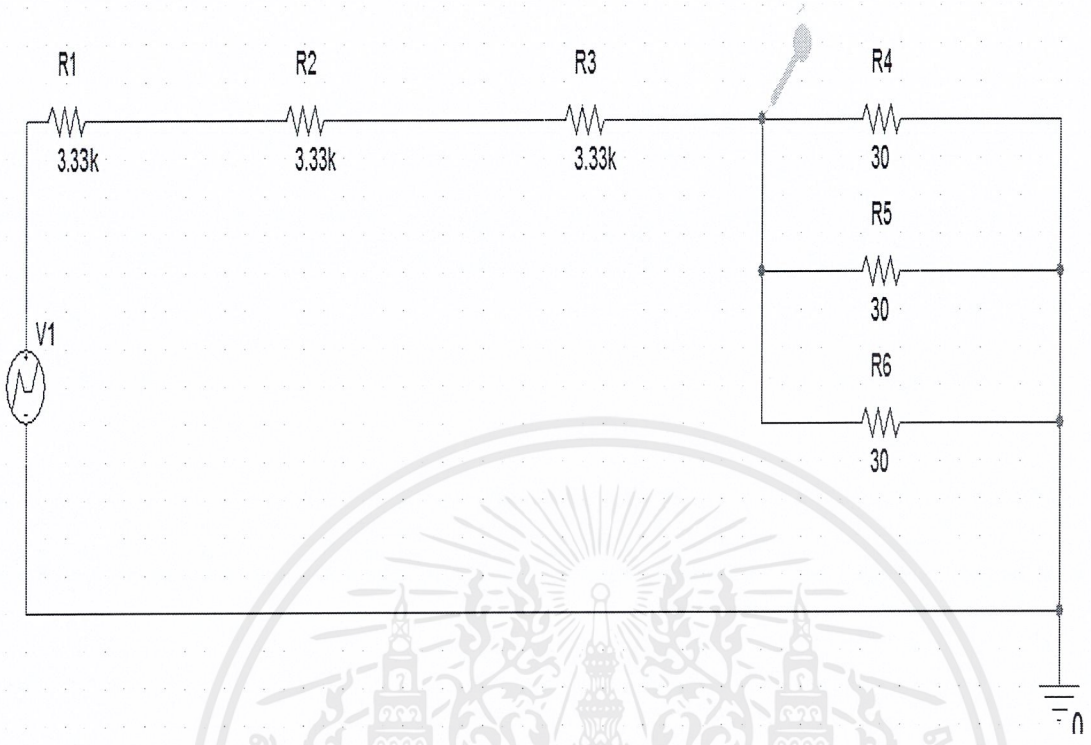


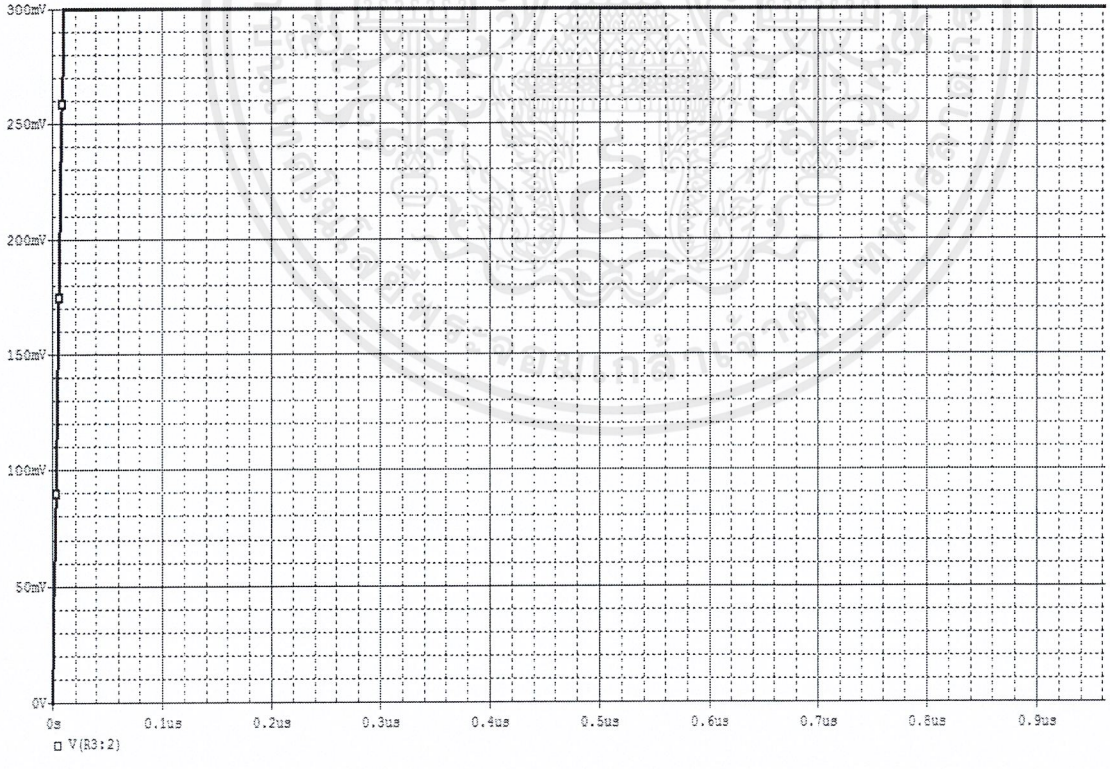
รูปที่ ข.5 R ด้าน HV 1 เมกกะโอห์ม R ด้าน LV 1 กิโลโอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวนำเกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. R ด้าน HV 10 กิโลโอห์ม R ด้าน LV 10โอห์ม

2.1 ไม่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำ

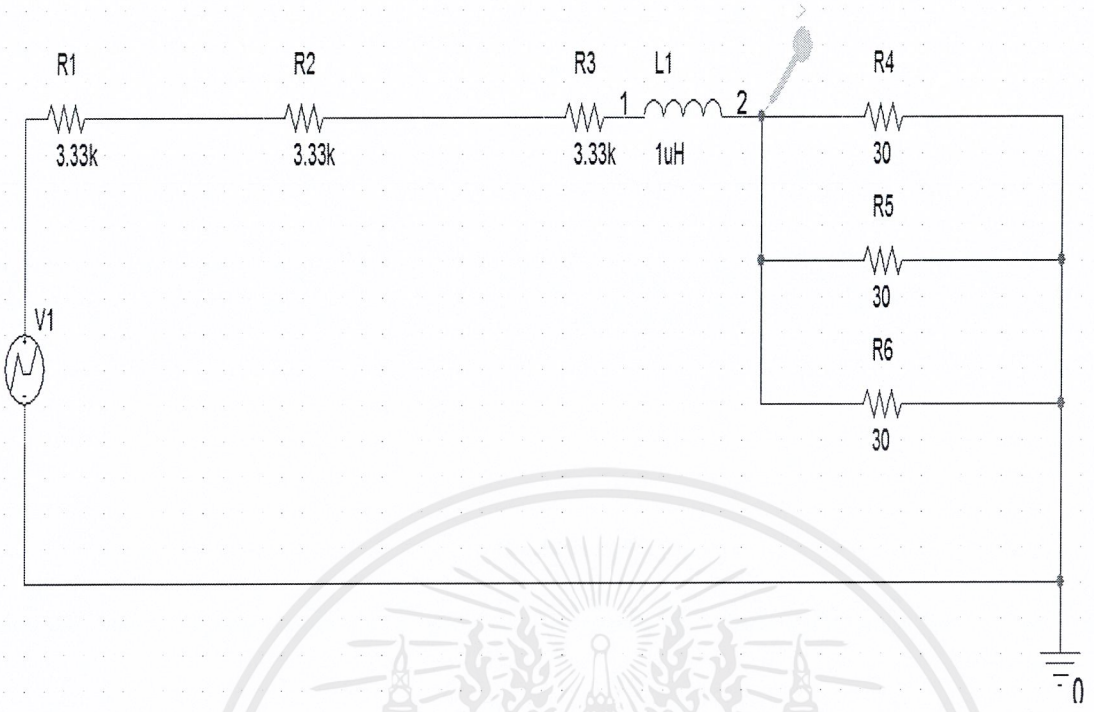


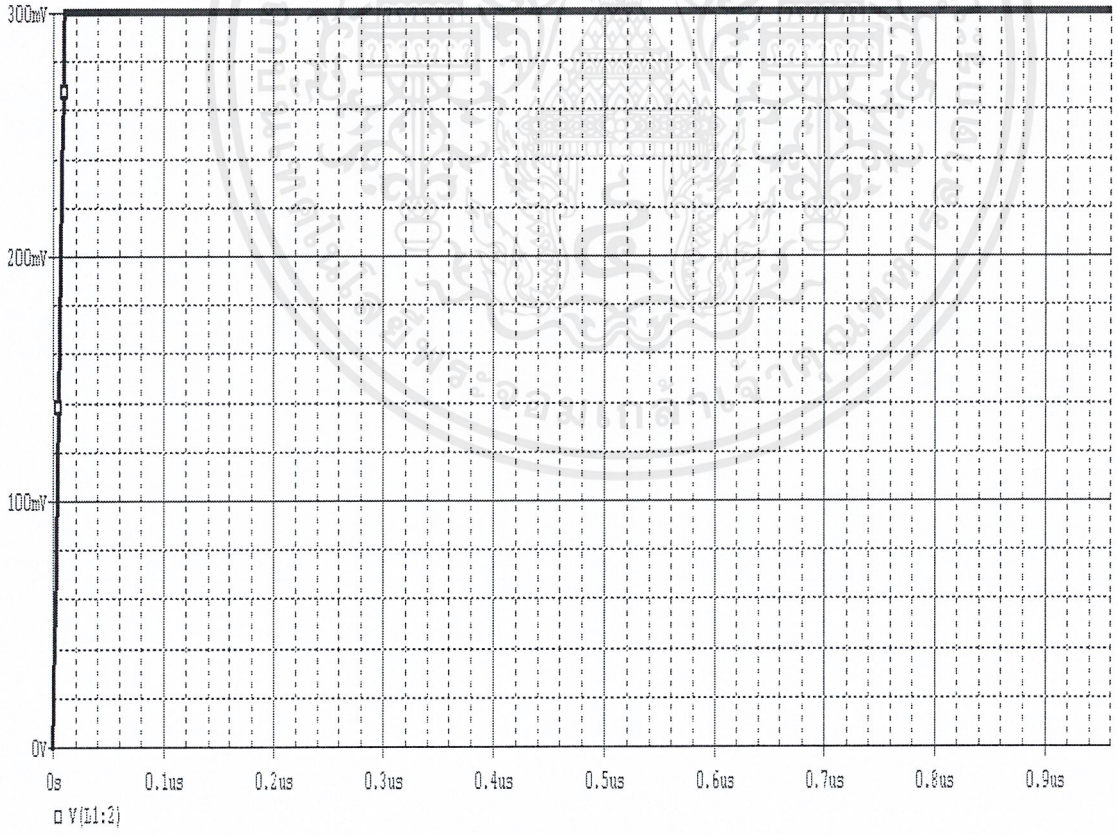


รูปที่ ข.6 R ด้าน HV 10 กิโลโอห์ม R ด้าน LV 10โอห์ม ไม่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 1ค่า

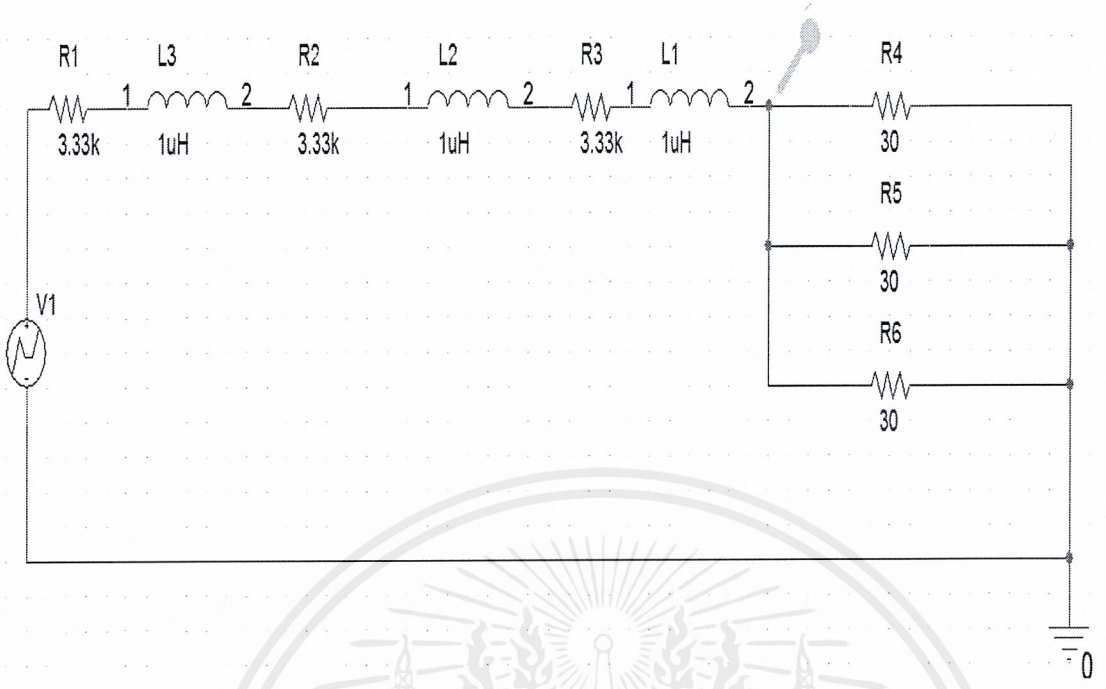


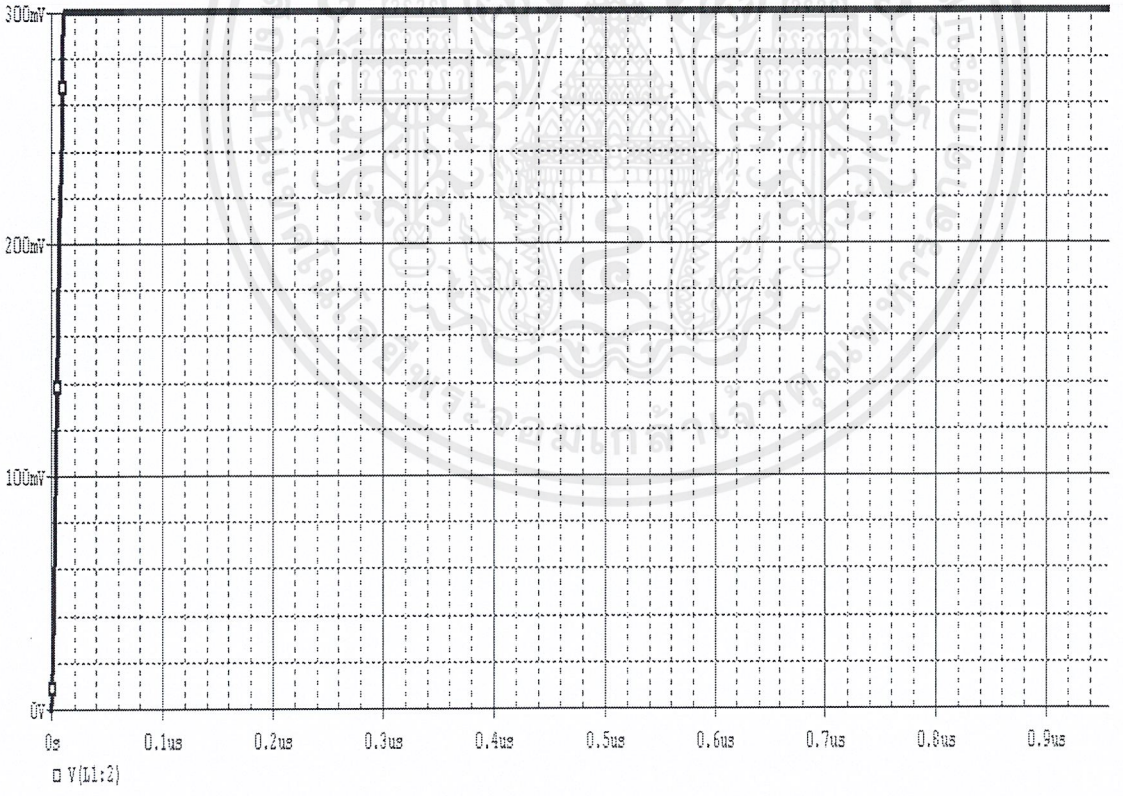


รูปที่ ข.7 R ด้าน HV 10 กิโลโอห์ม R ด้าน LV 10โอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวนำเกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 3ค่า

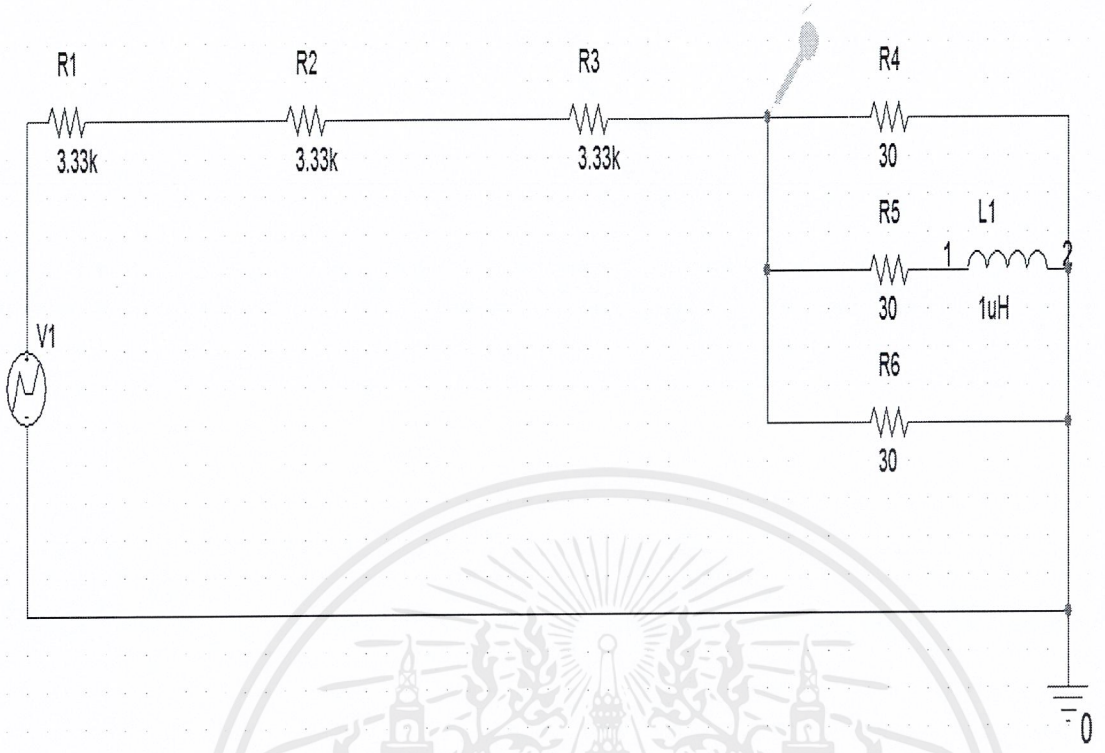


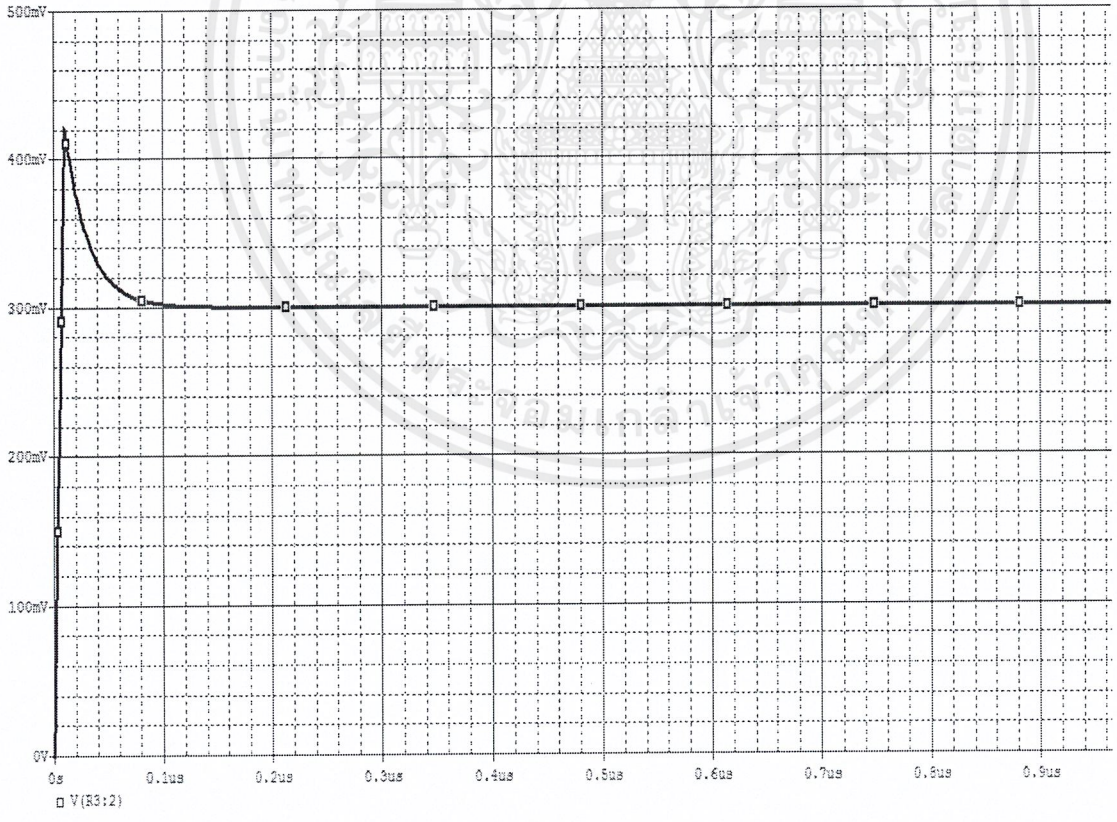


รูปที่ ข.8 R ด้าน HV 10 กิโลโอห์ม R ด้าน LV 10โอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวนำเกิดความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน HV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 1ค่า

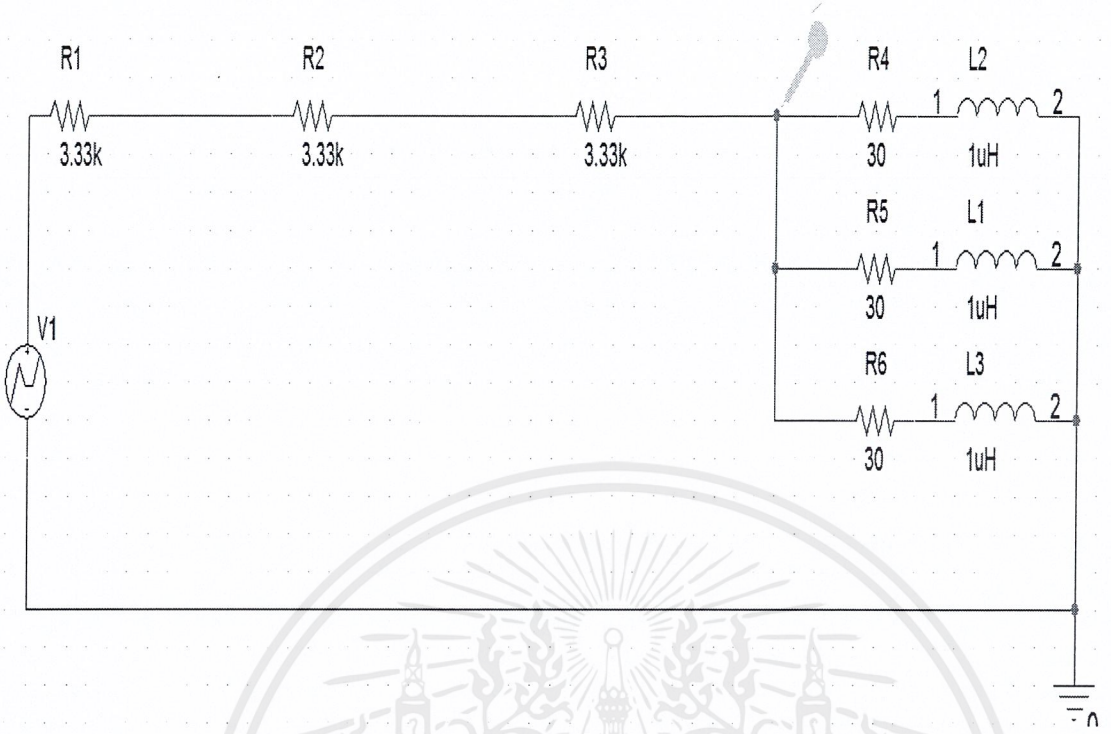


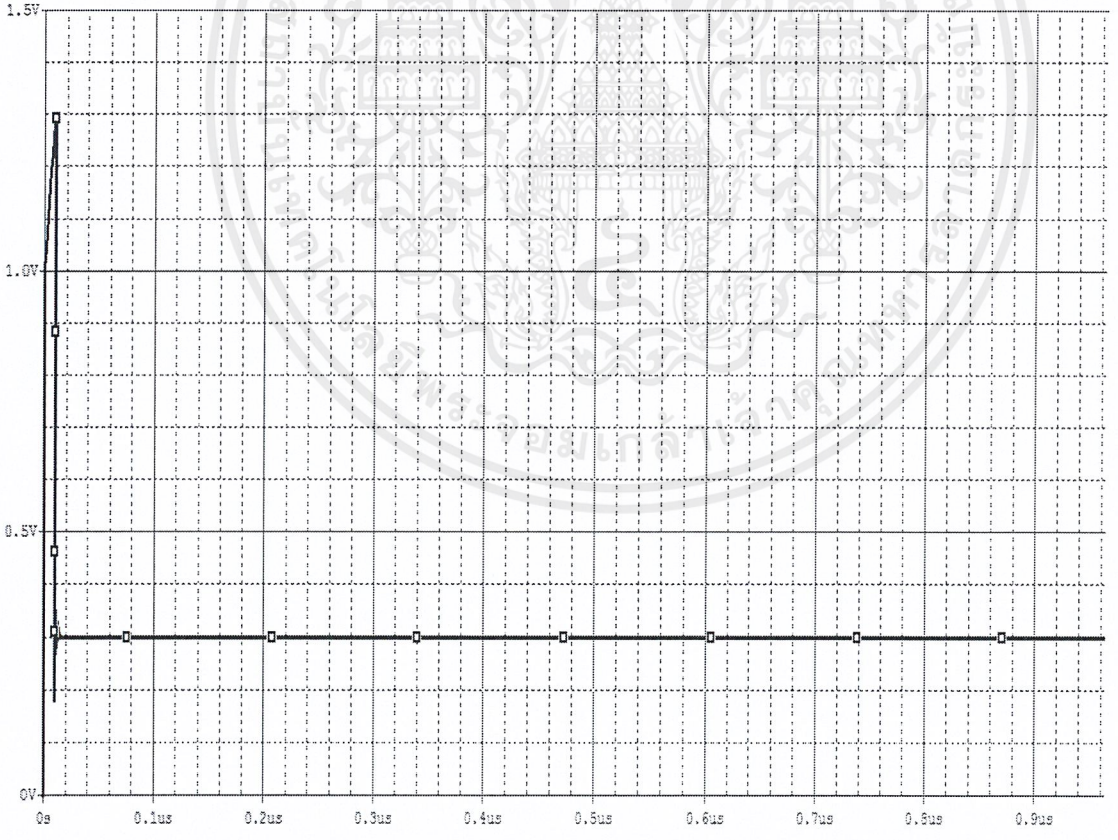


รูปที่ ข.9 R ด้าน HV 10 กิโลโอห์ม R ด้าน LV 10โอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวนำเกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 3 ค่า





รูปที่ ข.10 R ด้าน HV 10 กิโลโอห์ม R ด้าน LV 10โอห์ม มีผลของค่าความเหนี่ยวนำเกิด ความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ ที่ด้าน LV 3 ค่า

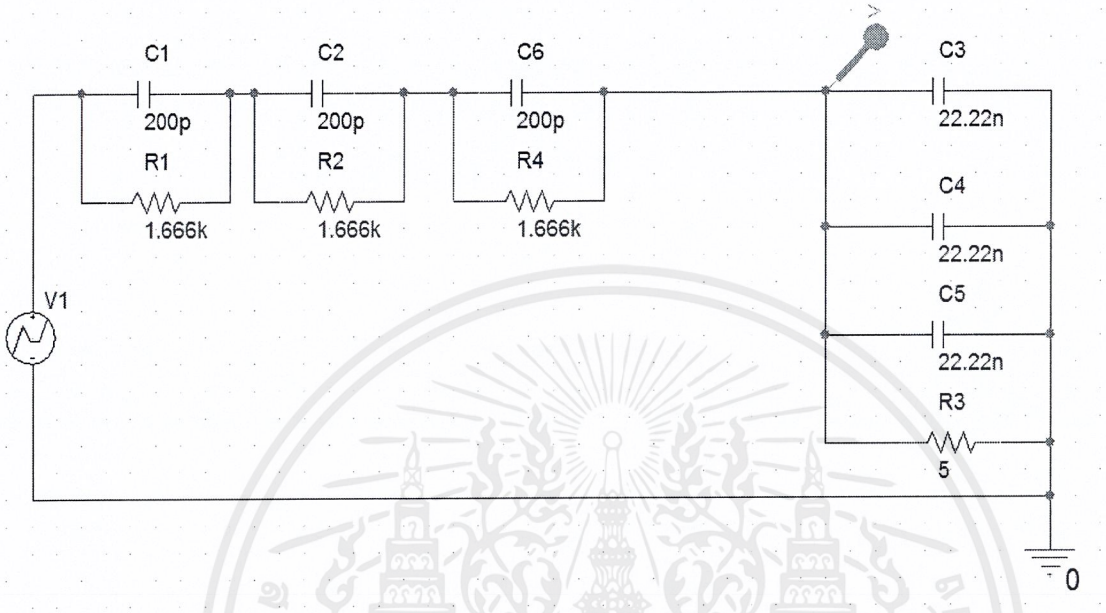
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

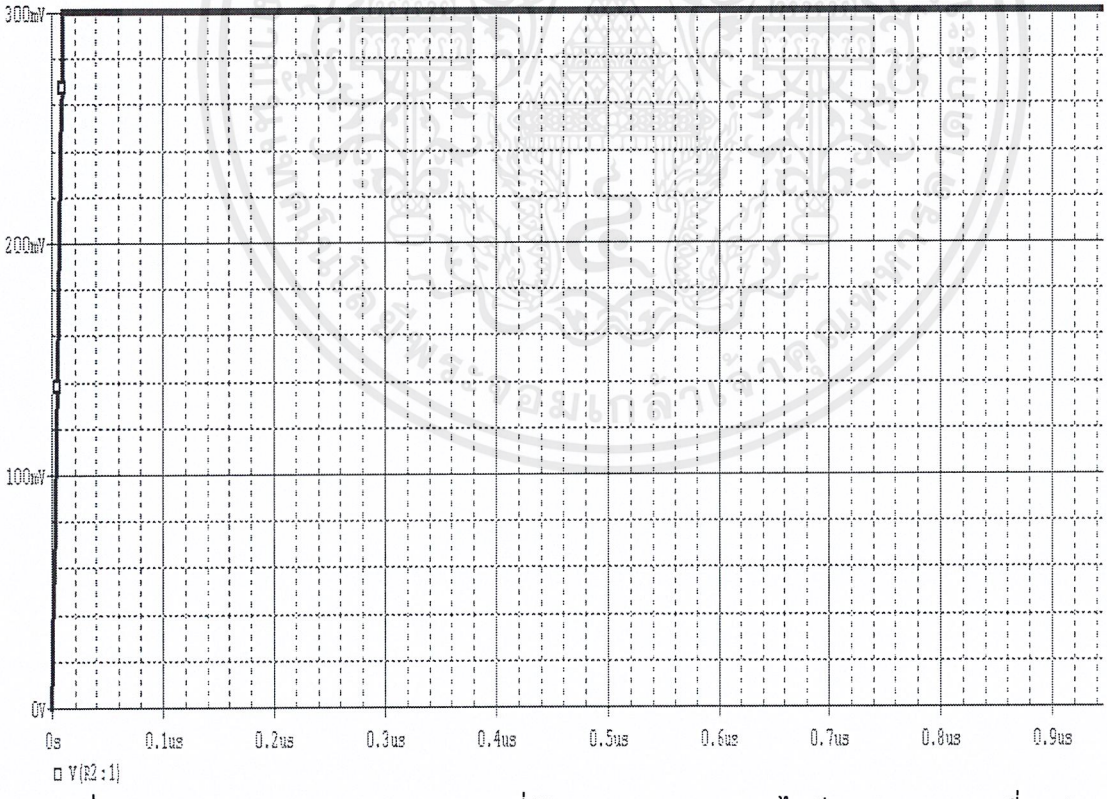
C divider

3. C ด้าน HV 66.67 พิโคฟารัด และ C ด้าน LV 66.67 นาโนฟารัด

3.1 Mix R 5 k ohm ที่ด้าน HV R 5 ohm ที่ด้าน LV แบบขนาน

3.1.1ไม่มีผลค่าความเหนี่ยวนำ

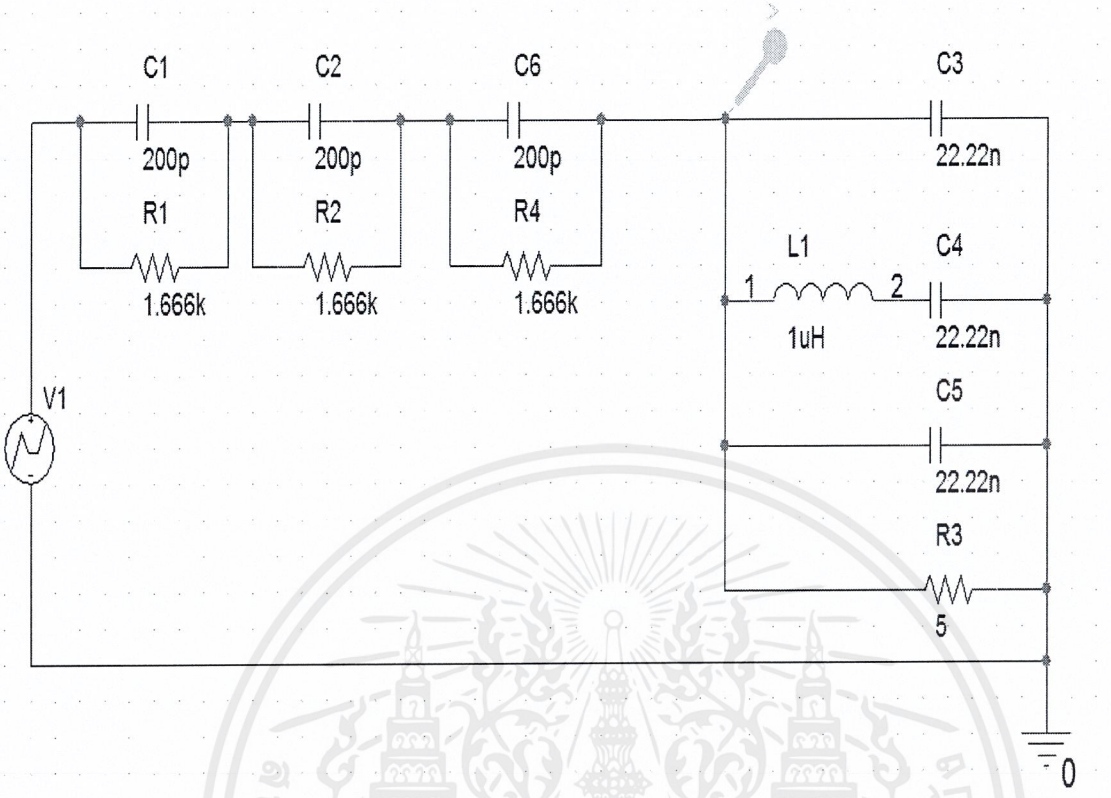


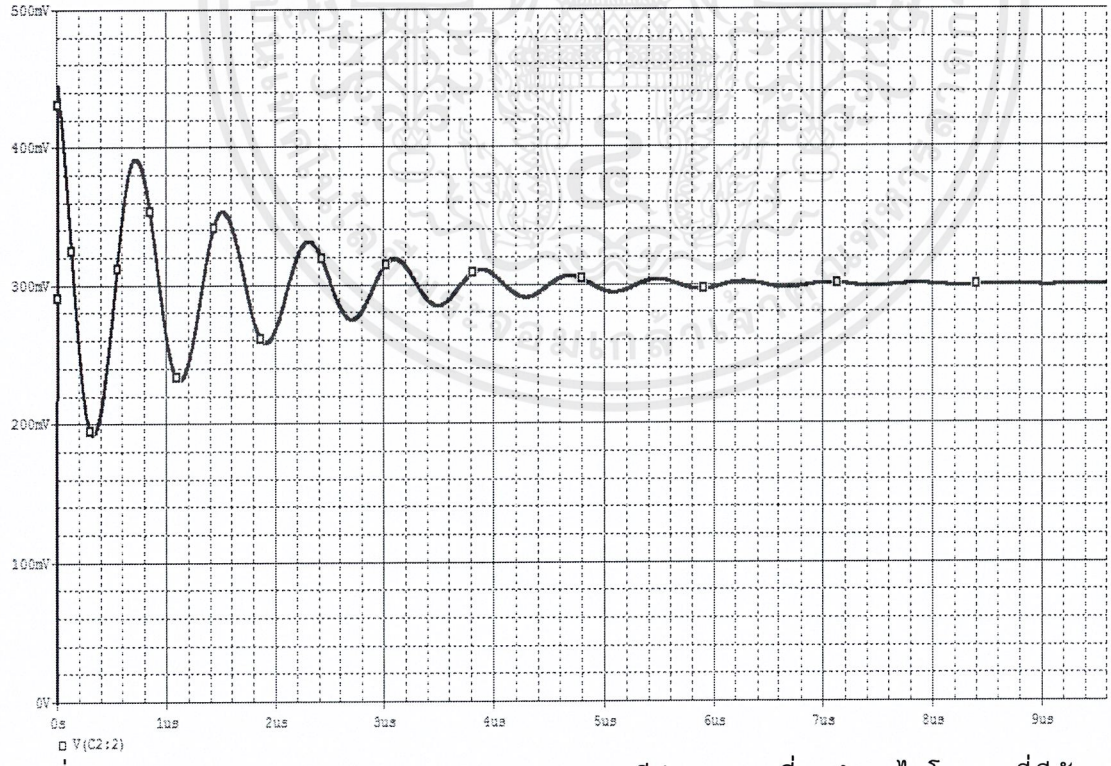


รูปที่ ข.11 C divider Mix R 5 k ohm ที่ด้าน HV แบบขนาน ไม่มีผลค่าความ เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 1 ค่า

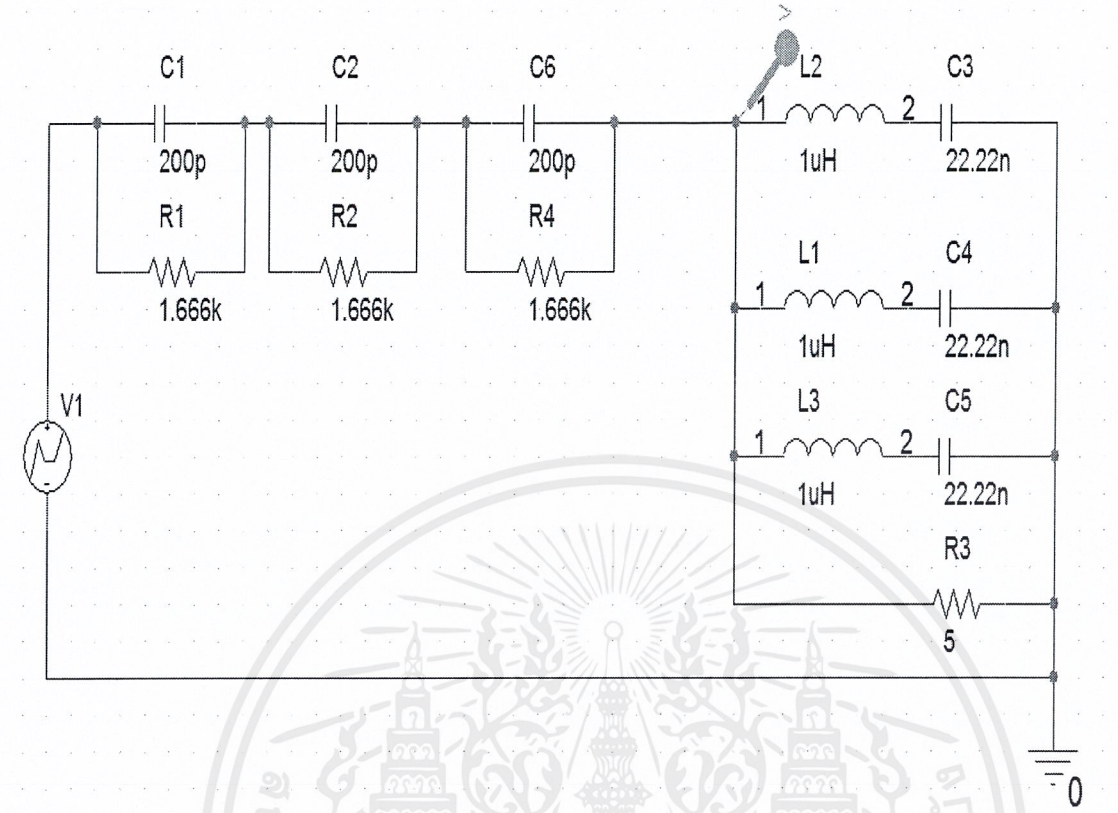


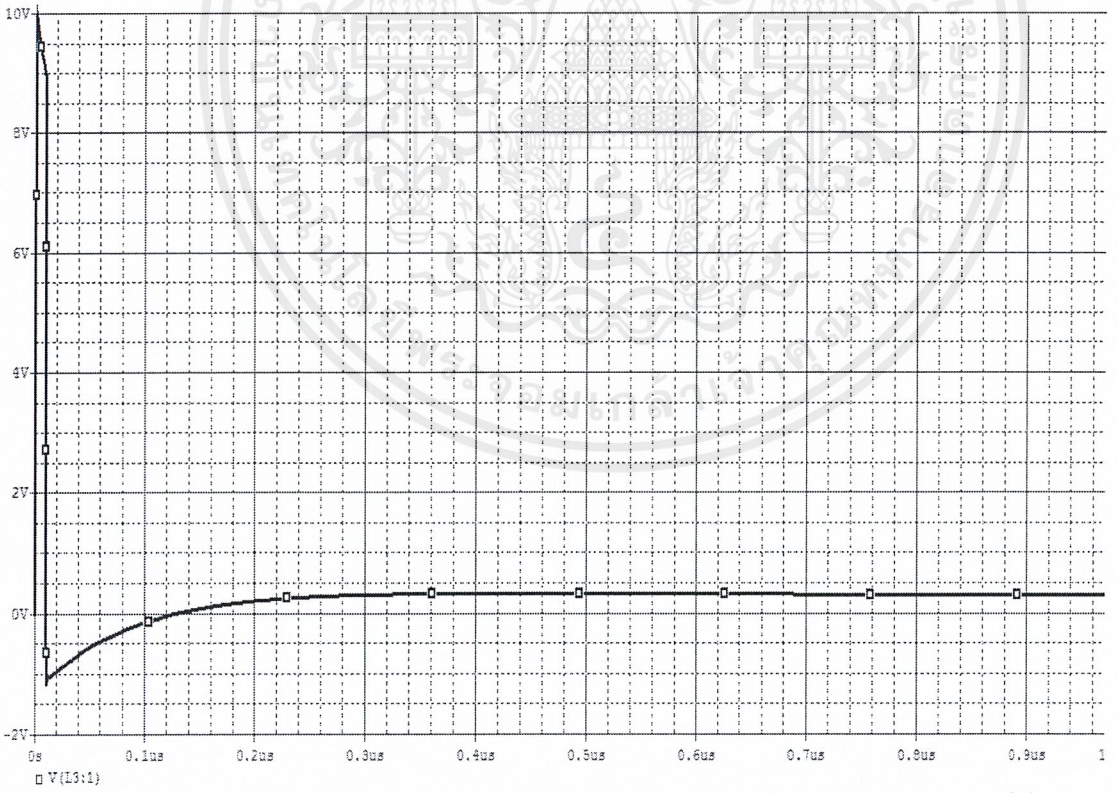


รูปที่ ข.12 C divider Mix R_1 5 k ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ทีด้าน LV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 3 ค่า

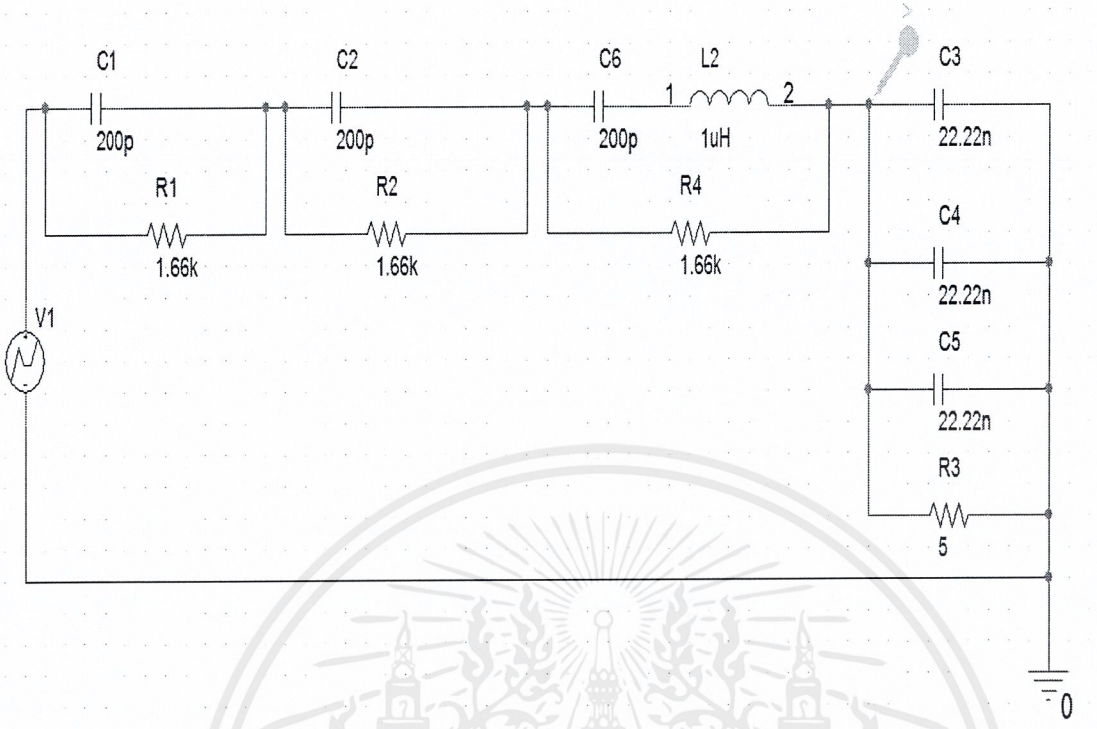


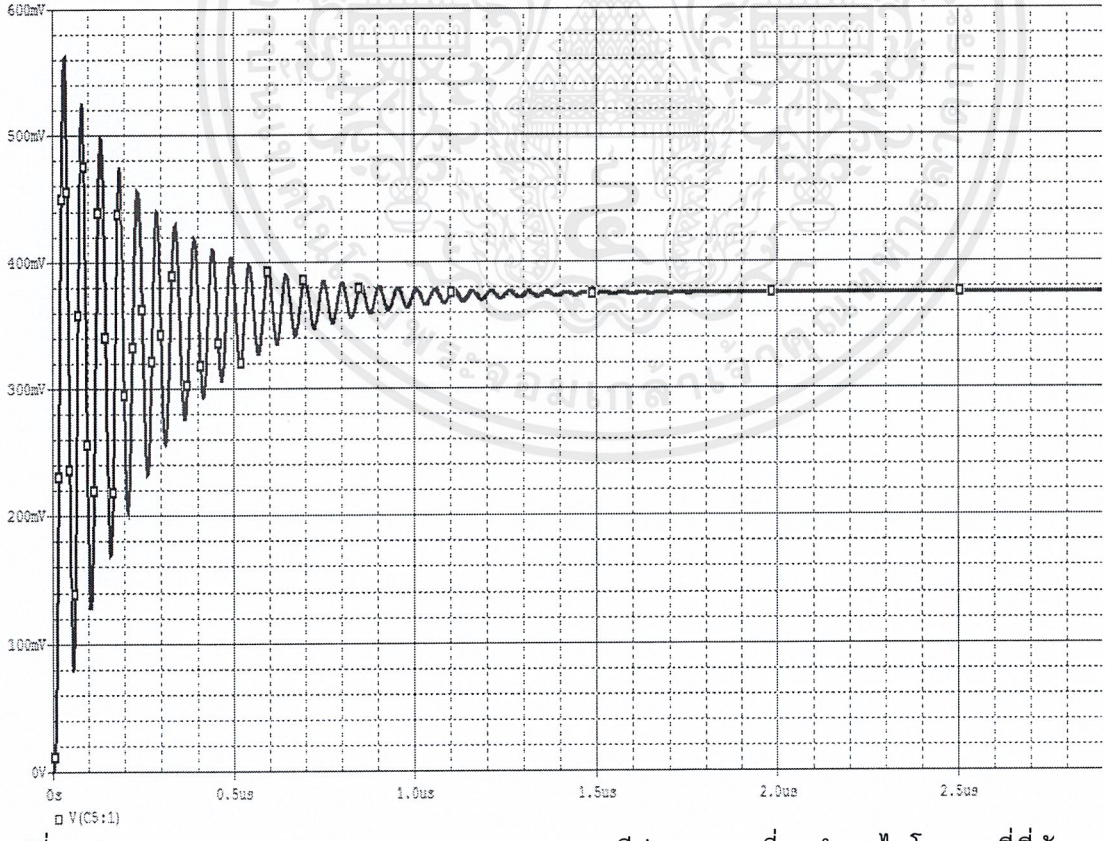


รูปที่ ข.13 C divider Mix R_1 5 k ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 1 ค่า

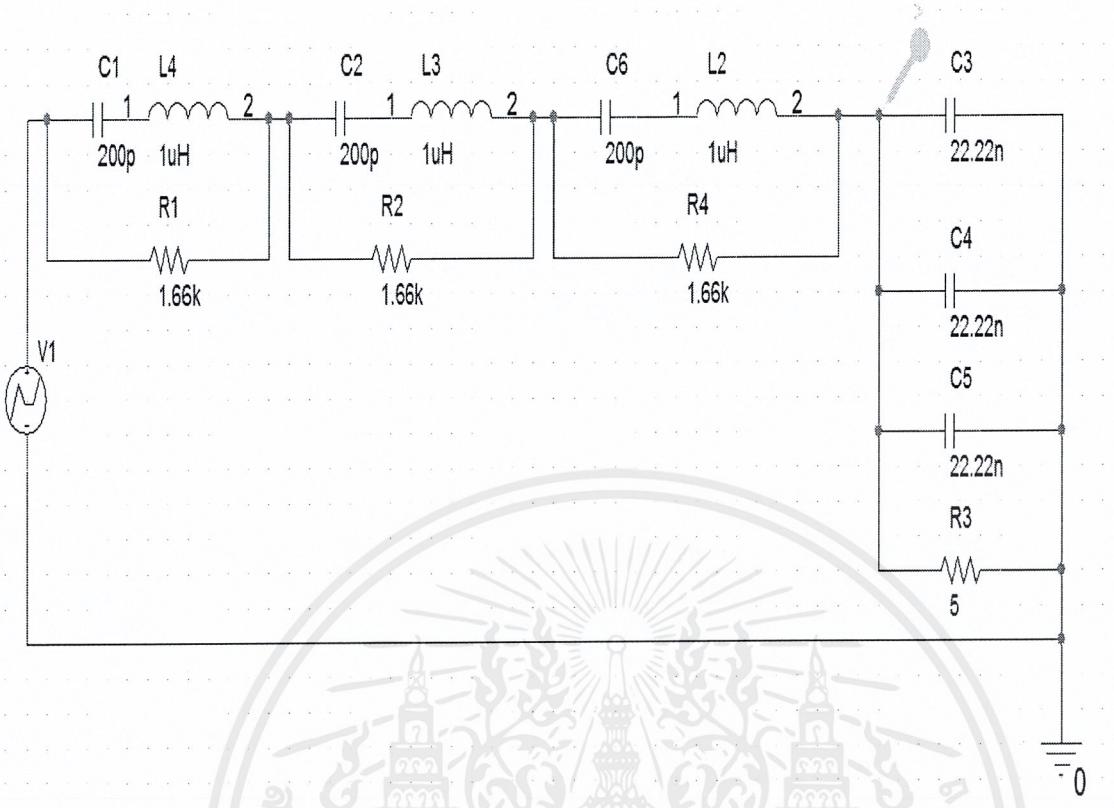


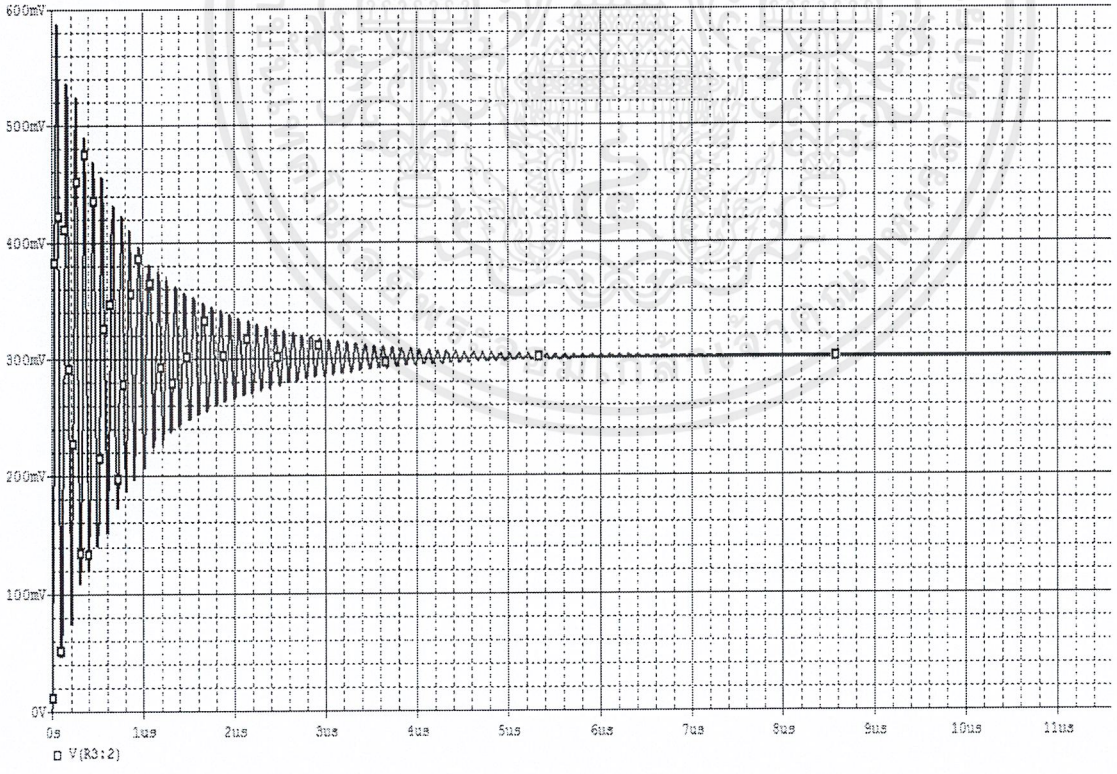


รูปที่ ข.14 C divider Mix R_1 5 k ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 3 ค่า



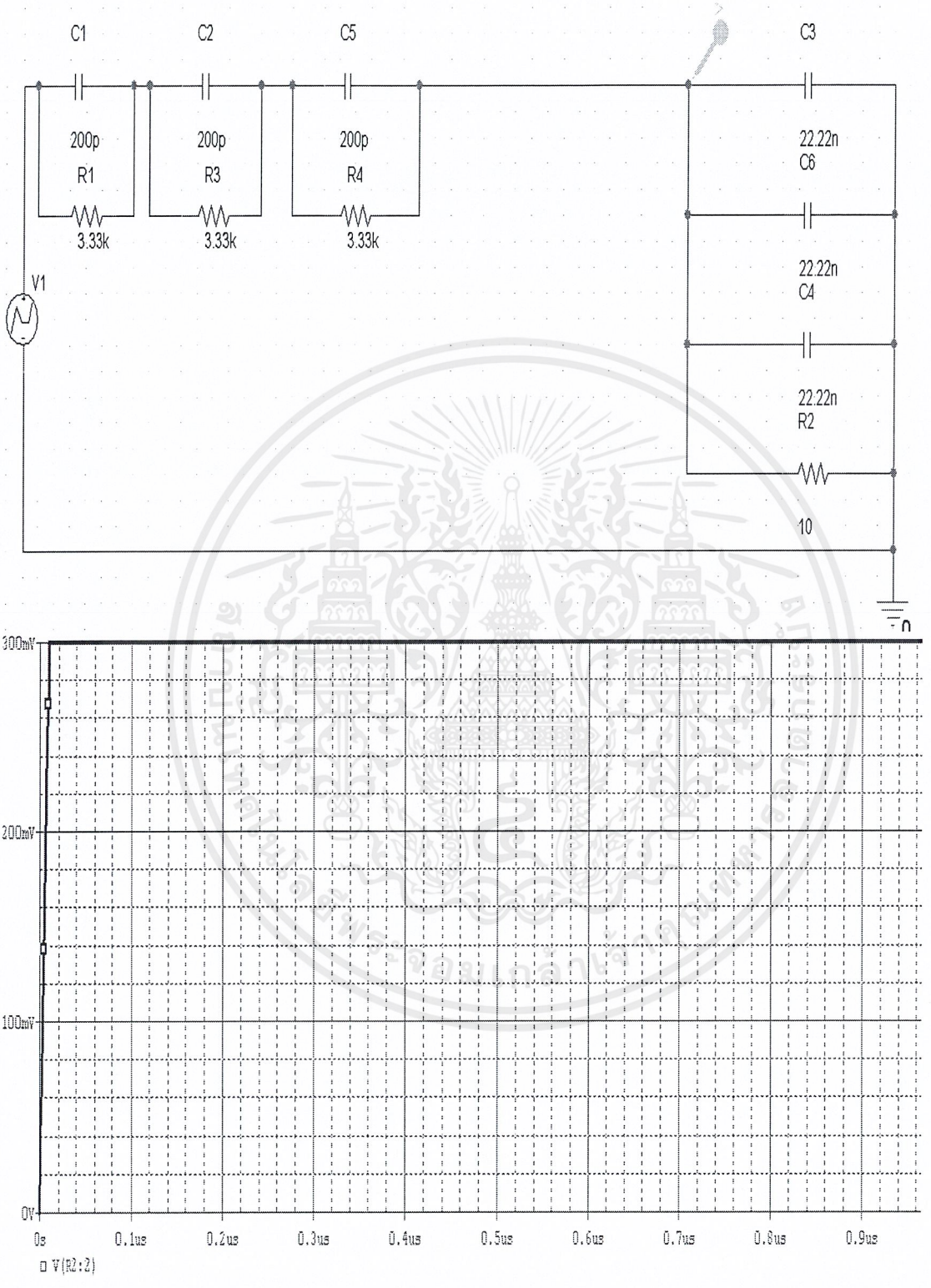


รูปที่ ข.15 C divider Mix R_1 5 k ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 Mix R 10 k ohm ที่ด้าน HV R 10 ohm ที่ด้าน LV แบบขนาน

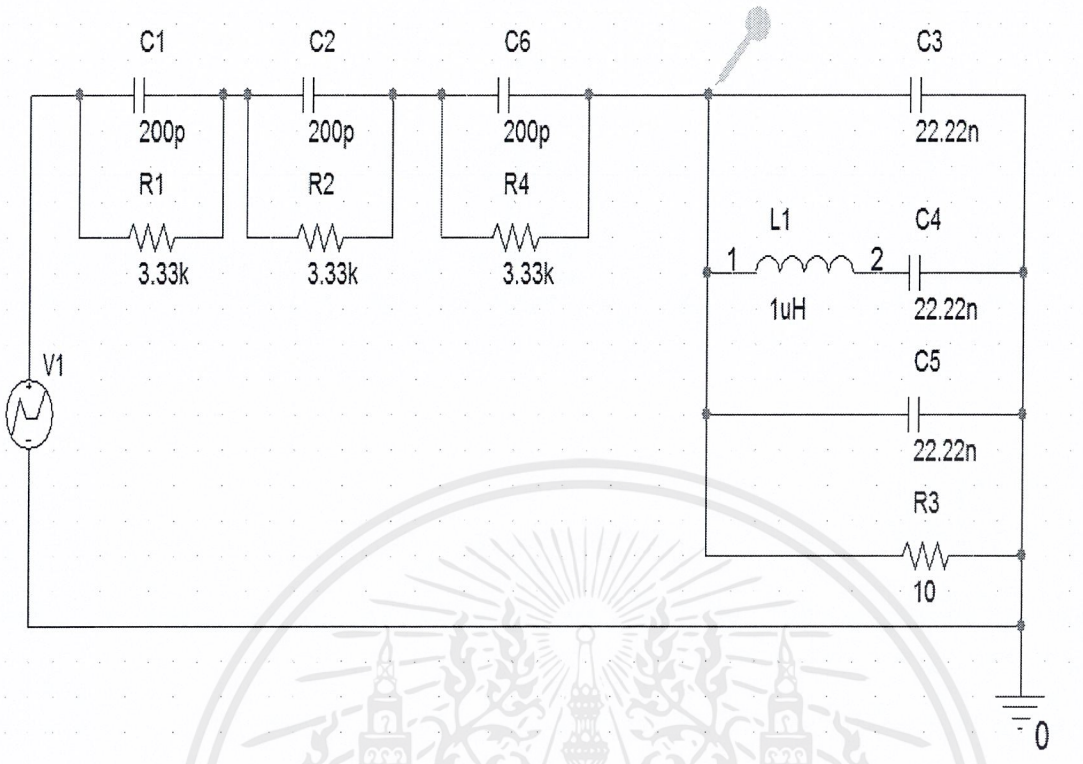
3.3.1ไม่ผลของค่าความเหนี่ยวนำ

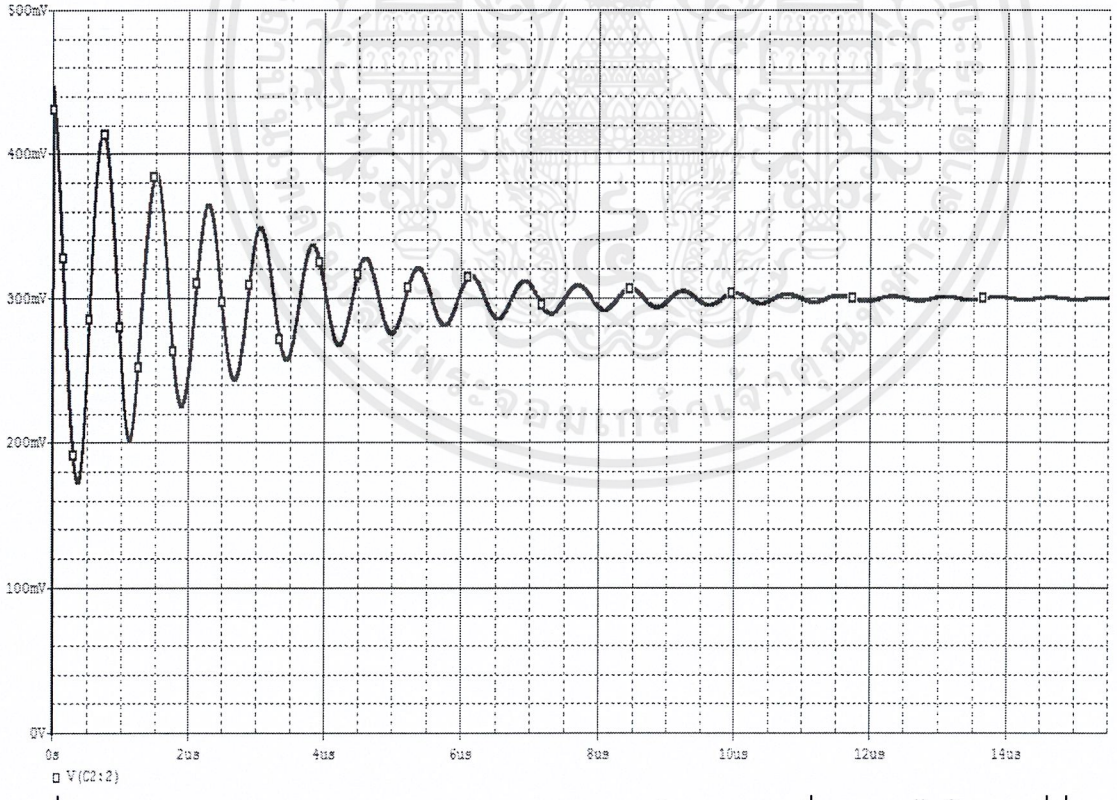


รูปที่ ข.16 C divider Mix R_1 10 k ohm แบบขนาน ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 1 ค่า

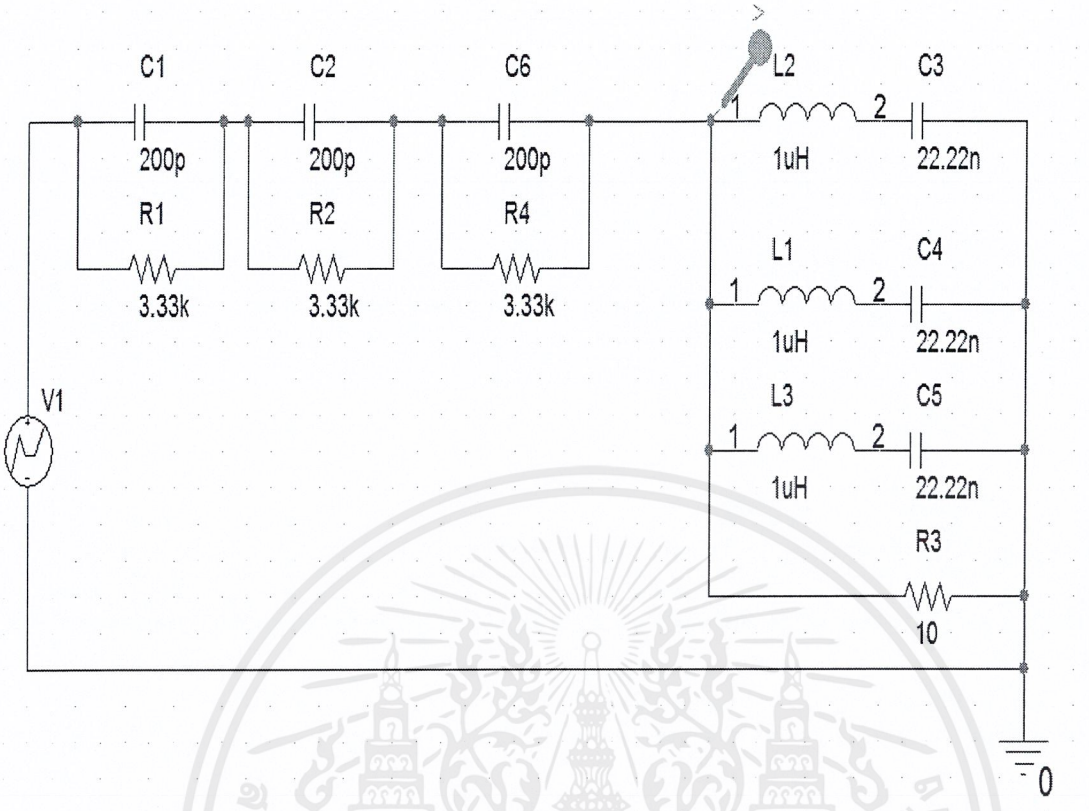


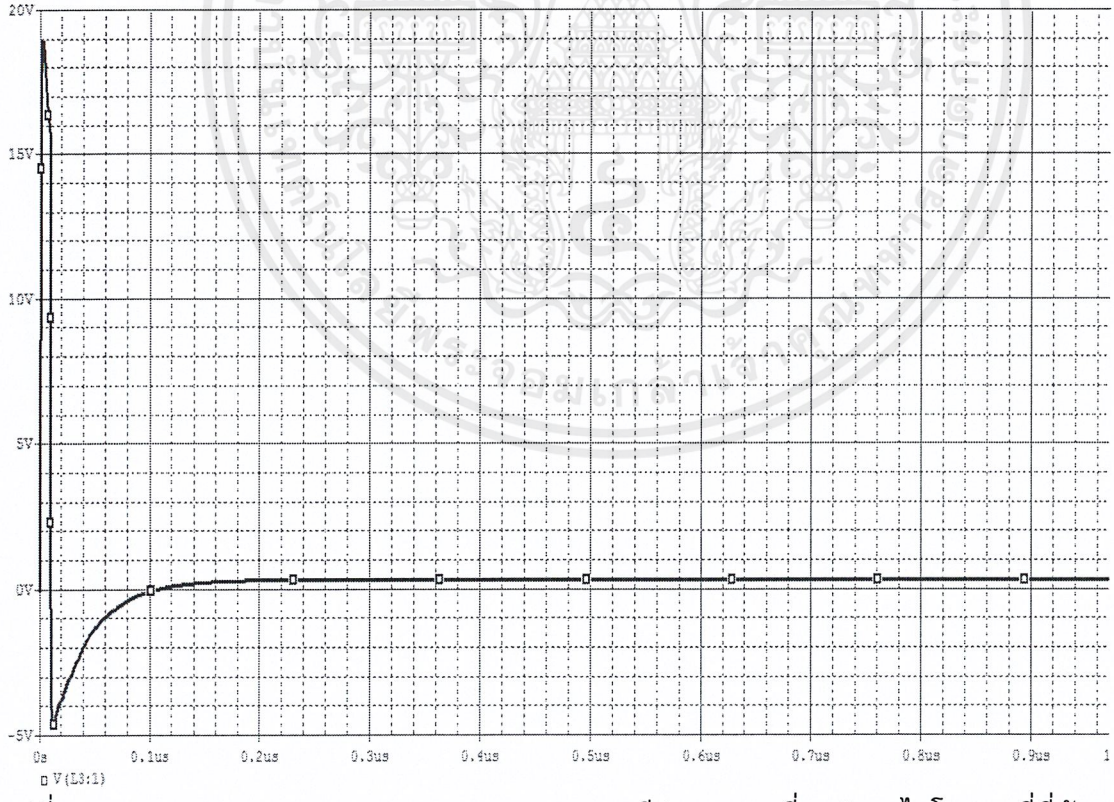


รูปที่ ข.17 C divider Mix R_1 10 k ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 3 ค่า

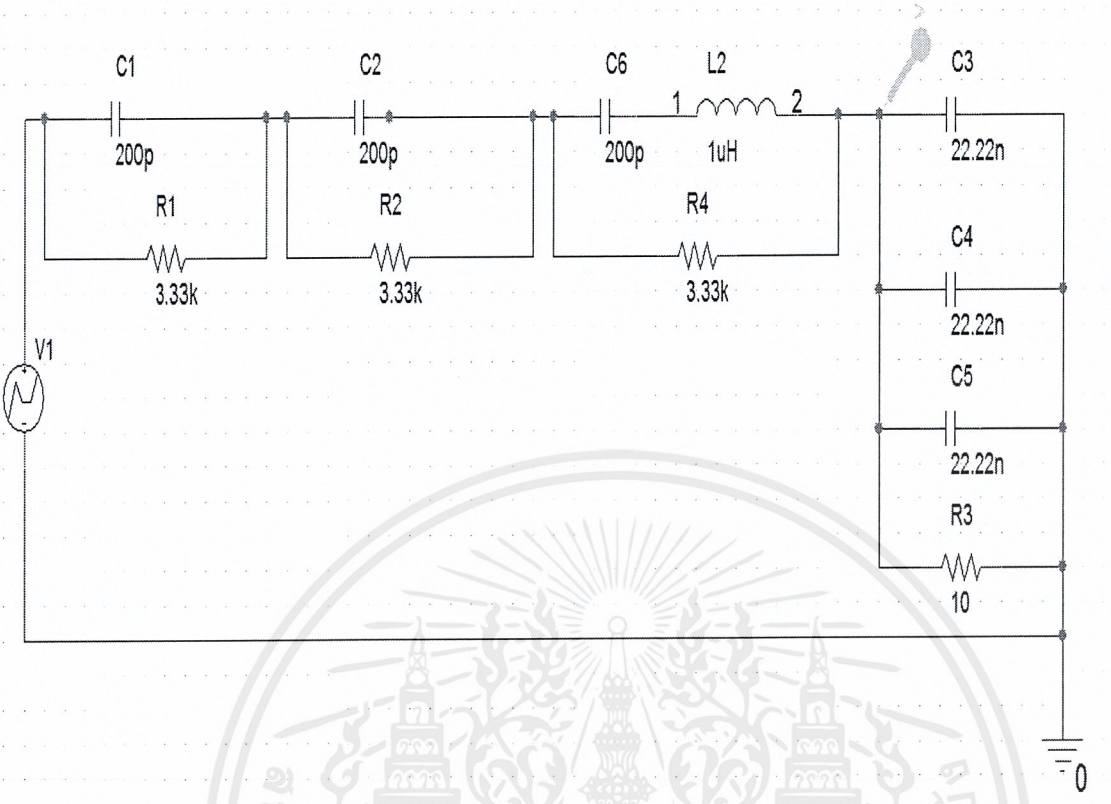


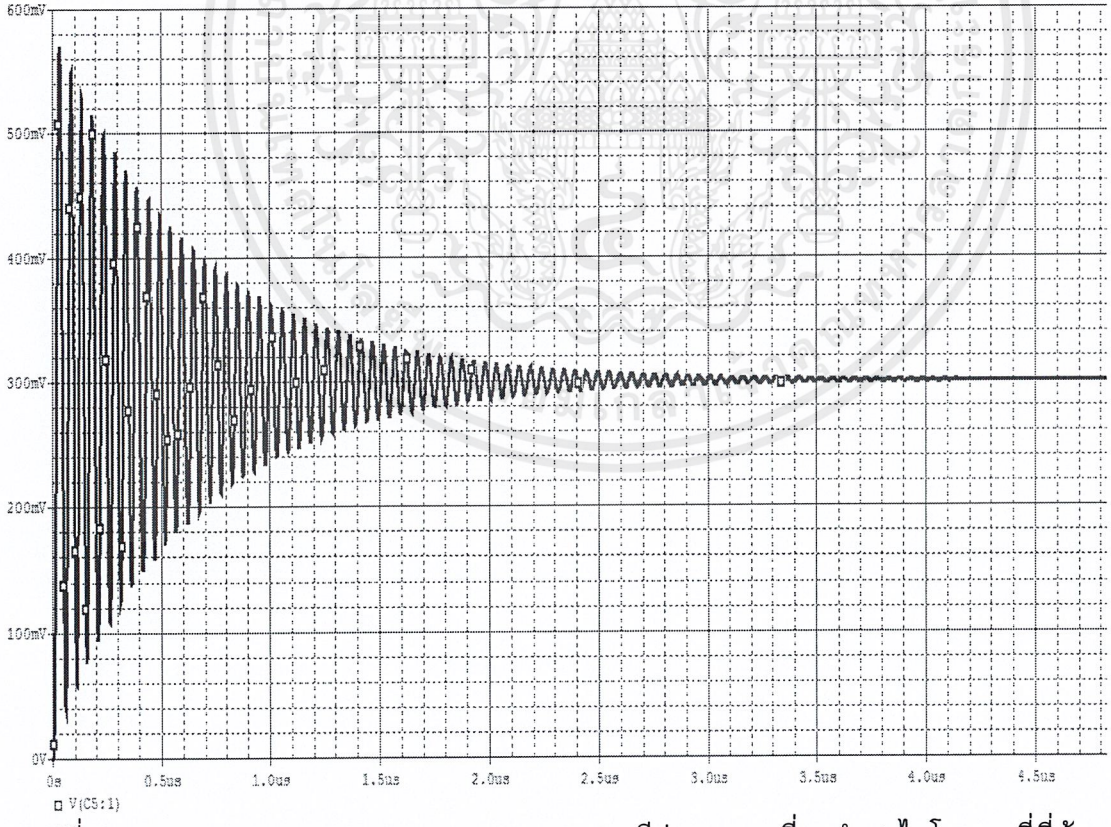


รูปที่ ข.18 C divider Mix R_1 10 k ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 1 ค่า

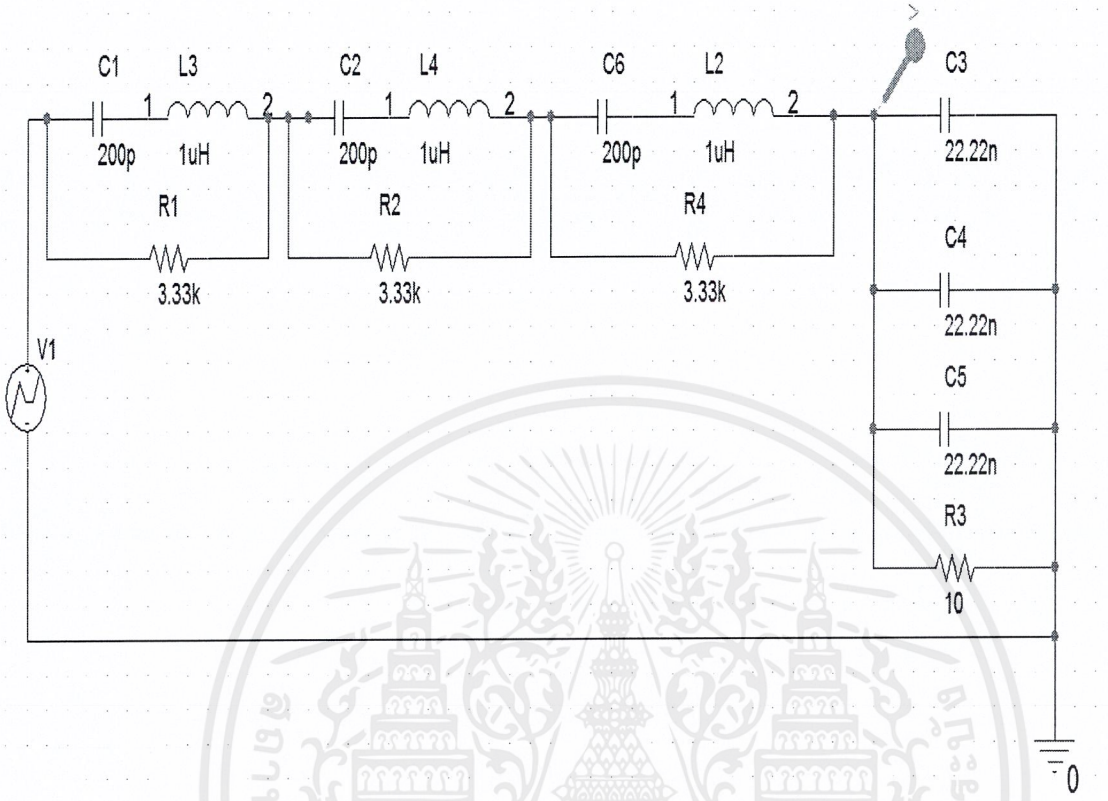


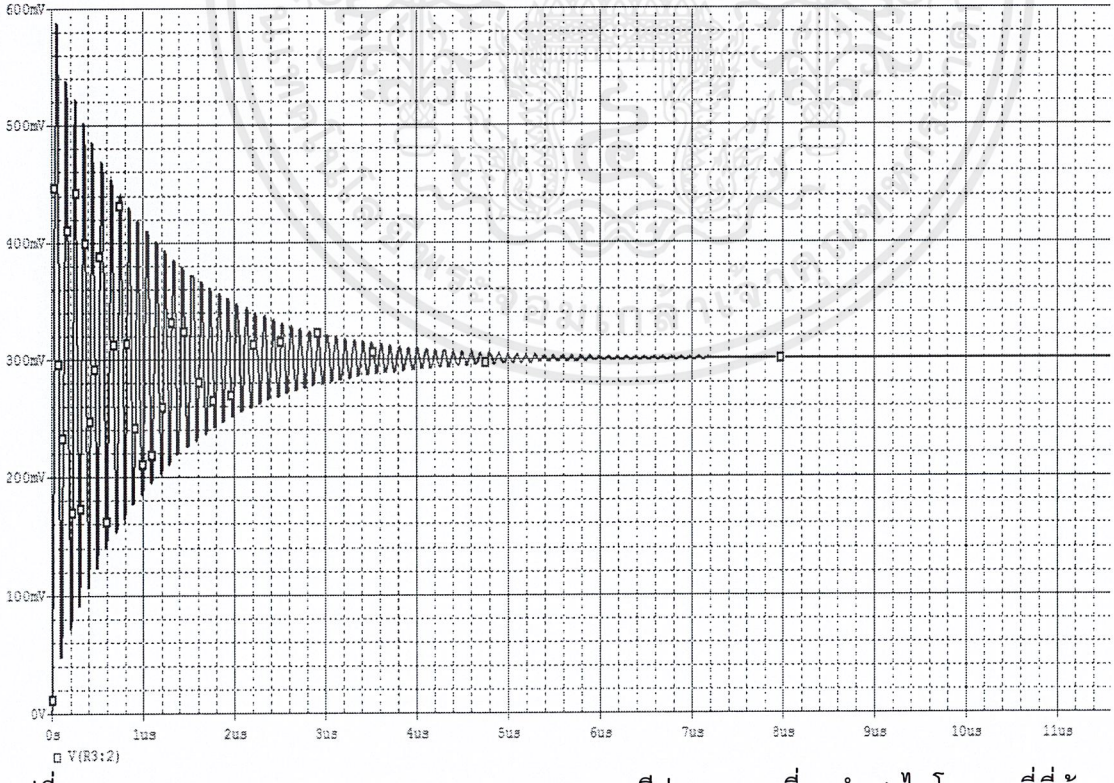


รูปที่ ข.19 C divider Mix R_1 10 k ohm แบบขนานมีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 3 ค่า



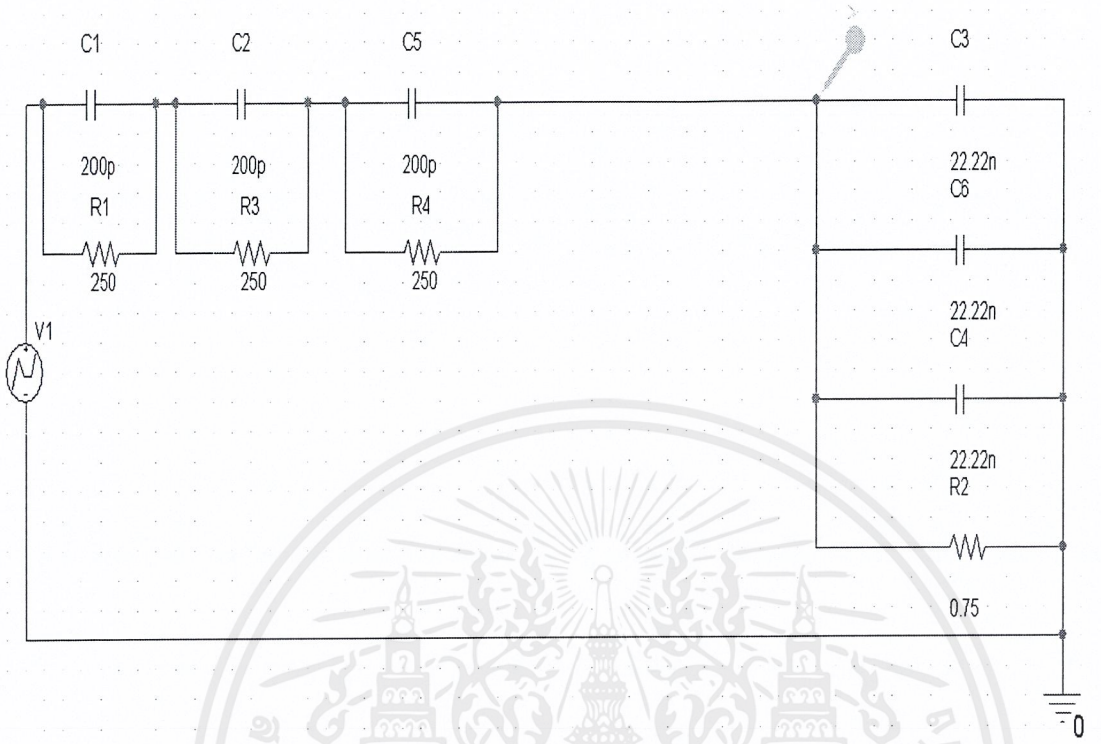


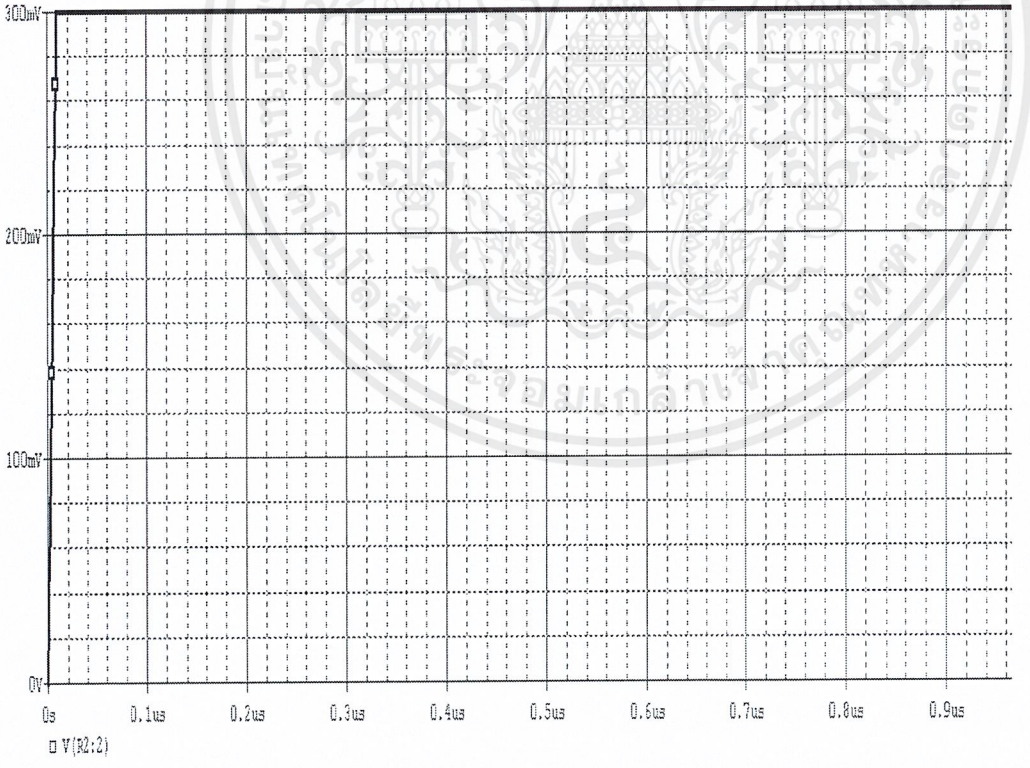
รูปที่ ข.20 C divider Mix R_1 10 k ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 Mix R 750 ohm ที่ด้าน HV R 0.75 ohm ที่ด้าน LV แบบขนาน

3.5.1ไม่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำ

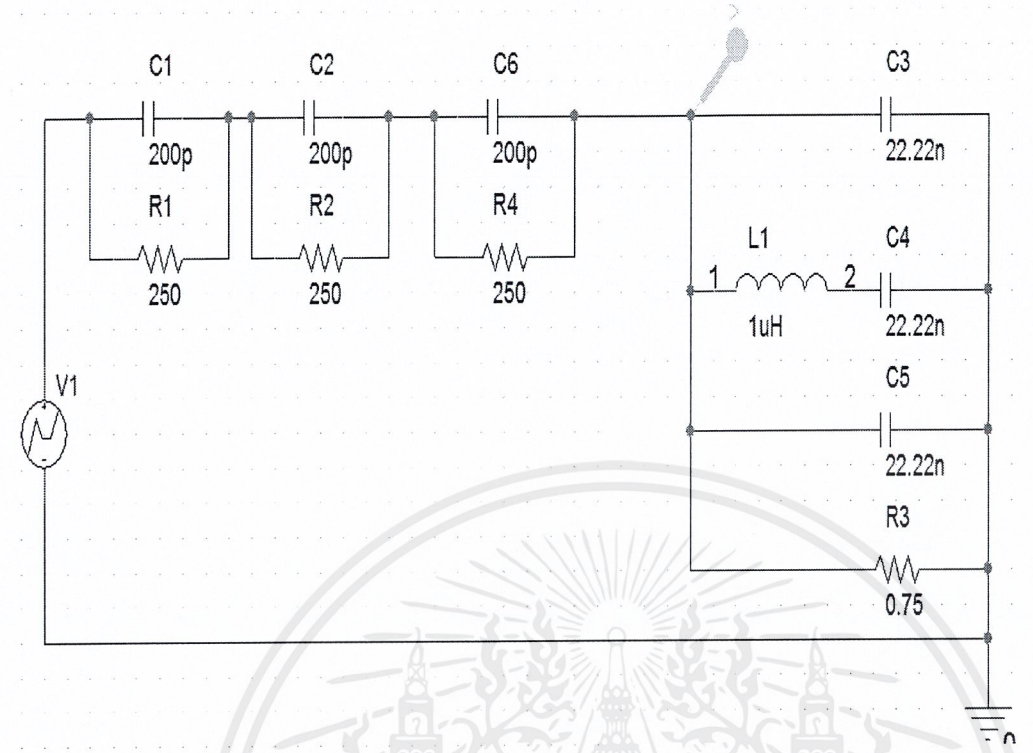


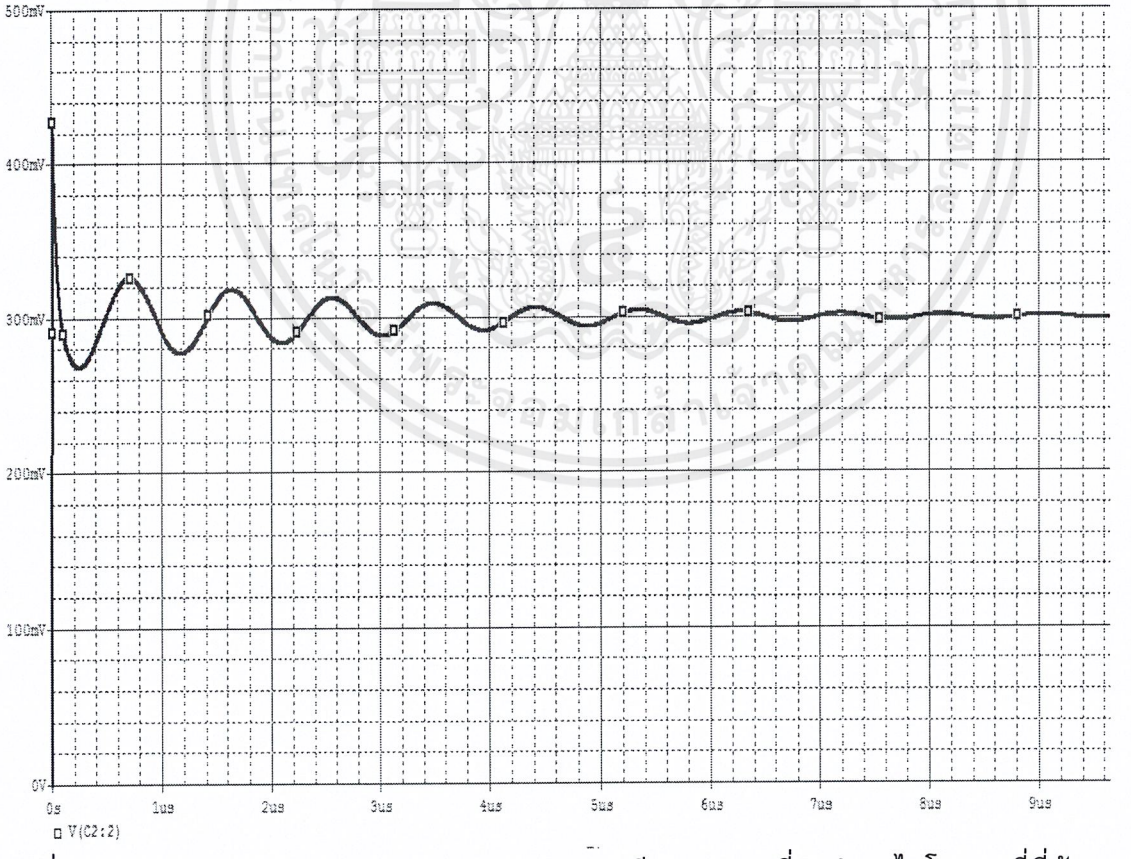


รูปที่ ข.21 C divider Mix R_1 750 ohm แบบขนาน ไม่ มีค่าความเหนี่ยวนำ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 1 ค่า

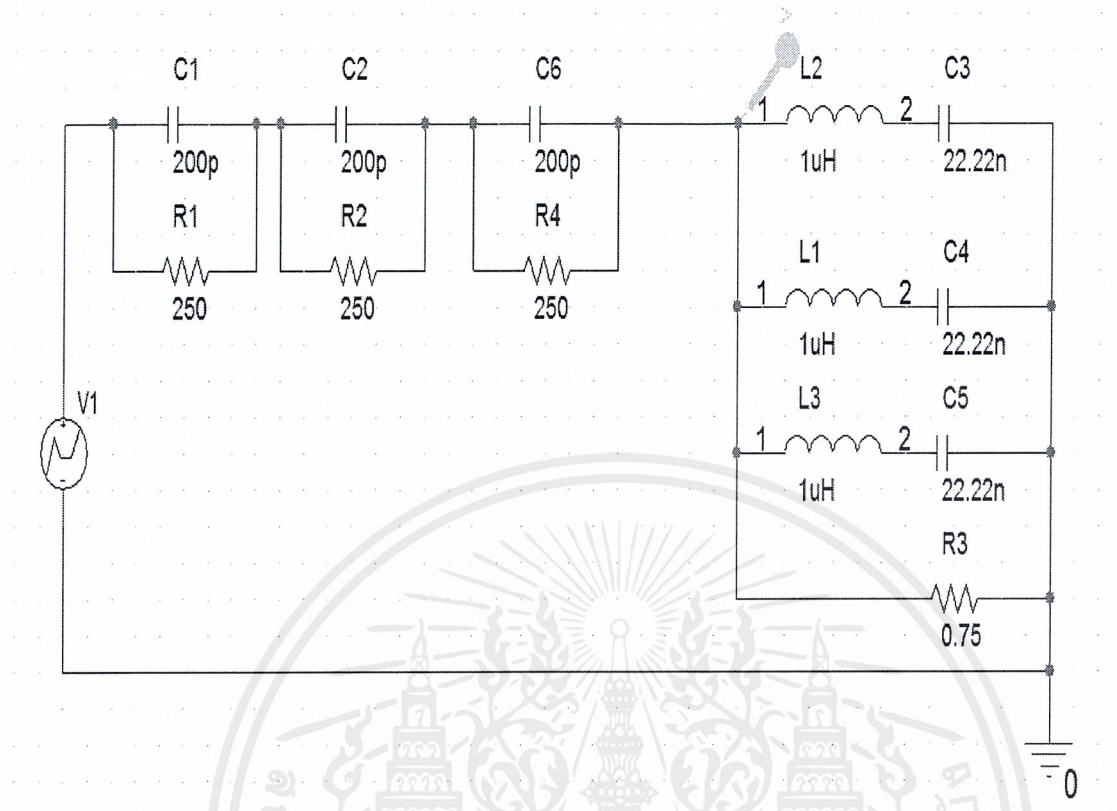


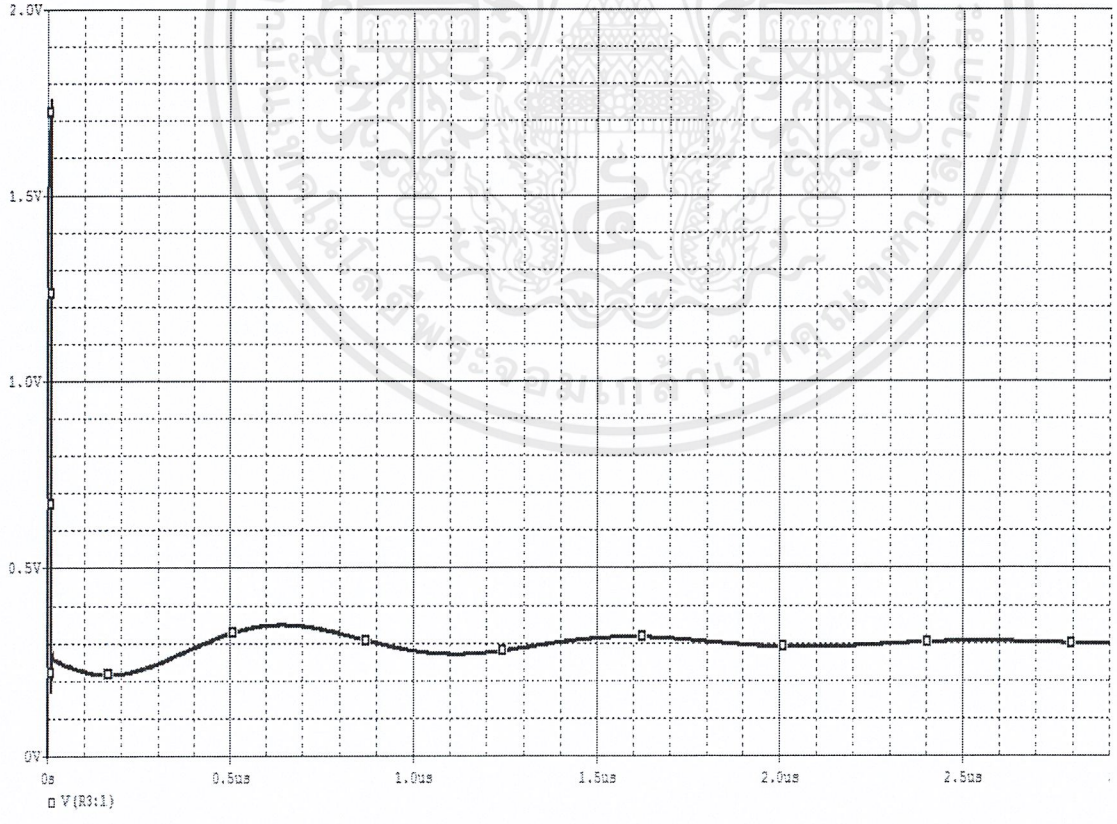


รูปที่ ข.22 C divider Mix R_1 750 ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 3 ค่า

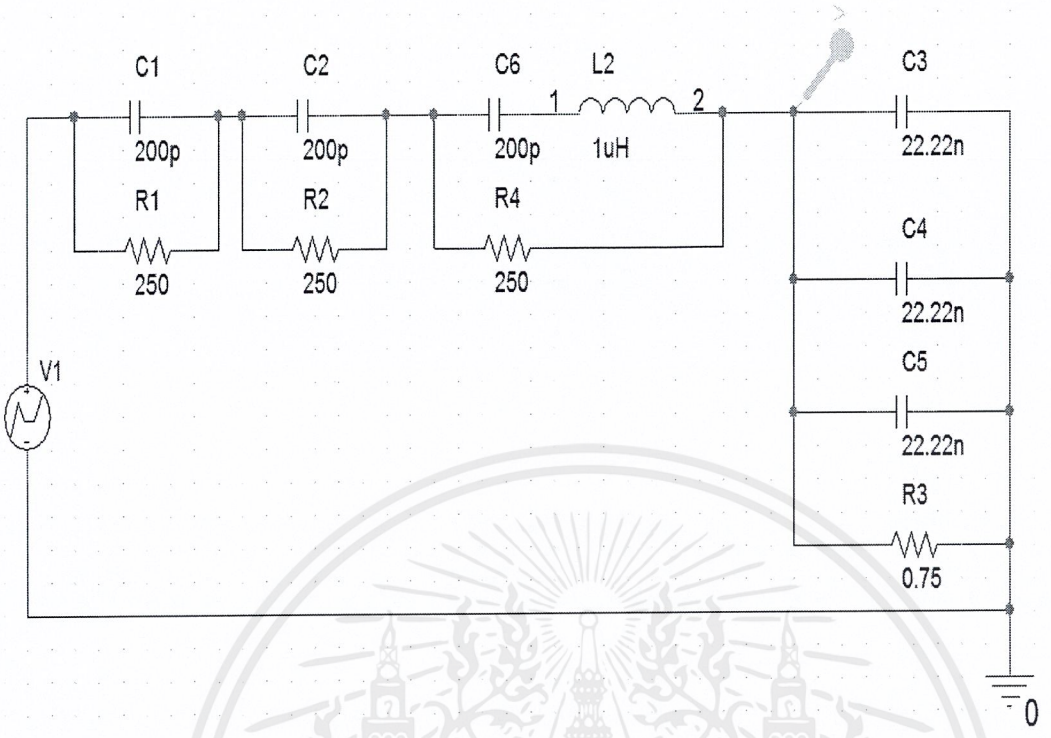


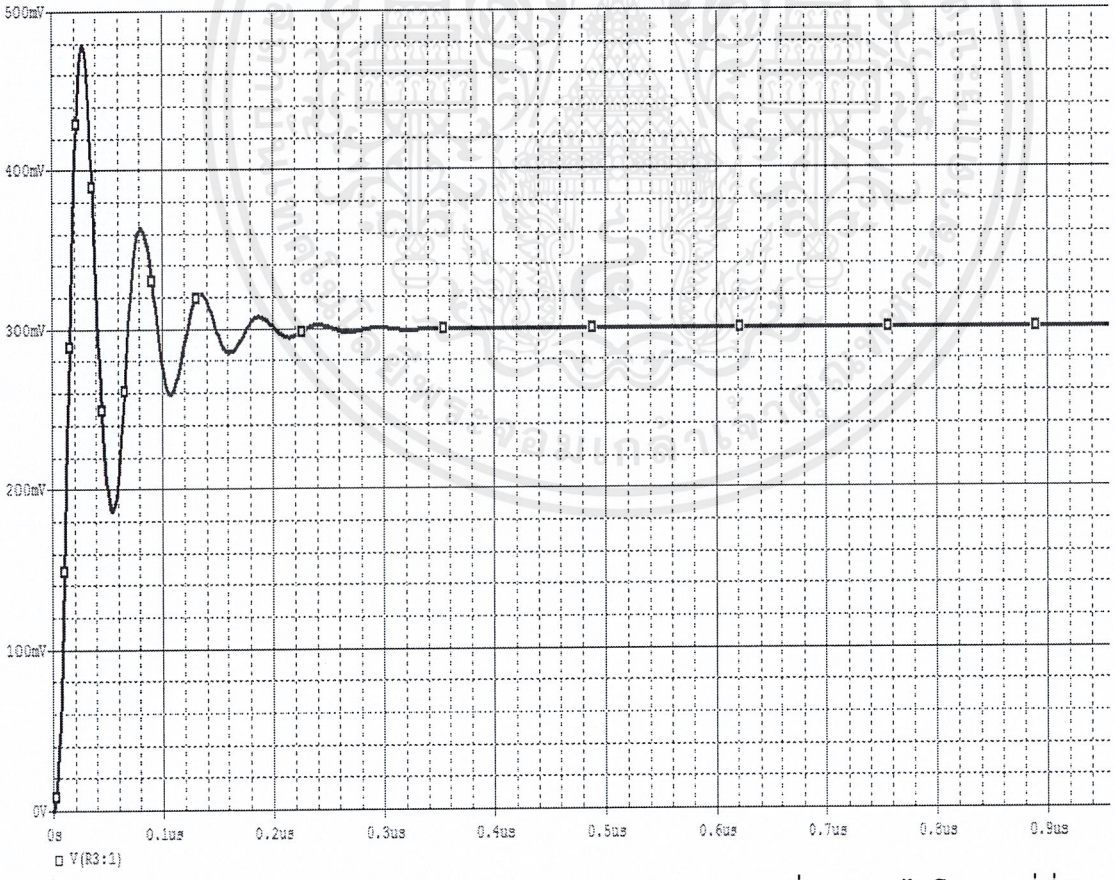


รูปที่ ข. 23 C divider Mix R_1 750 ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน LV 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 1 ค่า

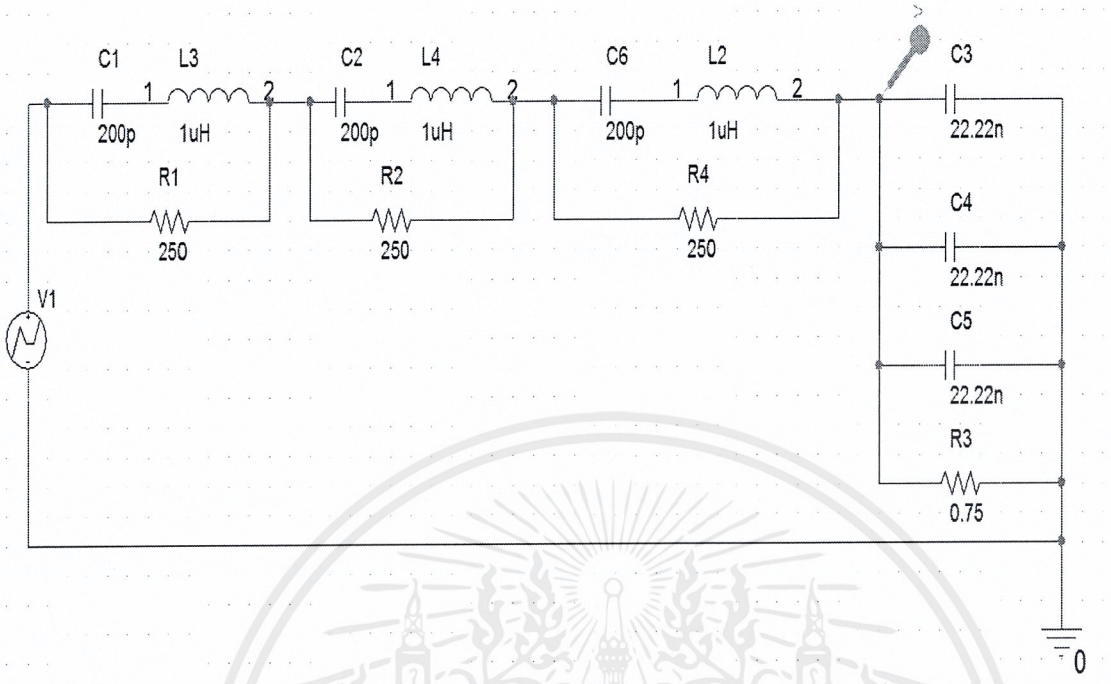


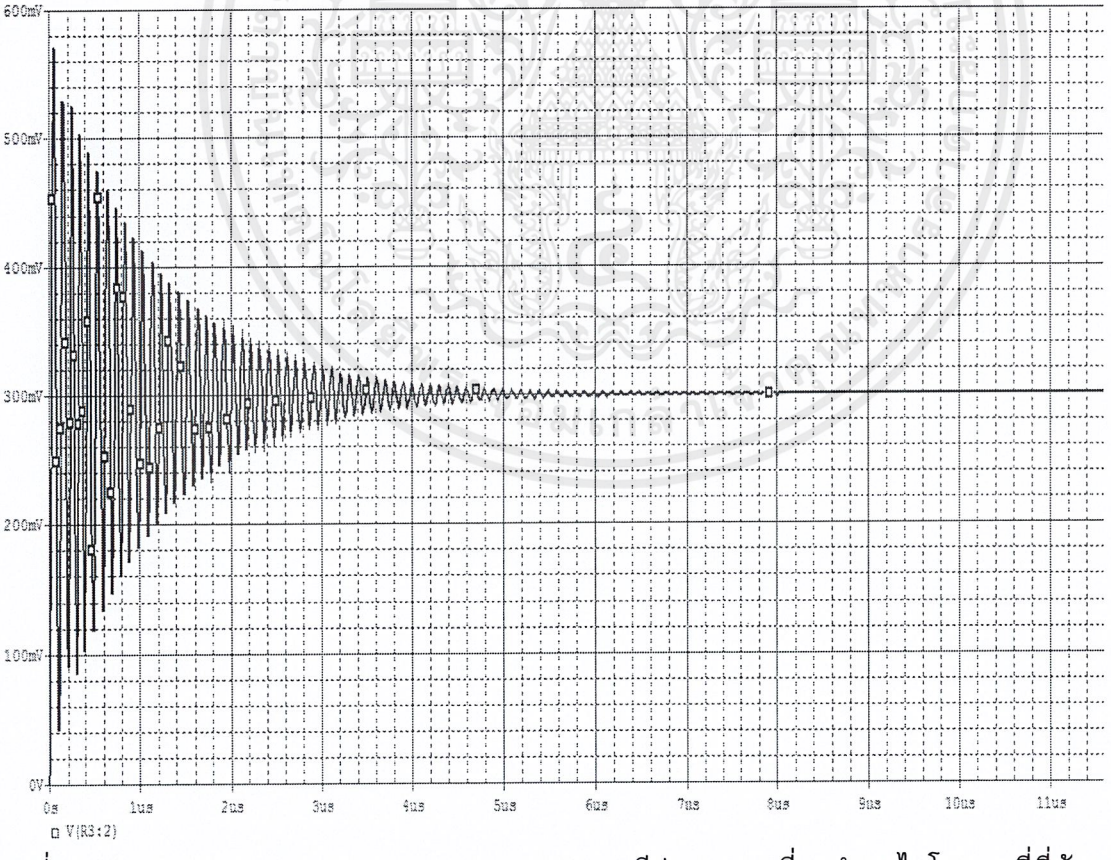


รูปที่ ข.24 C divider Mix R_1 750 ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 1 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 3 ค่า



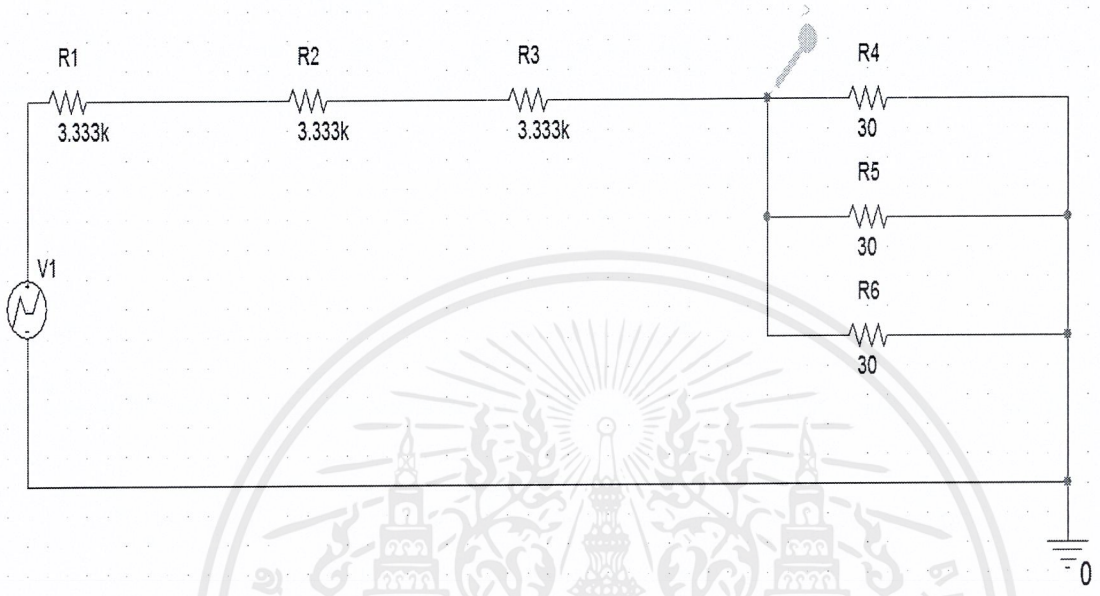


รูปที่ ข.25 C divider Mix R_1 750 ohm แบบขนาน มีค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ที่ด้าน HV 3 ค่า

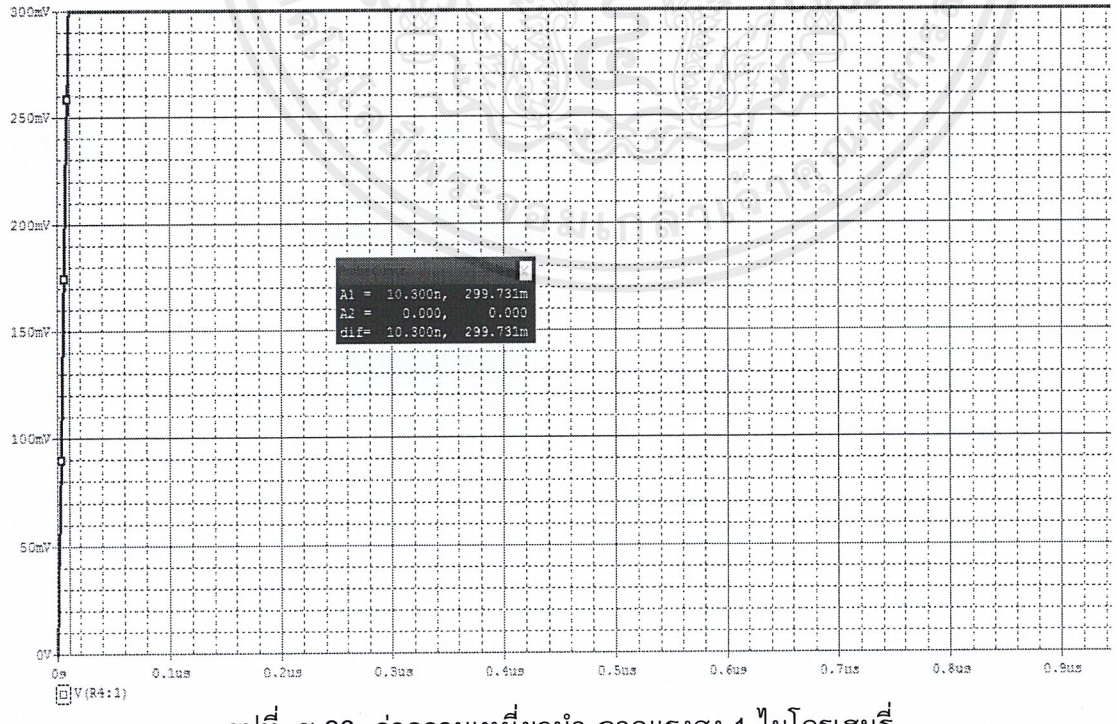
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษาอัตราส่วนของค่าความเหนี่ยวนำของโวลเตจดิไวเดอร์ ในภาคแรงสูงและแรงต่ำ

โดยจะใช้วงจรตามรูปข้างล่างนี้ โดยมีความต้านทานภาคแรงสูง 10 กิโลโอห์ม และความต้านทานภาคแรงต่ำ 10 โอห์ม



โดยจะให้มีผลของค่าความเหนี่ยวนำ ภาคแรงสูง 1 ไมโครเฮนรี่ จากผลการ simulation จะได้ผลดังนี้ ซึ่งจะใช้รูปนี้เป็นรูปคลื่นอ้างอิง

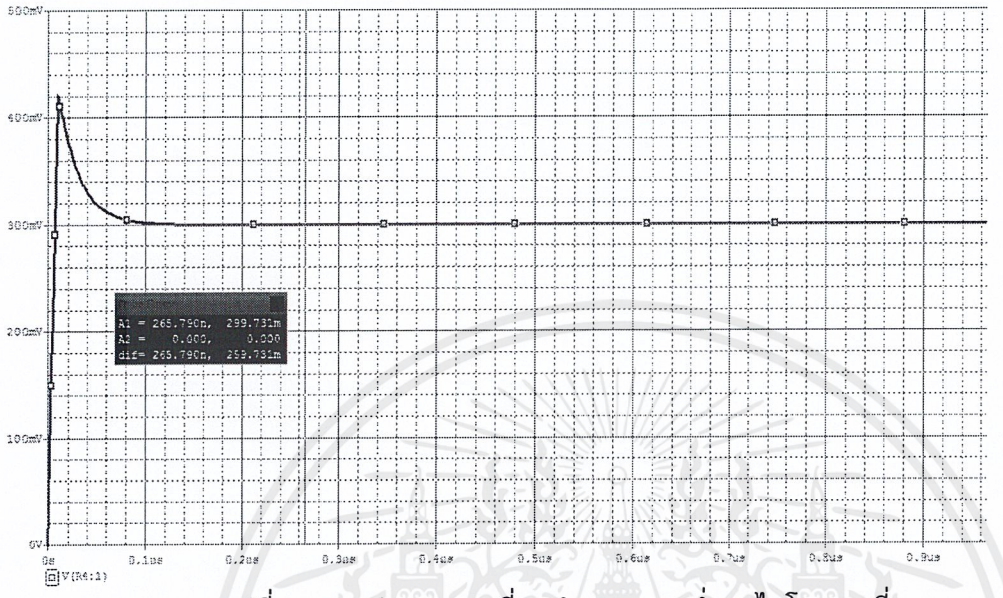


รูปที่ ข.26 ค่าความเหนี่ยวนำ ภาคแรงสูง 1 ไมโครเฮนรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตอบสนองรูปขั้นจะได้ว่ารูปคลื่นนี้มี เวลาตอบสนองอยู่ที่ 10.30 ns ดังนั้น เราจะลองหาค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำเพื่อให้ได้รูปคลื่นที่มี เวลาตอบสนองใกล้เคียงกับ 10.30 ns และรูปคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกันโดยจะลองเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำดังนี้

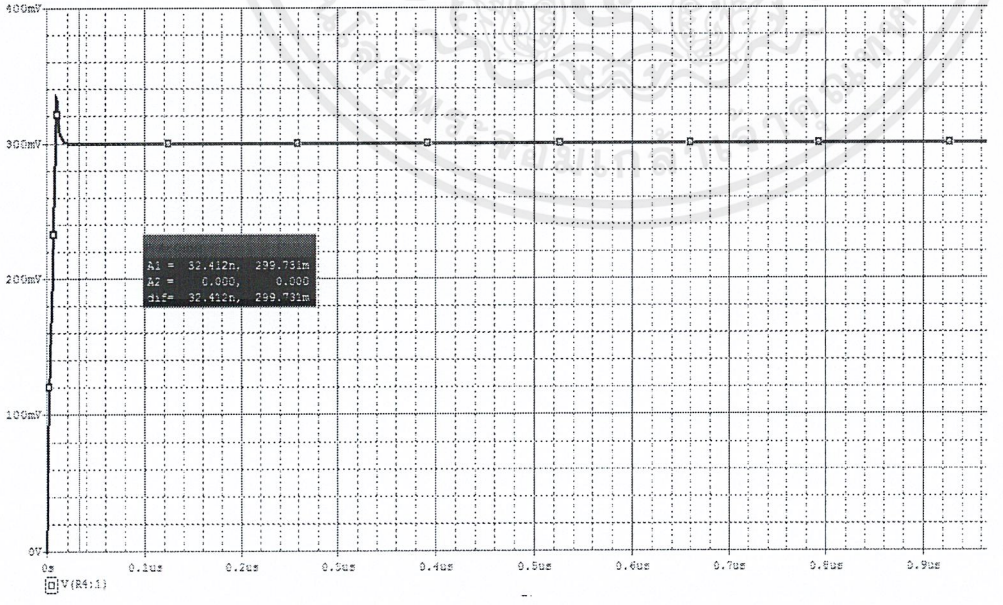
1. ค่าความเหนี่ยวนำ 1 ไมโครเฮนรี่ด้านแรงต่ำ



รูปที่ ข.27 ค่าความเหนี่ยวนำ ภาคแรงต่ำ 1 ไมโครเฮนรี่

จะเห็นว่ารูปคลื่นนี้มีเวลาตอบสนองอยู่ที่ 265.79 ns ซึ่งจะเห็นว่า ยังสูงกว่ารูปคลื่นอ้างอิงอยู่ และลักษณะรูปคลื่นนั้นแตกต่างกัน

2. ค่าความเหนี่ยวนำ 100 นาโนเฮนรี่ด้านแรงต่ำ

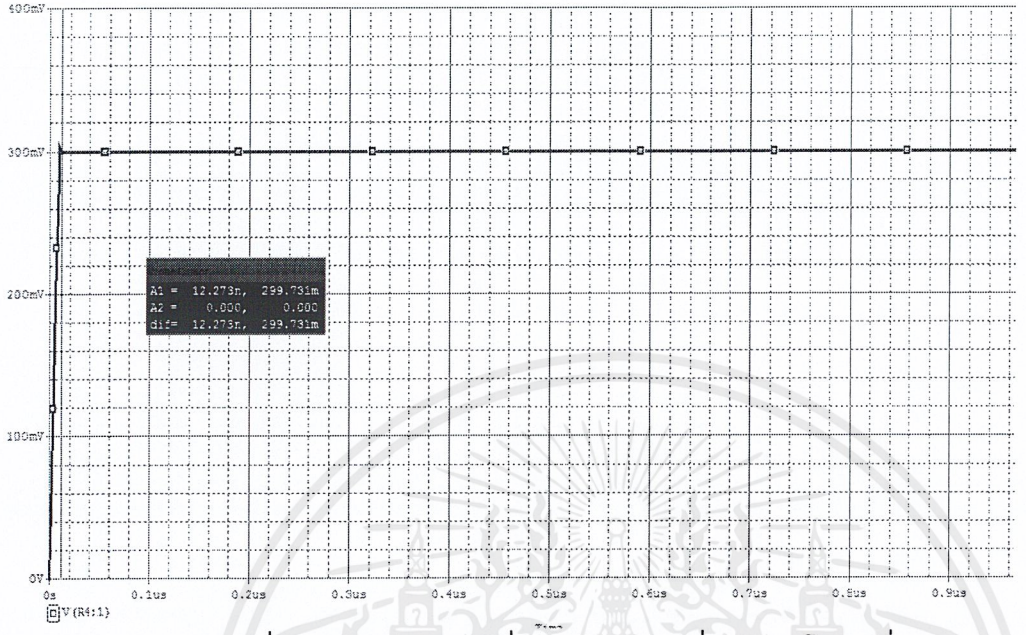


รูปที่ ข.28 ค่าความเหนี่ยวนำ ภาคแรงต่ำ 100 นาโนเฮนรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ารูปคลื่นนี้มี เวลาตอบสนองอยู่ที่ 32.412 ns ซึ่งจะเห็นว่า ยังสูงกว่ารูปคลื่นอ้างอิงอยู่ และลักษณะรูปคลื่นนั้นแตกต่างกัน

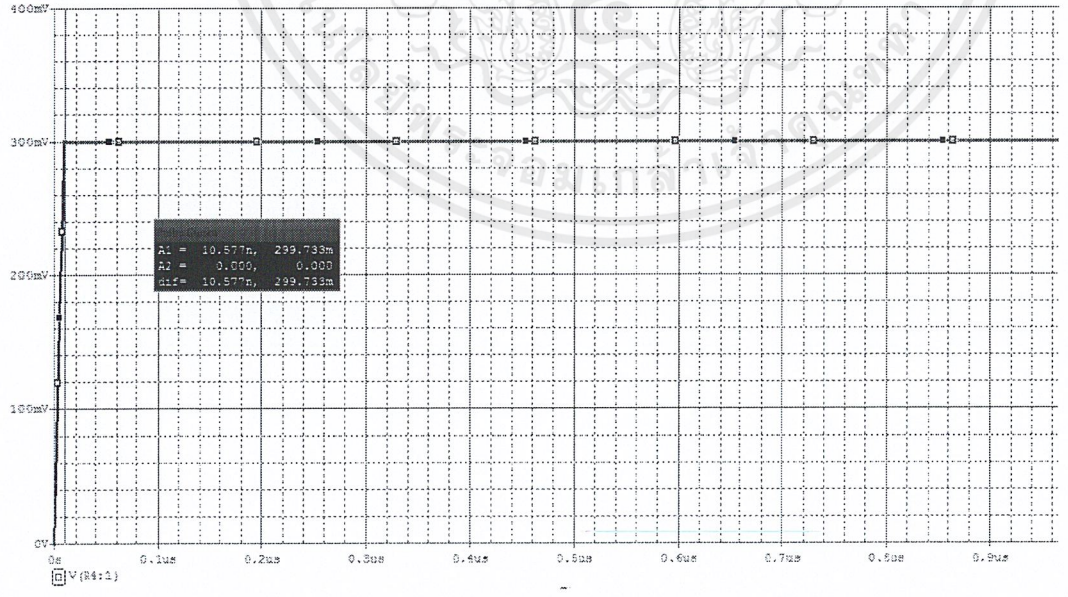
3. ค่าความเหนี่ยวนำ 10 นาโนเฮนรี่ด้านแรงต่ำ



รูปที่ ข.29 ค่าความเหนี่ยวนำ ภาคแรงต่ำ 10 นาโนเฮนรี่

จะเห็นว่ารูปคลื่นนี้มี เวลาตอบสนองอยู่ที่ 12.273 ns ซึ่งจะเห็นว่า เริ่มใกล้เคียงกับรูปคลื่นอ้างอิงขึ้น และลักษณะรูปคลื่นนั้นเริ่มคล้ายคลึงกัน

4. ค่าความเหนี่ยวนำ 3 นาโนเฮนรี่ด้านแรงต่ำ

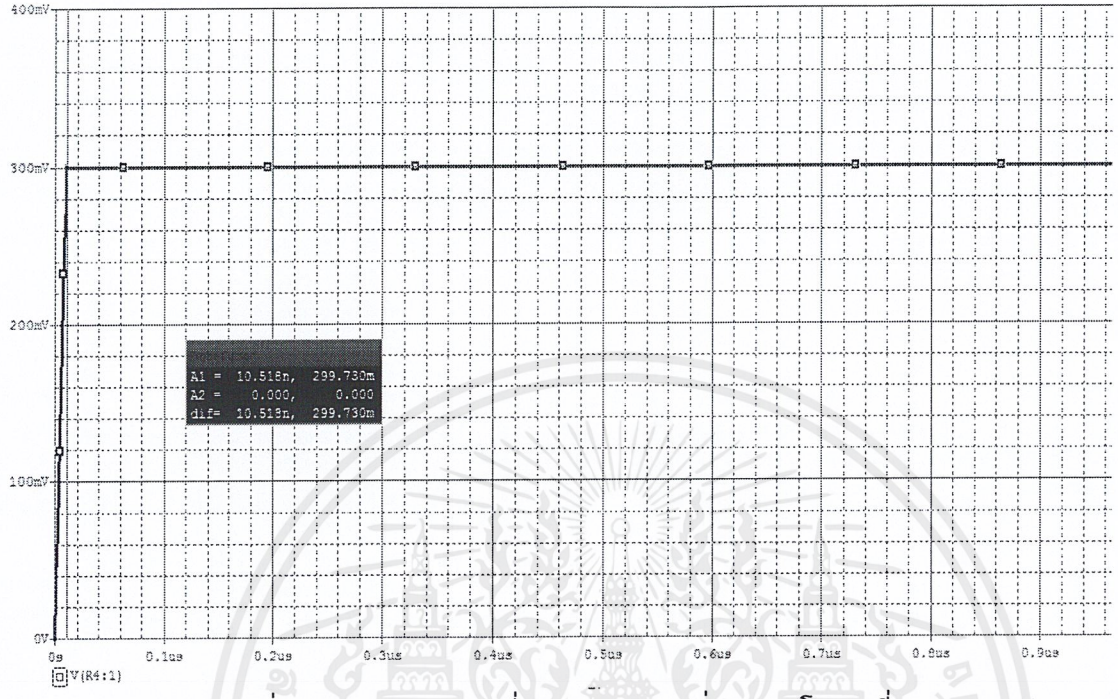


รูปที่ ข.30 ค่าความเหนี่ยวนำ ภาคแรงต่ำ 3 นาโนเฮนรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ารูปคลื่นนี้มี เวลาตอบสนองอยู่ที่ 10.577 ns ซึ่งจะเห็นว่า เริ่มใกล้เคียงกับรูปคลื่นอ้างอิงมากยิ่งขึ้น และลักษณะรูปคลื่นนั้นคล้ายคลึงกัน

5. ค่าความเหนี่ยวนำ 1 นาโนเฮนรี่ด้านแรงต่ำ



รูปที่ ข.31 ค่าความเหนี่ยวนำ ภาคแรงต่ำ 1 นาโนเฮนรี่

จะเห็นว่ารูปคลื่นนี้มี เวลาตอบสนองอยู่ที่ 10.518 ns ซึ่งจะเห็นว่า เริ่มใกล้เคียงกับรูปคลื่นอ้างอิงมากยิ่งขึ้น และลักษณะรูปคลื่นนั้นคล้ายคลึงกัน

และเมื่อลดค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำลงไปอีกจะได้ เวลาตอบสนองที่สั้นลงเรื่อยๆ ดังนั้นสรุปได้ว่า สาเหตุที่ค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำนั้นมีผลต่อรูปคลื่นทำให้เกิดออสซิลเลต และ เวลาตอบสนองที่สูงขึ้นนั้น ก็เพราะว่า อัตราส่วนค่าความต้านทานด้านแรงสูงนั้นมีค่าสูงกว่าถึง 1000 เท่า จากการทดลองซึ่งเราใช้ค่าความเหนี่ยวนำค่าเดียวกันในด้านแรงสูงและแรงต่ำนั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นถ้าเราลดค่าความเหนี่ยวนำลงเรื่อยๆ และจากการลดค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำลง 1000 เท่าของค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงสูง(1 ไมโครเฮนรี่ เป็น 1 นาโนเฮนรี่) ตาม ratio ของ โวลเตจดิไวเดอร์ จะให้รูปคลื่นและเวลาตอบสนองที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่มีผลของค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงสูง 1 ไมโครเฮนรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty)

ส่วนที่1 พื้นฐานการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ปัจจุบันเมื่อเราเป็นผู้ให้บริการในฐานะห้องปฏิบัติการสอบเทียบ หรือเมื่อเราเป็นผู้ใช้บริการของห้องปฏิบัติการสอบเทียบก็ตาม ข้อมูลที่มักจะต้องพบหรือเกี่ยวข้องอยู่ในรายงานผลสอบเทียบมักจะมีคำว่า ความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ด้วยเสมอ ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงถึงรายงานผลการสอบเทียบความต้านทานมาตรฐาน จากห้องปฏิบัติการสอบเทียบแห่งหนึ่งได้ปรากฏคำว่า Uncertainty อยู่ในตารางรายงานผลการสอบเทียบด้วย เราจะมาทำความเข้าใจคำว่า Uncertainty หรือความไม่แน่นอนในการวัดที่แจ้งมาในผลการสอบเทียบนั้นว่ามีความหมายและความจำเป็นอย่างไร

ตารางที่ ค.1 แสดงตัวอย่างค่าความไม่แน่นอนในการวัดในรายงานผลสอบเทียบความต้านทาน 10 โอห์ม

The following table gives the measured four-terminal resistance values at the date 1 November 1997 at the indicate temperature :

Temperature (°C)	Resistance Value (Ω)	Uncertainty (ppm)	Coverage Factor
20	9.999838	0.3	2.19
23	9.999952	0.3	2.56
25	9.999973	0.3	2.56
29	9.999901	0.3	2.56

คำว่า **ความไม่แน่นอนในการวัด** เป็นคำที่รู้จักกันแพร่หลายในระยะเวลาไม่นานมานี้ การแพร่หลายของคำว่าความไม่แน่นอนในการวัดนั้น เชื่อว่าเกิดจากการนิยมใช้มาตรฐาน ISO 9000:1994 โดยมาตรฐาน ISO 9001,9002 และ 9003:1994 ข้อ 4.11 ซึ่งว่าด้วยการควบคุมเครื่องมือตรวจสอบ เครื่องมือวัดและเครื่องมือทดสอบ กำหนดให้การเลือกใช้เครื่องมือวัดต้องมีความเหมาะสมกับงานที่ทำการวัด รวมทั้งต้องทราบค่าความไม่แน่นอนในการวัดว่ามีความเหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการของการวัด รวมทั้งยังได้กำหนดให้เครื่องมือวัดต้องได้รับการสอบเทียบซึ่งทำให้เกี่ยวโยงถึงค่าความไม่แน่นอนในการวัดด้วย

ต่อมาในการออกมาตรฐาน ISO 9001 ฉบับปี ค.ศ. 2000 ถึงแม้มาตรฐานในข้อ 7.6 ที่ว่าด้วยการควบคุมและเฝ้าระวังอุปกรณ์การวัดจะไม่ได้ระบุถึงการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดไว้โดยตรง แต่มาตรฐานได้อ้างอิงคำแนะนำในมาตรฐาน ISO 10012 ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน ISO 10012 ยังคงแนะนำให้ผู้ควบคุมเครื่องมือวัดทำการวัดโดยทราบค่าความไม่แน่นอนในการวัดด้วย รวมทั้งมาตรฐาน ISO 9001:2000 ข้อ 7.6 ดังกล่าวยังกำหนดให้มีการเลือกเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับงานที่ทำการวัด และต้องทำการสอบเทียบในกรณีที่ต้องการความสมบูรณ์ของผลการวัดซึ่งการกำหนดดังกล่าวทำให้ยังมีความจำเป็นที่ต้องรู้จักและทำความเข้าใจกับความหมายของคำว่า ความไม่แน่นอนในการวัดอยู่เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ได้อย่างเหมาะสม

สำหรับในกรณีของห้องปฏิบัติการสอบเทียบซึ่งได้เคยใช้มาตรฐาน ISO/ICE Guide 25:1990 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับความสามารถของห้องปฏิบัติการและในปัจจุบันได้ปรับมาเป็นมาตรฐาน 17025:1999 มาตรฐานได้กำหนดให้ผู้ที่ทำการสอบเทียบเครื่องวัดต้องแสดงค่าความไม่แน่นอนในการวัดไว้ในผลการสอบเทียบ ซึ่งทำให้เพิ่มน้ำหนักความสำคัญของคำว่าความไม่แน่นอนในการวัดมากขึ้น

บทความนี้จะกล่าวถึงความสำคัญของการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด แหล่งของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบ และการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดโดยรวบรวมจากเอกสารที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานของผู้ปฏิบัติงานสอบเทียบ สำหรับผู้ที่ประสงค์จะเข้าใจถึงรายละเอียดที่ที่มากขึ้นสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงที่แสดงไว้ท้ายบทความนี้

ความสำคัญของการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ในรายงานผลการสอบเทียบซึ่งเป็นการประเมินขนาดของปริมาณที่เราสนใจให้อยู่ในรูปของข้อมูล เพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์หรือตัดสินใจว่าเครื่องมือวัดยังมีคุณสมบัติที่จะใช้งานต่อไปได้หรือไม่นั้น สิ่งที่ผู้ใช้ข้อมูลต้องการอย่างยิ่งคือ คุณภาพและความเชื่อถือได้ของข้อมูล ดังนั้นหากปราศจากคำอธิบายที่ชัดเจนว่าข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบมีความถูกต้องและความเชื่อถือได้เพียงใดแล้วข้อมูลจากการสอบเทียบดังกล่าวก็จะใช้ประโยชน์ได้ไม่สมบูรณ์ ความไม่แน่นอนในการวัดเป็นคำรวมๆ ที่มีรายละเอียดที่กระจายออกไปอีกมาก โดยใช้เพื่อจะอธิบายถึงคุณภาพในด้านความถูกต้องและความเชื่อถือได้ของการวัด

การใช้คำว่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นคำอธิบายถึงคุณภาพและความเชื่อถือได้ของการสอบเทียบดังกล่าว ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องศึกษาความหมายของคำดังกล่าวให้เข้าใจและให้กรอธิบายในการใช้คำคำนี้ให้ชัดเจน ทั้งนี้การอธิบายควรรวมเงื่อนไขของการดำเนินการสอบเทียบไว้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เช่น การระบุวิธีการสอบเทียบ สภาวะของห้องที่ทำการรสอบเทียบ ความสมบูรณ์และเชื่อถือได้ของมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ เป็นต้น รวมทั้งการดำเนินการทางด้านเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดด้วย เช่น การปรับแก้ค่าชดเชยส่วนของ Systematic Error เป็นต้น อย่างไรก็ดี เป็นที่ยอมรับทั่วไปว่าการดำเนินการเพื่อให้กระบวนการสอบเทียบมีความสมบูรณ์ที่สุดเท่าที่จะทำได้นั้นมีความจำเป็นแต่จะยังคงมีความไม่สมบูรณ์ของการวัดติดอยู่ในระบบการสอบเทียบเสมอ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องให้ข้อมูลและอธิบายให้ผู้ใช้ข้อมูลได้ทราบ ซึ่งการแสดงค่าความไม่แน่นอนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดไว้ในรายงานผลสอบเทียบได้รับการยอมรับว่าสามารถใช้อธิบายความสมบูรณ์ของกระบวนการสอบเทียบในลักษณะดังที่กล่าวมาแล้วมาแล้วได้ดีที่สุด

จากภาพรวมความไม่สมบูรณ์ในการสอบเทียบดังกล่าวแล้วนั้นหากพิจารณาในเชิงเทคนิคจะพบว่าในกระบวนการสอบเทียบนั้น ในการวัดทุกครั้งจะมีความไม่สมบูรณ์ในการวัดประกอบอยู่ด้วยเสมอ ความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวมีที่มาที่หลากหลาย เช่น การกำหนดสิ่งที่ต้องการทำการสอบเทียบ เทคนิคและวิธีการทำการสอบเทียบที่ใช้ ความสมบูรณ์ของมาตรฐานที่นำมาใช้ ผู้ปฏิบัติงานที่ทำการสอบเทียบ เป็นต้น ความไม่สมบูรณ์ต่างๆดังกล่าวแล้วทำให้ผู้ทำการวัดไม่สามารถแจ้งค่าที่เป็นจริงของสิ่งที่ทำการสอบเทียบได้แน่นอน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องแจ้งขนาดความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวไว้ในรูปของความไม่แน่นอนในการวัด

ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นในการวัดแต่ละครั้งของกระบวนการสอบเทียบดังกล่าวนั้นแม้ว่าจะสามารถดำเนินการให้คงที่มากที่สุดแล้วก็ตาม ยังได้พบว่าในการวัดปริมาณเดียวกันหลายครั้ง ค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งจะแตกต่างกันโดยไม่สามารถอธิบายเหตุผลที่ชัดเจนได้และมักจะไม่สามารถคาดเดาการณ์แนวโน้มของความแตกต่างที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งได้ ด้วยความแตกต่างดังกล่าวจัดได้ว่าเป็นสิ่งที่ทำให้ผู้ทำการสอบเทียบไม่สามารถบอกถึงค่าที่เป็นจริงของสิ่งที่ทำการสอบเทียบได้ จึงมีความจำเป็นต้องประมาณความแตกต่างของค่าที่สอบเทียบได้รวมไว้ในรูปของความไม่แน่นอนในการวัด

ในการนำผลการสอบเทียบไปใช้ประโยชน์เพื่อประเมินคุณภาพของเครื่องมือวัดนั้น ผลการสอบเทียบถูกใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือวัดที่ทำการสอบเทียบกับข้อกำหนดว่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดที่ได้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้หรือไม่ เนื่องจากเครื่องมือวัดจะมีเกณฑ์กำหนดของความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ ดังนั้นเมื่อนำผลการสอบเทียบที่ได้มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ดังกล่าว ผู้วิเคราะห์จะสามารถระบุว่าเครื่องมือวัดมีคุณภาพที่อยู่ในกรอบของความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ได้นั้นๆ หรือไม่ ทั้งนี้การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลมีโอกาสที่เป็นไปได้หลายทาง โดยผลการสอบเทียบที่เมื่อไม่นำค่าความแน่นอนในการวัดมาพิจารณาร่วมด้วยจะให้ผลการวิเคราะห์อีกแบบหนึ่ง ดังนั้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องตรงตามความประสงค์ของผู้เป็นเจ้าของเครื่องมือวัด ผู้วิเคราะห์จึงควรเข้าใจถึงการใช้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดด้วย

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดจะสามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลการสอบเทียบตามที่กล่าวมาแล้วได้และสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องตรงกันต่อเมื่อกระบวนการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดมีขั้นตอนและกระบวนการในการประเมินค่าที่เหมือนกัน ดังนั้นถึงแม้เทคนิคและวิธีการในการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดจะมีหลายวิธี แต่เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของค่าความไม่แน่นอนในการวัดระหว่างกันได้จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วิธีการประมาณค่าที่เหมือนกัน ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมแพร่หลายได้แก่วิธีที่แนะนำไว้ในเอกสาร ISO/TAG4 “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสำคัญของการใช้ความไม่แน่นอนในการวัด อธิบายความถึงคุณภาพและความเชื่อถือได้ในการสอบเทียบดังกล่าว ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือนี้บนพื้นฐานที่เข้าใจได้ตรงกัน โดยมีประเด็นที่ถือได้ว่าเป็นความจำเป็นและเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เทคนิคของความไม่แน่นอนในการวัดนี้ได้แก่

- วิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดและการแสดงค่าดังกล่าวควรมีลักษณะที่ครอบคลุม กล่าวคือ ควรใช้ได้กับการสอบเทียบทุกชนิด
- ขนาดของค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่แจ้งควรได้รับการจัดการให้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ ได้ประเมินมาจากแหล่งต่างๆ โดยครบถ้วนไม่ว่าจะมีอยู่เท่าไร และไม่ว่าจะมีการกระจายเป็นแหล่งย่อยๆ อย่างไรก็ต้องนำมาประเมิน
- ขนาดของค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่แจ้งในการสอบเทียบหนึ่งควรถ่ายทอดค่าต่อๆไปได้ ซึ่งหมายความว่าค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ประมาณได้จากระดับหนึ่งควรจะสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดสำหรับการสอบเทียบต่อๆไปได้

คำ (Term) ที่เกี่ยวข้อง

เพื่อที่จะทำความเข้าใจกับความหมายของความไม่แน่นอนในการวัดได้ชัดเจนและสะดวกในการประมาณค่า ผู้สอบเทียบควรรู้จักหรือคุ้นเคยกับคำที่เกี่ยวข้องบางคำซึ่งใคร่ขอนำมากล่าวถึงโดยสังเขปดังนี้

1. **True Value(of Quantity)** Value ซึ่งแสดงถึงปริมาณที่กำหนดได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาวะที่พิจารณาในขณะนั้นๆ

2. **Conventional True Value (of Quantity)** Value ของปริมาณซึ่งสามารถใช้แทน True Value ได้ในจุดประสงค์ของการใช้งานนั้นๆ

3. **การวัด (Measurement)** ชุดของการปฏิบัติงานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหา Value

4. **Measurand** ปริมาณที่มีจุดประสงค์ที่จะทำการวัด

5. **Uncertainty of measurement** ช่วงของคำที่ประมาณแล้วว่ามี True Value ของ Measurand อยู่

6. **Error (of Indication) of a Measuring Instrument** ค่าของเข็มชี้ของเครื่องมือวัด ลบด้วย (Conventional) True Value ของ Measurand

7. **Precision** ความสามารถในการวัดปริมาณเดิมที่จะได้ค่า ๆ เดิม

8. **Accuracy of Measurement** ความใกล้กันระหว่างผลของการวัด กับค่า (Conventional) True Value ของ Measurand

9. **Repeatability of Measurement** ความใกล้กันของผลการวัดปริมาณเดิมภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- ใช้วิธีการวัดเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผู้ทำการวัดคนเดิม
- เครื่องมือวัดเดิม
- สถานที่ทำการวัดเดิม
- สภาวะของการวัดเดิม
- การวัดซ้ำดำเนินการภายในช่วงเวลาสั้นๆ

10. **Random Error** องค์ประกอบของการผิดพลาดของการวัดที่เมื่อทำการวัด Measurand ซ้ำแล้วได้ค่าที่เปลี่ยนแปรไปโดยมีลักษณะที่ไม่อาจคาดเดาได้

11. **Systematic Error** องค์ประกอบของความผิดพลาดของการวัดที่เมื่อทำการวัด Measurand ซ้ำแล้วความผิดพลาดนี้มีขนาดเดิมหรือเปลี่ยนไปในลักษณะที่คาดเดาได้

แหล่งของความไม่แน่นอนในการวัด

ในการพิจารณาค่าความไม่แน่นอนในการวัดนั้นได้พบว่า มีแหล่งของความไม่แน่นอนที่แตกต่างกันไปตามปริมาณที่สอบเทียบ และวิธีการสอบเทียบ อย่างไรก็ดีหากพยายามจัดกลุ่มโดยดูถึงแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนแล้วจะพบว่าสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

Random Error เป็นแหล่งของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างกันของค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง โดยไม่สามารถอธิบายเหตุผลที่ชัดเจนได้รวมทั้งมักจะไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของความแตกต่างได้ด้วย ค่าความไม่แน่นอนที่ประมาณจากแหล่งความไม่แน่นอนนี้มักจะประมาณภายใต้เงื่อนไขของ Repeatability

Systematic Error เป็นแหล่งของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ในการวัด ความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวมีที่มาหลากหลาย ซึ่งผู้ที่มีประสบการณ์และความชำนาญในการวัดจะสามารถคาดการณ์ความผิดพลาดในส่วนนี้ได้ ทั้งนี้อาจจะมีแหล่งที่อ้างอิงได้จากเอกสารหลักฐาน หรือข้อมูลต่างๆ รวมทั้งสามารถนำเทคนิคของ Correction มาใช้ในการปรับลดความไม่แน่นอนของการวัดจากองค์ประกอบส่วนนี้คือ เนื่องจาก Systematic Error ในแต่ละสายวิชาของการวัดมีแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน เอกสารข้อมูลในการกล่าวถึงแหล่งของความไม่แน่นอนจึงมักจำแนกแหล่งความไม่แน่นอนออกตามลักษณะงานที่ทำการสอบเทียบ ทั้งนี้เอกสาร UKAS M3003 ได้รวบรวมแหล่งที่มาของ Systematic Error ที่สำคัญและมักจะพบได้บ่อยไว้ซึ่งเป็นข้อมูลที่ช่วยให้ผู้ทำการสอบเทียบสามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนได้สะดวกมากขึ้น ดังนี้

สำหรับการสอบเทียบทางไฟฟ้าซึ่งรวมถึงการวัดที่ความถี่สูงด้วย

- ความผิดพลาดของมาตรฐานซึ่งได้จากใบแสดงผลการสอบเทียบ
- ความไม่แน่นอนในการวัดที่แสดงไว้ในใบแสดงผลการสอบเทียบ
- การ Drift ของมาตรฐาน
- สภาวะของการสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การนำผลการสอบเทียบไปใช้โดยไม่ตรงกับค่าที่สอบเทียบมา ซึ่งจำเป็นต้องคำนวณค่าให้สอดคล้องกับจุดที่ต้องการสอบเทียบ
- Resolution ของมาตรฐานหรือเครื่องมือวัด
- ผลจาก Thermal EMFS
- ภาวะของ Loading และ Lead Impedance
- RF Mismatch Errors
- Directivity
- Test Port Match
- RF Connector Repeatability

สำหรับสอบเทียบมวล

- ความผิดพลาดของน้ำหนักมาตรฐานที่ได้จากใบแสดงผลการสอบเทียบ
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่แสดงไว้ในใบแสดงผลการสอบเทียบ
- การ Drift ของน้ำหนักมาตรฐาน
- ความผิดพลาดของเครื่องชั่ง
- ผลเนื่องจากแรงลอยตัวของอากาศ
- สภาวะแวดล้อมของการสอบเทียบ

สำหรับการสอบเทียบทางอุณหภูมิ

- ความผิดพลาดของมาตรฐานที่ใช้ซึ่งได้จากใบแสดงผลการสอบเทียบ
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่แสดงในใบแสดงผลการสอบเทียบ
- เครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบวัด เช่น ความต้านทาน หรือเครื่องมือวัดที่แปลงค่าจากสัญญาณทางไฟฟ้า
- สภาวะแวดล้อมของการสอบเทียบ

สำหรับการวัดทางมิติ

- ความผิดพลาดของมาตรฐานที่ใช้ซึ่งได้จากใบแสดงผลการสอบเทียบ
- ค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่แสดงในใบแสดงผลการสอบเทียบ
- ผลจากอุณหภูมิแวดล้อม
- Elastic Compression
- ความผิดพลาดเนื่องจากความไม่ได้ศูนย์ในการวัด
- ความผิดพลาดเนื่องจากรูปทรงของ Gauge ที่ถูกสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทางสถิติที่เกี่ยวข้อง

สถิติเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการประมวลข้อมูล และสำหรับการดำเนินการที่เกี่ยวกับการสอบเทียบสถิติว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งในการอธิบายปรากฏการต่างๆ ทั้งนี้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ควรนำมากล่าวถึงในที่นี้ได้แก่

ความสำคัญของสถิติ ข้อมูลประชากรของการสอบเทียบเพื่อหาค่า (Value) ของปริมาณใดๆ มีอยู่ไม่จำกัด(Infinite Population) ดังนั้นในทางปฏิบัติผู้ทำการสอบเทียบไม่สามารถหาข้อมูลของการวัดจากประชากรได้ จำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลการวัดที่พอเหมาะกับขีดจำกัดด้านอื่นๆ เช่น เวลาค่าใช้จ่าย เป็นต้น การใช้ข้อมูลบางส่วนของประชากรซึ่งถือว่าเป็นตัวอย่างและเป็นตัวแทนของประชากรด้วยนั้น ถ้ามีหลักเกณฑ์และเหตุผลที่ชัดเจน ข้อมูลตัวอย่างนั้นก็จะสามารถเป็นตัวแทนของประชากรได้ สถิติจะเป็นส่วนหนึ่งช่วยอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างกับประชากรซึ่งนำไปสู่การวินิจฉัยคุณสมบัติต่างๆ ของประชากรได้

ประชากรและตัวอย่าง ในการดำเนินการทางสถิติจะมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาจากแหล่งข้อมูล 2 ส่วน คือ

1.ประชากร คือ กลุ่มของข้อมูลที่เราสนใจต้องการทราบถึงคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ข้อมูล การสอบเทียบซึ่งได้จากการวัดในกรณีเช่นนี้จำนวนประชากรจะมีอยู่ไม่จำกัด ซึ่งถ้าสามารถวัดหาข้อมูลต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จะได้ค่าของประชากรที่ต้องการ ค่าที่ได้จากประชากรเรียกว่า ค่า Parameter โดยค่า Parameter ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ ได้แก่

- ค่า Mean ,μ
- Variance
- Standard Deviation

2. ตัวอย่าง คือ ส่วนหนึ่งของประชากรที่เลือกออกมาภายใต้เงื่อนไขที่เชื่อว่าข้อมูลของตัวอย่างที่ได้ออกมานั้น จะสามารถทดแทนข้อมูลของประชากรได้ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ ค่าต่างๆ ที่ได้จากตัวอย่าง เรียกว่า ค่า statistic โดยค่า statistic ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้แก่

- ค่า Mean , $\bar{X}$
- Variance , S^2
- Standard Deviaton , S

Probability Distribution เพื่อท่จะเข้าใจถึงเหตุผลที่ชัดเจนในการตัดสินใจทางสถิติความเข้าใจเกี่ยวกับ Probability Distribution ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่จำเป็น Probability Distribution เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ ปริมาณ (Random Variable) กับโอกาสของการเกิดค่านั้นในประชากร (Probability of Occurrence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of that Value in the Population) สำหรับการกระจายของข้อมูลที่เกี่ยวกับการสอบเทียบมีลักษณะการกระจายของข้อมูลและสิ่งที่เกี่ยวข้องดังนี้

Normal Probability Distribution เป็นการกระจายที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากลักษณะการกระจายของค่าที่ได้จากการสอบเทียบมักจะมีลักษณะที่ถือได้ว่าเป็นการกระจายในแบบนี้ คุณลักษณะของการกระจายนี้กำหนดและ/หรือประมาณได้จากค่า Mean และ Standard Deviation โดยมีลักษณะประจำตัวของการกระจายดังนี้

ตารางที่ ค.2 ลักษณะประจำตัวของการกระจาย

ช่วงค่าของ Standard Deviation จาก Mean	% ของประชากร
± 1	68.27
± 2	95.45
± 3	99.73

Central Limit Theorem ทฤษฎีที่ว่าด้วย Central Limit Theorem มีประโยชน์ในการนำมาประกอบงานสอบเทียบดังนี้

- ทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีที่นำไปสู่การอธิบายเพื่อให้ประโยชน์จากคุณสมบัติของ Normal Distribution
- ทฤษฎีนี้กล่าวถึงว่าไม่ว่ารูปร่างการกระจายของประชากรจะเป็นอย่างไรก็ตาม การกระจายของค่า Mean ของตัวอย่างที่เก็บจากประชากรนี้จะมีลักษณะที่มีแนมโน้วเข้าสู่ Normal Distribution เมื่อขนาดตัวอย่างมากขึ้นจนเข้าสู่อนันต์
- จากทฤษฎีนี้นำไปสู่การประมาณค่า Standard Deviation ของตัวอย่างหารด้วยรากที่สองของ n เมื่อ n คือขนาดตัวอย่าง

t-Distribution เพื่อแก้ปัญหาในการสอบเทียบ ซึ่งในการปฏิบัติงานปกติของการสอบเทียบจะมีจำนวนวัดน้อยครั้งซึ่งหมายถึงมีขนาดตัวอย่างเล็ก ได้มีการนำทฤษฎีของ Student t-Distribution (มักเรียกกันสั้นๆ ว่า t-Distribution) มาใช้ โดยการเลือกตัวคูณที่เหมาะสมจาก Confidence Level ที่ต้องการและ Degree of Freedom ของการวัดเพื่อนำไปคูณกับ Standard Deviation ของ Sample เพื่อให้ได้ช่วงของค่าที่ถูกต้องตาม Confidence Level ที่ต้องการ ตัวอย่างค่าตัวคูณที่เหมาะสมเมื่อทราบค่า Degree of Freedom ของการสอบเทียบที่ Confidence Level ที่ต้องการ ดังตัวอย่างในตารางที่ 1 ทั้งนี้จากตัวอย่างตัวคูณในตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนการวัดในการสอบเทียบมากครั้งขึ้นจนเข้าสู่อนันต์ ตัวคูณที่ได้จะเท่ากับช่วงค่าของ Standard Deviation ที่แสดงไว้ในการกระจายแบบ Normal ดังที่กล่าวแล้วนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวัดค่ากลาง (Measure of Central Tendency) เป็นการหาศูนย์กลางของการกระจายของข้อมูล ทั้งนี้การหาค่าศูนย์กลางของการกระจายของข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบใช้กาหาค่า Mean ในลักษณะของ Arithmetic Mean โดยมีการ Defined ไว้ดังนี้

$$X = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \ldots\ldots + X_n}{n} \qquad \text{(ค.1)}$$

ตารางที่ ค.3 แสดงตัวอย่างตัวคูณจากตาราง t-Distribution

Degree of	% ของข้อมูลที่ต้องการ (Confidence Level)					
Freedom, v	68.27	90	95	95.45	99	99.73
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
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
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

การวัดค่าการกระจาย การวัดค่ากลางซึ่งเป็นการหาค่าศูนย์กลางของการกระจายดังกล่าวแล้วนั้นไม่ได้เป็นการอธิบายถึงการกระจายของข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบซึ่งจะเป็นการอธิบยถึง Precision ของการวัด ทั้งนี้ข้อมูลการกระจายของการวัดดังกล่าวเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นข้อมูลที่ควรต้องประมาณไว้ในการแสดงการกระจายของข้อมูลมีวิธีการหาค่าการกระจายหลายวิธี ได้แก่ Range, Variance, Standard Deviation ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดสำหรับงานสอบเทียบได้มีการนำ Standard Deviation มาใช้ในการหาค่าการกระจายทั้งนี้ Standard Deviation หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}{n-1}} \qquad \text{(ค.2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่า การวิเคราะห์ข้อมูลในลักษณะดังที่กล่าวมาแล้วผู้ที่ปฏิบัติงานสอบเทียบได้นำมาใช้ประโยชน์ในการประมาณค่าทั้งนี้การประมาณค่า หมายถึง การประมาณค่า Parameter จากค่า Statistic ที่ได้จากตัวอย่าง ปกติค่า Parameter ที่เราสนใจและนำมาใช้ประโยชน์สำหรับงานสอบเทียบ คือ ค่า Mean และค่า Standard Deviation ซึ่งนำมาใช้ในงานสอบเทียบดังนี้

การประมาณค่าเดี่ยว เป็นการประมาณค่ากลางโดยเชื่อว่าค่าที่ประมาณได้นี้ เป็นตัวแทนของค่าของประชากร เช่น เมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้ง นำค่าที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้เป็นการประมาณค่าเดี่ยว

การประมาณค่าช่วง เป็นการประมาณค่าที่แสดงถึงความคาดหวังว่าค่า Parameter มีแนวโน้มที่จะอยู่ระหว่างช่วงค่าที่แจ้งไว้ เช่น เมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้ง นำค่าที่ได้มาทำกรหาช่วงค่า $x_1 - x_2$ ซึ่งช่วงค่า $x_1 - x_2$ ที่ได้เป็นการประมาณค่า μ ในลักษณะที่เป็นการประมาณช่วงค่า โดยปกติการประมาณค่าช่วงมักจะแจ้งถึงระดับความเชื่อมั่นเป็น % ไว้ด้วยว่าการประมาณดังกล่าวมีความเชื่อมั่นเท่าใด

หลักการในการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดนั้นวิธีที่ง่ายที่สุดคือ การนำค่าความไม่แน่นอนย่อย ๆ มาบวกกันโดยตรง อย่างไรก็ดี การบวกกันโดยตรงในลักษณะนี้มีข้อเสียบางประการ ทำให้มีความพยายามที่จะหาวิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยวิธีที่เป็นที่ยอมรับมากที่สุดขณะนี้ ได้แก่ วิธีตามที่กำหนดไว้ใน ISO/TAG 4 “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” ซึ่งมีขั้นตอนหลัก ๆ ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด ดังนี้

- หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาณที่ต้องการวัดกับปริมาณ Input ทั้งนี้ความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณที่ทำการวัด และความสัมพันธ์ในเชิงตัวเลขที่ได้จากการวัดแสดงได้ดังนี้

ความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณที่ทำการวัดซึ่งได้มาจากปริมาณที่เกี่ยวข้องต่างๆ

$$Y = f(X_1, X_2, X_3 \ldots\ldots X_n)$$

ความสัมพันธ์ในเชิงผลของการวัด

$$y = f(X_1, X_2, X_3 \ldots\ldots X_n)$$

- ประมาณค่า Type A Standard Uncertainty
- ประมาณค่า Type B Standard Uncertainty
- ประมาณค่า Combined Standard Uncertainty
- ประมาณค่า Expanded Uncertainty

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่า Type A Standard Uncertainty

การประมาณค่า Type A Standard Uncertainty เป็นการประมาณค่าโดยใช้หลักการทางสถิติ ดังนั้นการประมาณนี้จึงเป็นการนำความเข้าใจเกี่ยวกับสถิติดังกล่าวแล้วมาใช้โดยการประมาณ เป็นการดูถึง Repeatability หรือความซ้ำค่าของค่าที่วัดได้จากกระบวนการสอบเทียบที่ดำเนินการกับ Measurand ณ ขณะใดขณะหนึ่ง โดยทั่วไปมักจะพบว่าความไม่แน่นอนที่ประมาณได้ในส่วนนี้มีขนาดเล็กกว่าความไม่แน่นอนที่ได้จาก Type B ที่จะกล่าวถึงต่อไป

การประมาณค่า Type A Standard Uncertainty มีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

- หาค่าเฉลี่ยของค่าที่วัด ถ้ามีการวัดปริมาณ x ที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n ครั้ง ค่าเฉลี่ยจะคำนวณได้จาก

$$X = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \ldots\ldots + X_n}{n} \qquad \text{(ค.3)}$$

- การกระจายของข้อมูลโดยประมาณจาก Standard Deviation จะได้ว่า

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}{n-1}} \qquad \text{(ค.4)}$$

- หาค่า Standard Deviation ของ Mean

ถ้าได้มีการดำเนินการวัดโดยมีสภาวะต่างๆ ของการวัดที่คงที่และการวัดมีการดำเนินการที่ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ค่าเฉลี่ย และค่า Standard Deviation ดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งเราสามารถประมาณค่า Standard Deviation ของ Mean ได้จาก

$$S(\overline{x}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \qquad \text{(ค.5)}$$

ค่า Standard Deviation ที่ประมาณได้นี้ เรียกว่า Type A Standard Uncertainty

$$U_A(x) \equiv S(\overline{x})$$

การประมาณค่า Type B Standard Uncertainty

การประมาณค่า Type A Standard Uncertainty ดังกล่าวมาแล้วนั้น ISO ถือว่าเป็นวิธีการประเมินโดยใช้หลักสถิติ และแตกต่างจากวิธีการประเมิน Type B Standard Uncertainty ซึ่ง ISO ถือว่าเป็นการใช้วิธีอื่นๆ ที่นอกเหนือจากวิธีที่กล่าวมาแล้ว วิธีอื่นๆ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวถึงนี้รวมถึงการใช้ข้อมูลจากแหล่งต่างๆ มาพิจารณาประกอบการประเมิน ทั้งนี้ องค์ประกอบของความผิดพลาดในส่วนที่เรียกว่า Systematic Error ซึ่งมีอยู่ตลอดเวลาในการวัดนั้น จะต้องนำมาประมาณค่าเป็น Type B Standard Uncertainty ดังนั้น การประมาณค่า Type B Standard Uncertainty จึงต้องการความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคในกระบวนการวัด เพื่อที่จะสามารถกำหนดแหล่งของความไม่แน่นอนได้ครบถ้วน รวมทั้งสามารถประมาณขนาดของความไม่แน่นอนในส่วนนี้ได้อย่างถูกต้องด้วย

เอกสาร UKAS M3003 ได้สรุปรวมแหล่งความไม่แน่นอนสำหรับ Type B Standard Uncertainty ที่ถือได้ว่าเป็นมาตรฐานของการทดสอบ/สอบเทียบทุกประเภทไว้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ปฏิบัติงานที่จะนำไปใช้ในการปฏิบัติงาน ดังนี้

- ความผิดพลาดของมาตรฐาน
- ความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบมาตรฐาน
- Drift ในค่าของมาตรฐาน
- Resolution
- วิธีการสอบเทียบ
- สภาวะโดยรอบในการสอบเทียบ

ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดส่วนนี้ผู้ปฏิบัติงานต้องมีข้อมูลมากพอที่จะตัดสินใจได้ว่าขนาดของความผิดพลาดเป็นเท่าไร และลักษณะการกระจายค่าเป็นอย่างไร ทั้งนี้เอกสาร UKAS M3003 ได้สรุปขนาดของ Type B Standard Uncertainty จากแบบการกระจายค่าที่ผู้ปฏิบัติงานมักจะพบบ่อย ๆ และขนาดของ Type B Standard Uncertainty ที่ประมาณได้ดังนี้

- ถ้า Uncertainty ที่ได้รับมาจากใบแสดงผลการสอบเทียบมีรูปแบบการกระจายเป็น Normal Probability Distribution (ที่คูณด้วยขนาด K) ค่า Type B Standard Uncertainty จะมีขนาดเท่ากับ Uncertainty/k
- ถ้าแหล่งความไม่แน่นอนให้ข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายเป็น Rectangular Probability Distribution ค่า Type B Standard Uncertainty จะมีขนาดเท่ากับ $a/\sqrt{3}$ เมื่อ a เป็นครึ่งหนึ่งของค่าการกระจายนั้น
- ถ้าแหล่งความไม่แน่นอนให้ข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายเป็น Triangular Probability Distribution ค่า Type B Standard Uncertainty จะมีขนาดเท่ากับ $a/\sqrt{6}$ เมื่อ a เป็นครึ่งหนึ่งของค่าการกระจายนั้น
- ถ้าแหล่งความไม่แน่นอนให้ข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายเป็น U-Shape Probability Distribution ค่า Type B Standard Uncertainty จะมีขนาดเท่ากับ $a/\sqrt{2}$ เมื่อ a เป็นครึ่งหนึ่งของค่าการกระจายนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Combined Standard Uncertainty

ทั้งค่า Type A Standard Uncertainty และ Type B Standard Uncertainty ล้วนแต่เป็นส่วนของ Uncertainty ของการวัดโดยรวม ซึ่งหมายความว่าจะต้องนำค่า Type A Standard Uncertainty และ Type B Standard Uncertainty ที่ประเมินได้จากที่กล่าวมาแล้วมารวมกัน โดยเอกสาร ISO ได้แนะนำวิธีการรวม Uncertainty ที่ได้จากทั้งสองกลุ่ม เพื่อให้ได้เป็น Combined Standard Uncertainty ดังนี้

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} C^2{}_i u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} u^2{}_i(y)} \qquad \text{(ค.5)}$$

โดยที่

C_i คือ Sensitivity Coefficient ซึ่งใช้สำหรับการแปลง Input ที่มีหน่วยต่างจาก Output ให้เป็นหน่วยเดียวกัน หรือใช้ขยายปริมาณของ Input ให้ เหมาะสมกับ Output

$u(x_i)$ คือ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากปริมาณ Input ต่างๆ

$u_i(y)$ คือ ความไม่แน่นอนของ Output ย่อยๆ แต่ละตัว

Effective Degree of Freedom

ในกระบวนการวัดนั้นถึงแม้ผู้ทำการวัดจะไม่ทำการวัดข้อมูลจนนับครั้งไม่ถ้วนก็ตาม แต่ก็มักจะทำการวัดหลายครั้ง ซึ่งโดยปกติมักจะทำการวัดที่ประมาณ 4 ถึง 10 ครั้ง ในแต่ละชุดการวัดนั้นๆ ถ้า n คือ จำนวนครั้งที่วัด จะมีค่าของ Degree of Freedom เกิดขึ้นเท่ากับ n-1

Degree of Freedom เป็นแฟกเตอร์ที่มีส่วนสำคัญ เนื่องจากในการหาค่าตัวคูณที่เหมาะสมในตาราง t-Distribution นั้นผู้สอบเทียบต้องทราบว่าจะกำหนด Confidence Level ที่เท่าไรและต้องทราบค่า Degree of Freedom ของการวัดด้วย สำหรับการวัดที่มี Input เพียงค่าเดียว Degree of Freedom จะประมาณได้จาก n-1 ดังกล่าวแล้ว อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติกรสอบเทียบจะมี Input ที่เกี่ยวข้องจำนวนหลายตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประเมินค่า Degree of Freedom รวมของทั้งระบบซึ่ง ISO เรียกคำนี้ว่า Effective Degree of Freedom โดยประมาณค่าได้จากสูตรที่ให้ไว้ ค่า Degree of Freedom ที่ได้นี้เมื่อนำไปใช้ร่วมกับตาราง t-Distribution ค่านี้คือ ค่าที่อยู่ในช่องซ้ายสุดของตาราง t-Distribution

$$V_{eff} = \frac{u^4{}_c(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u^4{}_i(y)}{v_i}} \qquad \text{(ค.6)}$$

เมื่อ

$u_c(y)$ คือ Combined Standard Uncertainty

$u_i(y)$ คือ Uncertainty ของ Output แต่ละตัว

v_i คือ Degree of freedom ของแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Expanded Uncertainty

ค่าความไม่แน่นอน Combined Standara Uncertainty ที่ประมาณได้ดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ขนาดหนึ่ง ซึ่งยังมีความเหมาะสมไม่มากพอที่จะใช้ได้ในภาคปฏิบัติ ทั้งนี้ค่าความไม่นอนของการวัดที่เหมาะสมใช้ได้ในทางปฏิบัติ ควรมีความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% ค่าความไม่แน่นอน Combined Standard Uncertainty ที่ประเมินได้ดังกล่าวจึงต้องนำมาดำเนินการต่อโดยการหาตัวคูณที่เหมาะสมมาคูณกับค่า Combined Standard Uncertainty ที่ได้เพื่อให้ได้เป็น Expanded Uncertainty หรือที่เรียกสั้นๆว่า Uncertainty

$$U = tu_c \qquad (ค.7)$$

เมื่อ

U คือ Expanded Uncertainty

t คือ ตัวคูณที่เลือกจากตาราง t-Distribution (ดูคำอธิบายข้างล่าง)

u_c คือ Combined Standard Uncertainty

ตัวคูณที่เลือกจากตาราง t-Distribution นี้ได้จากการกำหนดระดับความเชื่อมั่นเป็น % ที่ต้องการให้ตรงพอดีกับค่า Effective Degree of Freedom ที่ประมาณได้จะทำให้สามารถเลือก t-Factor จากตาราง t-Distribution ได้ เช่น ถ้าต้องให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดมีระดับความเชื่อมั่นที่ 95.45% โดยประมาณค่า Effective Degree of Freedom ได้ว่าเท่ากับ 4 จะได้ t-Factor เท่ากับ 2.87 ซึ่งค่า t-Factor เท่ากับ 2.87 นี้ เมื่อนำมาคูณกับ Combined Standard Uncertainty แล้วจะทำให้เชื่อได้ว่าค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ได้มีความเชื่อมั่นที่ระดับ 95.45%

ถึงแม้ระดับความเชื่อมั่นในการสอบเทียบจะสามารถเลือกที่ค่าใดก็ได้ก็ตาม ระดับความเชื่อมั่นที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปได้แก่ ความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% และโดยปกติจะอนุโลมค่าระดับความเชื่อมั่น 95.45% ว่าเป็น 95% โดยที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45% นี้เราจะสามารถกำหนดตัวคูณเมื่อ Effective Degree of Freedom เท่ากับ ∞ ได้ง่ายๆ ว่าเท่ากับ 2

จากองค์ประกอบและการดำเนินงานต่างๆ เพื่อหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดนั้น หากนำมาสรุปเป็นขั้นตอนหลักๆ จะได้ขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

- หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาณที่ต้องการวัดกับปริมาณ Input
- ทำการสอบทียบโดยทำการวัดซ้ำ ซึ่งจะมี Random Error เกิดขึ้น
- ระบบ Systematic Error ที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- ประมาณค่า Type A Standard Uncertainty
- ประมาณค่า Type B Standard Uncertainty
- ประมาณค่า Combined Standard Uncertainty
- ประมาณค่า Effective Degree of Freedom
- กำหนด Confidence Level ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกตัวคูณที่เหมาะสมจากตาราง t-Distribution
- ประมาณค่า Expanded Uncertainty

หลักการของการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการวัดโดยทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องปฏิบัติการวัดในระดับโรงงานซึ่งมีกระบวนการวัดที่ไม่ซับซ้อน สำหรับห้องปฏิบัติการที่มีระบบการวัดที่ซับซ้อนมากขึ้น หลักการดังกล่าวยังคงสามารถใช้ได้โดยมีสิ่งที่ควรทำความเข้าใจมากขึ้น ได้แก่

- ความสัมพันธ์กันเองระหว่างปริมาณ Input ที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับค่าที่ต้องการ
- Type A Standard Uncertainty ที่อาจจะมีได้หลายค่า
- ค่า Sensitivity Coefficient ที่ต้องแปลงให้ได้หน่วยที่เป็นหน่วยแบบเดียวกับปริมาณที่ทำการวัด
- การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่เป็นช่วงของค่า
- การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่มีลักษณะ Relative

ตัวอย่างการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด (จากเอกสาร UKAS M3003)

การสอบเทียบความต้านทาน ตัวอย่างนี้แสดงถึงการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดสำหรับการสอบเทียบความต้านทาน โดยในการสอบเทียบความต้านทานที่ 10 $k\Omega$ โดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันคร่อมความต้านทานที่ต้องการวัดและวัดแรงดันคร่อมความต้านทานมาตรฐานที่ต่ออนุกรมกันอยู่ ซึ่งจะได้ลักษณะความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

$$R_x = R_s R_d R_t V_x / V_s$$

เมื่อ R_s คือ ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ Standard Resistor

R_d คือ ค่า Drift ของ Standard Resistor

R_t คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของ Standard Resistor เนื่องจากอุณหภูมิในอ่างอ่างน้ำมัน

V_x คือ แรงดันที่วัดได้คร่อมความต้านทาน Rx

V_s คือ แรงดันที่วัดได้คร่อมความต้านทาน Rs

ข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบและผลการประเมิน

1. **ผลการวัดอัตราส่วนของ V_x/V_s** จำนวน 5 ครั้ง 10.4 , 10.7 , 10.6 , 10.3, 10.5 ppm
2. **ผลการประมาณ Type A Standard Uncertainty**

ค่าเฉลี่ย $\bar{v} = 10.5$ ppm

Standard Deviation $s(v) = 0.158$ ppm

$u_A(v) = s(\bar{v}) = 0.158/\sqrt{5} = 0.0706$ ppm (=Repeata)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แหล่งและขนาดของความไม่แน่นอน

3.1 ใบแสดงผลการสอบเทียบ Standard Resistor ระบุค่าความไม่แน่นอนในการวัด 1.5 ppm ที่ 95% (k=2)

3.2 ประมาณค่าความผิดพลาดเนื่องจากการ Drift ของ R_s = 2.0 ppm

3.3 ประมาณค่าความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอ่างน้ำมัน เท่ากับ 0.5 ppm

3.4 ประมาณค่าความผิดพลาดโวลต์มิเตอร์ในการอ่านค่า V_x เนื่องจาก Linearity และ Resolution เท่ากับ 0.2 ppm

3.5 ประมาณค่าความผิดพลาดโวลต์มิเตอร์ในการอ่านค่า V_s เนื่องจาก Linearity และ Resolution เท่ากับ 0.2 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

สัญลักษณ์ (1)	แหล่งของความไม่แน่นอน (2)	ค่า ppm(3)	Probability distribution(4)	Divisor (5)	C_i (6)	Ui(Rs) ppm(7)	V_i หรือ v_{eff}(3)
Rs	จากข้อ 3.1	1.5	Normal	2.0	1.0	0.75	∞
Rd	จากข้อ 3.1	2.0	Rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	1.155	∞
Rt	จากข้อ 3.1	0.5	Rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.289	∞
Vs	จากข้อ 3.1	0.2	Rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.115	∞
Vx	จากข้อ 3.1	0.2	Rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.115	∞
V	จากข้อ 3.1	0.071	Normal	1.0	1.0	0.071	4
U(Rs)	Combined Standard Uncertainty		Normal			1.418	>500
U	ExpandedUncertainty		Normal(k=2)			2.836	>500

ดังนั้นในกรณีนี้ ค่าความต้านทานที่วัดได้เท่ากับ $10000 \pm 0.03\ \Omega$

สรุป ตารางสำหรับการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบดังตัวอย่าง เป็นตารางที่เอกสารของ UKAS ใช้สำหรับช่วยในการประมาณค่าทำได้สะดวกขึ้นซึ่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบอาจนำไปใช้ดัดแปลงให้เหมาะกับลักษณะงานของแต่ละห้องปฏิบัติการ เมื่อดูจากตารางจะเห็นว่าตารางการประมาณค่าดังกล่าวมีช่องทั้งหมด 8 ช่อง ซึ่งใช้ในความหมายต่างๆ ดังนี้

- **ช่องที่ 1** ใส่สัญลักษณ์ของแหล่งความไม่แน่นอนย่อย
- **ช่องที่ 2** ใส่รายละเอียดของแหล่งความไม่แน่นอน
- **ช่องที่ 3** ใส่ขนาดของแหล่งความไม่แน่นอนที่ประมาณได้
- **ช่องที่ 4** ใส่ลักษณะการกระจายของข้อมูลจากแหล่งความไม่แน่นอนในช่องที่แล้ว การประมาณลักษณะการกระจายในช่องนี้จะทำให้ได้ตัวหารในช่องที่ 5 ถัดไปด้วย
- **ช่องที่ 5** ใส่นาดของตัวหารเพื่อที่จะทำให้ได้ Standard Uncertainty ของแต่ละตัว
- **ช่องที่ 6** ใส่ค่า Sensitivity Coefficient เพื่อที่จะคูณกับผลหารที่ได้จากช่องที่ 3 หารด้วยช่องที่ 5 ค่า Sensitivity Coefficient อาจมีหน่วยหรือไม่ก็ได้ โดยปกติมักจะเท่ากับ 1
- **ช่องที่ 7** ใส่ค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่คำนวณได้ของแต่ละตัวและคำนวณRoot Sum Square: RSS (ทำได้โดยการนำแต่ละค่ามายกกำลังสอง นำมาบวกกัน และถอดรากที่สอง) เพื่อใส่ในแถวของ Combined Standard Uncertainty
- **ช่องที่ 8** ใส่ค่า Degree of Freedom ของแต่ละตัวในแต่ละแถว และประมาณค่า Effective Degree of Freedom ใส่ในแถว Combined Standard Uncertainty

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

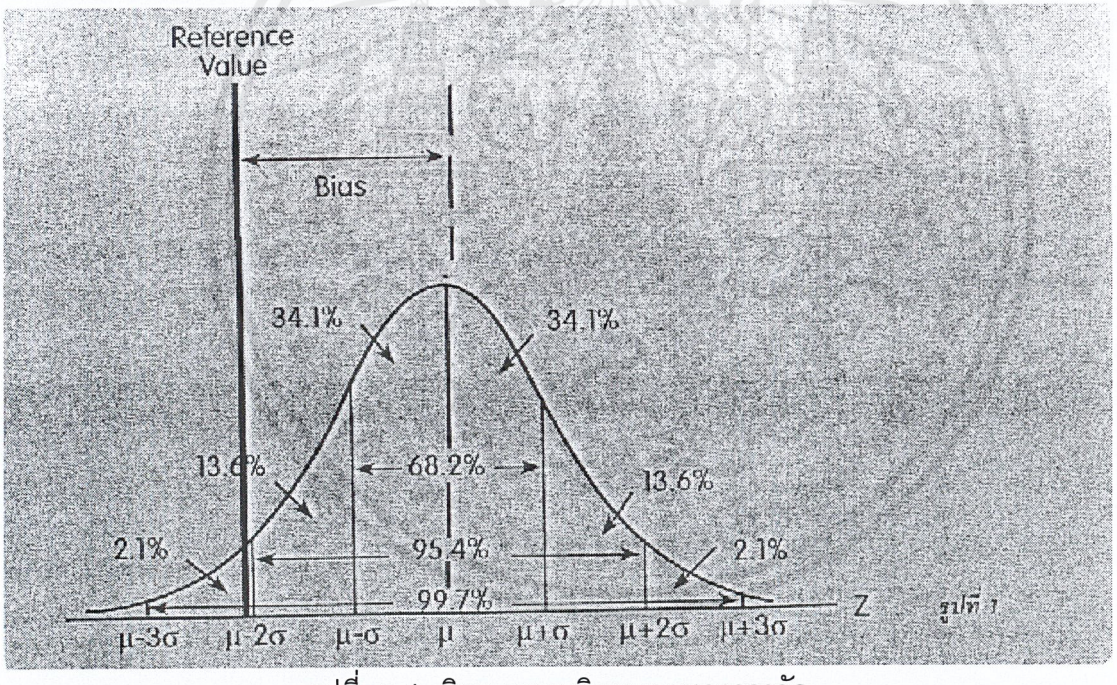
ค่า Effective Degree of Freedom ที่ได้ในช่องที่ 8 นี้เมื่อนำไปใช้ร่วมกับ Confidence Level ในตาราง t-Distribution จะทำให้ได้ตัวคูณที่เหมาะสม (สำหรับการสอบเทียบโดยทั่วไปค่าตัวคูณนี้มักจะได้ออกมาเท่ากับ 2) นำค่าตัวคูณนี้ไปใส่ในช่องที่ 4 แถว Expanded Uncertainty และนำตัวคูณนี้ไปคูณกับค่า Combined Standard Uncertainty ที่ได้ ใส่ในช่องที่ 8 ของแถว Expanded Uncertainty ผลที่ได้จะเป็นค่า Uncertainty ที่ต้องการ

ความหมายของค่าความไม่แน่นอนในการวัดในตัวอย่างการสอบเทียบความต้านทานนี้ ค่า ± 0.03Ω ที่แสดงไว้ต่อจากค่าเฉลี่ย เป็นการแสดงถึงคุณภาพและความเชื่อถือได้ของการสอบเทียบ Standard Resistor โดยเป็นการแจ้งข้อมูลให้ผู้ใช้ผลการสอบเทียบได้ทราบว่าผู้สอบเทียบประมาณค่าความต้านทานที่วัดไว้ที่เท่ากับ 10000.11 Ω อย่างไรก็ดี ผู้สอบเทียบไม่ทราบค่าที่ถูกต้องของ Standard Resistor นี้ชัดเจน แต่จากระบบคุณภาพและความสามารถของการสอบเทียบผู้สอบเทียบเชื่อว่าเมื่อทำการสอบเทียบ Standard Resistor นี้ซ้ำ ค่าของ Standard Resistor จะถูกต้องไม่น้อยกว่า 95 ครั้งในการวัด 100 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 2 ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement) ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดไฟฟ้า

มาตรฐาน ISO-9000, ISO/IEC 17025 กำหนดในเรื่องของการวัด การสอบเทียบ ว่าจะต้องรู้ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement) จึงจะทำให้รู้ว่าผลการวัดใดๆ ที่ได้นั้นมีคุณภาพดีพอกับความต้องการของแต่ละหน่วยงานหรือไม่ ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานด้านการวัด การสอบเทียบมาตรฐาน จึงต้องรู้วิธีการประเมินองค์ประกอบต่างๆที่จะนำมาประเมิน รู้ความหมายและอื่นๆ การแปลและเรียบเรียงเอกสานชุดนี้ รวบรวมจากหนังสือและเอกสารอบรมจากองค์กรต่างๆ คือ NAMAS (M 3003), FLUKE (U.S.A), TEMPERATURE CALIBRATION โดยพิจารณาจากวิธีการนำเสนอให้เข้าใจได้ง่านขึ้น อย่างไรก็ตามเอกสารนี้อาจยังไม่สมบูรณ์พอสำหรับบางท่านที่จะไม่ต้องอ่านหาความรู้จากตำราหรือมาตรฐานต่างๆ เพิ่มเติม



รูปที่ ค.1 นิยามความผิดพลาดของการวัด

นิยามความผิดพลาดของการวัด

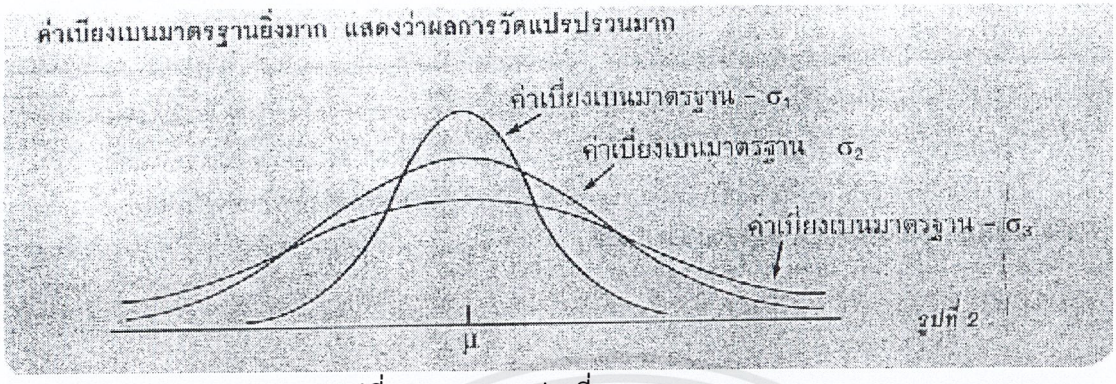
ความผิดพลาด (Error) คือ ความแตกต่างระหว่างผลของการวัดค่าที่วัดได้กับค่าจริงของสิ่งที่ทำการวัด (ปริมาณที่ทำการวัด) หลังจากแก้ไขค่า (Correction) แล้ว หรือ

Error = Indicated Value - True Value (or Reference Value)

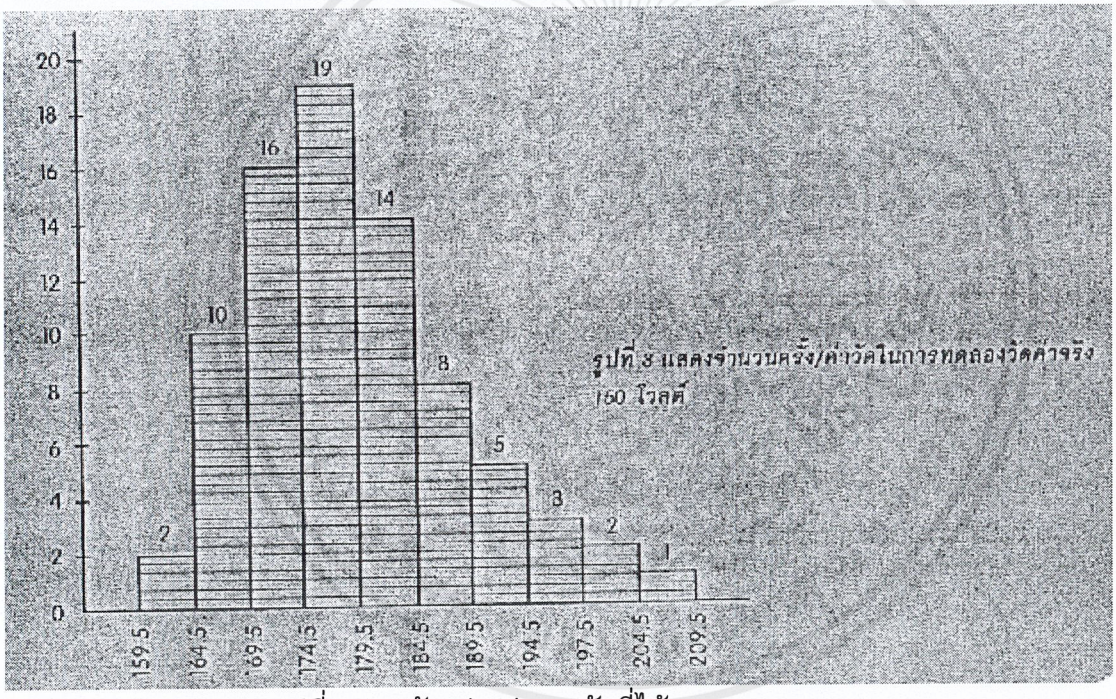
ขอใช้ภาพกราฟแสดงการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution Curve) ในรูปที่ 3.29 เป็นสื่อแสดงให้เห็นความหมาย ภาพนี้แสดงให้เห็นว่าค่าจริงสามารถเป็นค่าใดๆก็ได้ภายใต้เส้นโค้งของกราฟ แต่ที่เราต้องการมากที่สุดคือ ให้ค่าจริงอยู่ตำแหน่งตรงกลางของเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้งที่วัดได้จำนวนตซครั้งมากที่สุดในการวัด 100 ครั้ง (เทียบเป็น 100%) ซึ่งก็คือการวัดนี้ได้ค่าวัดส่วนใหญ่เป็นค่าจริง



รูปที่ ค.2 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ ค.3 ตัวอย่างค่าการวัดที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของความผิดพลาด โดยทั่วไปเราแบ่งความผิดพลาด (Error) เป็น 2 ชนิด คือ

1. ความผิดพลาดสุ่ม (Random Error)

คือ ความแตกต่างระหว่างผลการวัดที่เกิดแบบคาดเดาไม่ได้ เกิดแบบไม่มีระเบียบแบบแผนที่แน่นอน มักจะมองเป็น "สิ่งรบกวนที่ไม่มีระเบียบแน่นอน" ในกระบวนการวัด ความผิดพลาดสุ่มนี้จะถูกประเมินค่าโดยวิธีทางสถิติ (Sttatistic Means)

2. ความผิดพลาดของระบบ (Systematic Error)

คือ ความแตกต่างจากค่าจริง ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในระบบการวัดตามที่เรียกชื่อ ความผิดพลาดจากระบบเหล่านี้เป็นผลมาจากสิ่งที่วัดได้ (อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน อื่นๆ) และมีผลกระทบความสัมพันธ์กับของปริมาณที่ทำการวัดสิ่งอื่นๆ เช่น การผิดพลาดจากตัวมาตรฐาน เป็นต้น การเกิดความผิดพลาดสุ่มในเวลาหนึ่ง อาจเป็นความผิดพลาดของระบบในอีกด้านหนึ่งได้

(Absolute) Error of Measurement ความผิดพลาด (สุทธิ) ของการวัด

คือ ผลแตกต่างค่าที่วัดได้กับค่าจริงของสิ่งที่ทำการวัด

(Error = Indicated Value - True Value)

ค่าความผิดพลาดที่รู้ค่านี้สามารถชดเชยโดยเพิ่มหรือลดค่าแก้ไข (Correction) เข้าไปความผิดพลาดของผลลัพธ์ที่แก้ไขแล้วนี้จะบอกได้ด้วยค่าความไม่แน่นอนเท่านั้น

"ความผิดพลาดสุทธิ" จะมีเครื่องหมาย + หรือ – อย่าให้สับสนกับ "ค่าความผิดพลาดสุทธิของความผิดพลาด" ที่เป็นสัมประสิทธิ์ของความผิดพลาด

Correction (ค่าแก้ไขความผิดพลาด)

คือ ค่าที่บวกกันทางพีชคณิตกับค่าผิดพลาดของการวัด เพื่อชดเชยความผิดพลาดสมมุติเชิงระบบ (Assumed Systematic Error)

ค่าแก้ไขความผิดพลาดมีค่าเท่ากับค่าความผิดพลาดสมมุติเชิงระบบ แต่มีเครื่องหมายตรงข้าม

เนื่องจากความผิดพลาดเชิงระบบนั้น ไม่รู้ค่าที่แท้จริง การแก้ไขความผิดพลาดจึงขึ้นกับค่าความไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Uncertainty of Measurement (ความไม่แน่นอนของการวัด)

คือ ผลการประเมินที่เจาะจงไปที่คุณสมบัติเฉพาะในช่วงที่คาดว่าค่าจริงของสิ่งที่จะวัดนั้นเป็นอยู่ โดยทั่วไปจะระบุพร้อมด้วยค่าความน่าจะเป็นไปได้ด้วยค่าระบบความมั่นใจ (Confidence level) กี่เปอร์เซนต์

หมายเหตุ ความไม่แน่นอนของการวัดนั้น โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยหลายองค์ประกอบ บางองค์ประกอบอาจถูกประมาณมาด้วยวิธีทางสถิติที่ใช้กับผลการวัดหลายๆครั้งแล้วใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง (Experimental Standard Deviation) เป็นตัวบอกคุณสมบัติ (เรียก Type A ตามมาตรฐาน M3003 ของ NAMAS U.K เป็นต้น) หรือการประมาณค่าขององค์ประกอบอื่นๆนั้นสามารถทำได้โดยใช้พื้นฐานของประสบการณ์ หรือข้อมูลจากแหล่งต่างๆ เท่านั้น (เรียก TypeB ตามมาตรฐาน M3003 ของ NAMAS U.K เป็นต้น)

ตัวอย่างวิธีบอกค่าความไม่แน่นอของการวัด

หลายองค์กรด้านมาตรวิทยา แนะนำให้ใช้การบอกค่าความไม่แน่นอนแทนทัศนคติที่ใช้การบอกค่าความผิดพลาดของการวัด

“ค่าความไม่แน่นอน” กับ “ค่าผิดพลาด” ไม่ได้มีความหมายเดียวกัน จะแสดงให้เห็นความแตกต่างดังรายงานผลนี้

ผลการสอบเทียบดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ค่าจริง 25.0 V, ค่าที่อ่านได้ 25.3 V, ค่าความผิดพลาด (Error) = 0.3 V, ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) = +/-0.1V, Confidence level ~95%

แหล่งความไม่แน่นอนของการวัด

แหล่งความไม่แน่นอนควรจะรู้และบอกโดยบอกผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิคในเรื่องนั้น โดยประเมินจากความรู้ความเข้าใจในระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานนั้น การขาดความรู้ จะนำไปสู่การได้ผลการวัดที่เชื่อมั่น แต่กลับเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง

แหล่งความไม่แน่นอนที่มีคล้ายกันในแต่ละงานสอบเทียบ

- ค่าจากตัวมาตรฐาน
- ผลจากสิ่งแวดล้อม
- ความสามารถในการวัดซ้ำๆกัน (Repeatability)
- ค่าผิดพลาดจากการคำนวณ
- ค่าประมาณ หรือค่าสมมุติขึ้น
- ค่าผิดพลาดจากการดูค่าจากตารางมาตรฐาน
- ค่าผิดพลาดจาการปัดเศษ เช่น 2.346 ปัดเป็น 2.35 ปัดเป็น 2.4 แทนที่จะเป็น 2.346 ปัดเป็น 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีประเมินค่าความไม่แน่นอน

แบ่งเป็นวิธีประเมิน “แบบ A (Type A)” กับ “แบบ B (Type B)”

องค์ประกอบในการประเมิน “ แบบ A”

“แบบ A” ประเมินโดยการคำนวณจากชุดข้อมูลการวัดซ้ำๆกันหลายครั้งด้วยวิธีทางสถิติ

“แบบ B” คือการประเมินโดยวิธีอื่นๆ ที่ไม่ใช่ “แบบ A”

องค์ประกอบในการประเมิน“แบบ B”

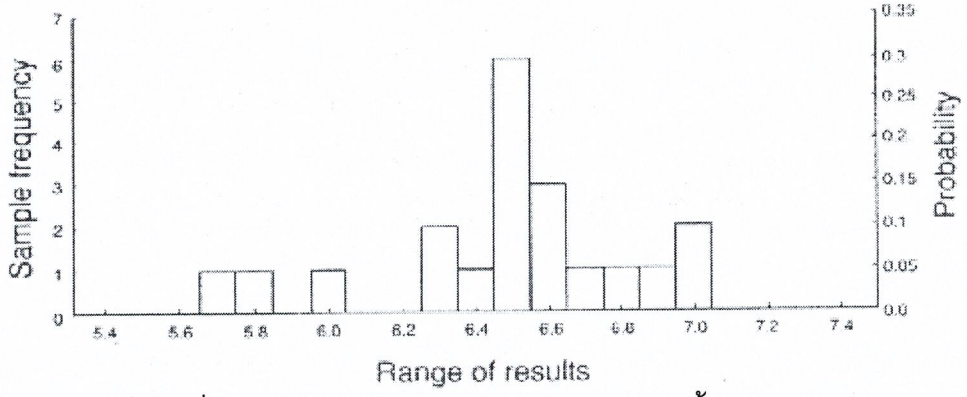
ประเมินโดยการคำนวณจากข้อมูล

- ข้อมูลการวัดจากอดีต
- Calibration Certificate
- ข้อมูลจากประสบการณ์หรือความรู้
- ค่าคงที่ที่ยอมรับ
- ข้อมูลจากข้อกำหนดจำเพราะของผู้ผลิต
- ข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

ทั้ง “แบบ A” และ “แบบ B” สามารถบอกค่าความไม่แน่นอนด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) โดยการใช้องค์ประกอบที่เหมาะสมและโดยขึ้นอยู่กับการสมมุติความน่าจะเป็นของการกระจายค่า (Probability Distribution)

การประเมินค่าความไม่แน่นอน “Type A”

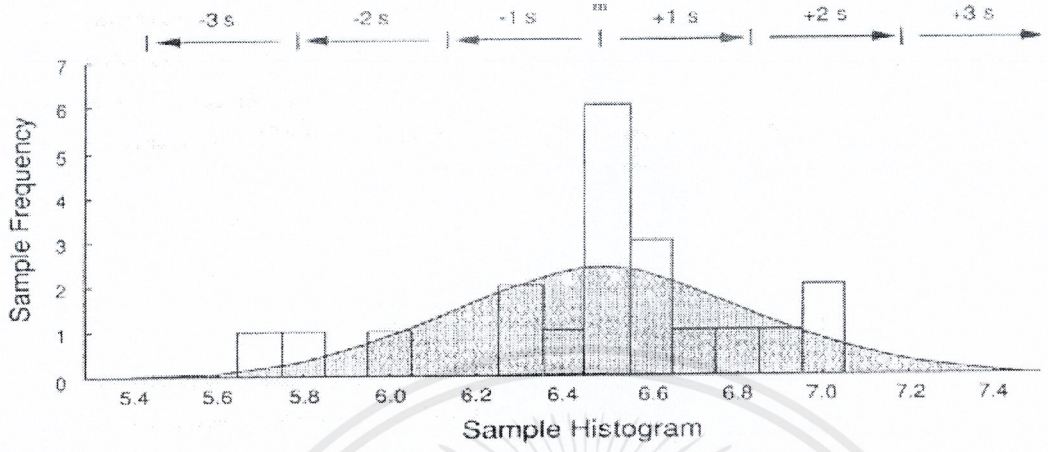
1. เป็นการประเมินโดยใช้วิธีทางสถิติ ในการวิเคราห์ชุดข้อมูลผลการวัดที่วัดซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง และพิจารณาความถี่ของการวัด (แสดงในแกนตั้ง) ได้ค่าซ้ำกัน (แสดงค่าที่วัดได้ในแกนนอน) ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 (ซึ่งได้จากผลการวัด 20 ครั้ง ได้ค่าต่างๆ ดังนี้) 6.6, 6.5, 7.0, 6.4, 6.5, 6.3, 6.6, 7.0, 6.5, 6.5, 6.4, 6.0, 6.8, 6.5, 5.7, 5.8, 6.6, 6.5, 6.7, 6.9

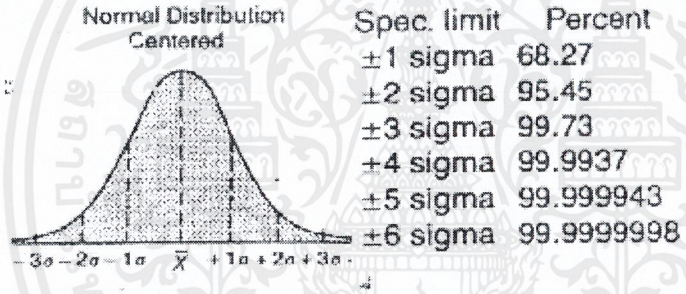


รูปที่ ค.4 กราฟฮิสโตแกรมของการวัด 20 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อมูลที่ต่างกัน (Error) นั้นมาจาก “Random effect” และถ้าความผิดพลาดกระจายแบบปกติ ก็จะได้ภาพเป็นรูประฆังคว่ำ เรียก The Gaussian or Normal Low of Error ดังตัวอย่างในภาพที่ 5





รูปที่ ค.5 แสดงความหมายค่าเฉลี่ยของการวัด (X bar) และเปอร์เซ็นต์ของค่าวัดที่จะเป็นได้ในช่วง +/- k sigma (เช่น +/- 2 sigmaหรือ +/- 2 S จะเป็น 95.45% เป็นต้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 แสดงค่า k (ตัวคูณ) และเปอร์เซ็นต์ของค่าวัดที่จะเป็นไปได้ในช่วง +/- k sigma ต่างๆ จาก k=0 ถึง 5

k	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00	0.8	1.60	2.39	3.19	3.99	4.78	5.58	6.38	7.17
0.2	15.85	16.63	17.41	18.19	18.97	19.74	20.51	21.28	22.05	22.82
0.4	31.08	31.82	32.55	33.28	34.01	34.73	35.45	36.16	36.88	37.59
0.6	15.15	45.81	46.47	47.13	47.78	48.43	49.07	49.71	50.35	50.98
0.8	57.63	58.21	58.78	59.35	59.51	60.47	61.02	61.57	62.11	62.65
1.0	68.27	68.75	69.23	69.70	70.17	70.63	71.09	71.54	71.99	72.49
1.2	76.99	77.37	77.75	78.13	78.50	78.87	79.23	79.59	79.95	80.29
1.4	83.85	84.15	84.44	84.73	85.01	85.29	85.57	85.84	86.11	86.38
1.6	89.04	89.26	89.48	89.69	89.90	90.11	90.31	90.51	90.07	90.90
1.8	92.81	92.97	93.12	93.28	93.72	93.57	93.71	93.85	93.99	94.12
2.0	95.45	95.56	95.66	95.76	95.86	95.96	96.06	96.15	96.25	96.34
2.2	97.22	96.51	97.36	97.43	97.49	97.56	97.62	97.68	97.74	97.80
2.4	98.36	98.40	98.95	98.49	98.49	98.57	98.61	98.65	98.69	98.72
2.6	99.07	99.09	99.12	99.15	99.17	99.20	99.22	99.24	99.26	99.29
2.8	99.49	99.50	99.52	99.53	99.53	99.56	99.58	99.59	99.60	99.61
3.0	99.73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5	99.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	99.994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5	99.9993	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.0	99.9999	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ขั้นตอนวิธีประเมินค่าความไม่แน่นอน "Type A"

1. จากการวัดซ้ำอ่านค่า n ครั้ง

ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 ซึ่งได้จากผลการวัด n=20 ครั้ง

2. ได้ผลการวัดเป็น q1, q2, q3,...,qn

ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 ได้ค่าต่างๆ ดังนี้ 6.6, 6.5, 7.0, 6.4, 6.5, 6.3, 6.6, 7.0, 6.5, 6.5, 6.4, 6.0, 6.8, 6.5, 5.7, 5.8, 6.6, 6.5, 6.7, 6.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คำนวณค่าเฉลี่ย (Arithmetic Mean)

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(q_j - \bar{q})^2 \qquad \text{(ค.7)}$$

ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 Mean = 6.485

4. คำนวณค่า The Standard Deviation ของผลการวัด n ค่า

$$\bar{q} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} q_j \qquad \text{(ค.8)}$$

ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 S^2= 0.120, S = 0.346

5. คำนวณค่า The Standard Deviation ของค่าเฉลี่ย (Mean)

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \qquad \text{(ค.9)}$$

ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 S of the mean = 0.346/(Square Root of 20 = 4.47) = 0.77

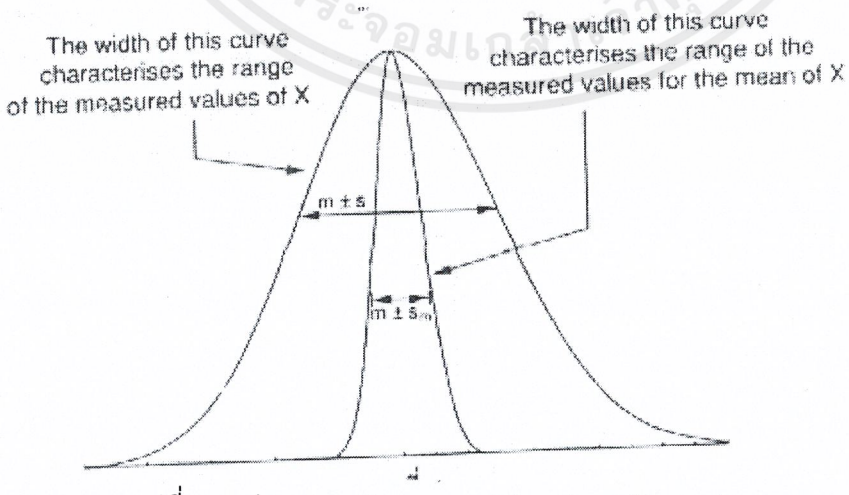
6. กำหนดให้ Type A Standard Uncertainty

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q})$$

ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 u = 0.77

7. คำนวณค่า The degree of freedom V = n-1

ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 V = 20-1 = 19



รูปที่ ค.6 ค่า The degree of freedom V = n-1

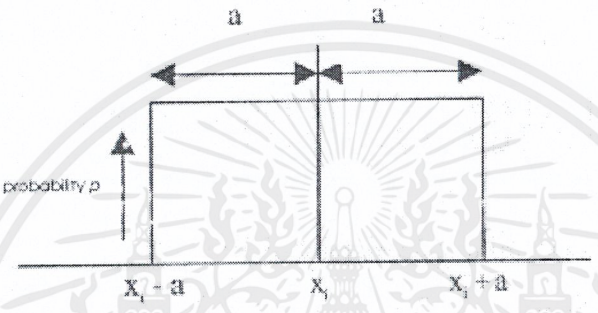
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินค่าความไม่แน่นอน Type B

การพิจารณา Type B Uncertainty นั้น เราจะต้องคำนวณการเปลี่ยนข้อมูลค่าความไม่แน่นอนที่ได้มาแบบต่างๆ ได้เป็น 1 Standard Uncertainty โดยการหารด้วยค่าค่าหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับลักษณะความเป็นไปได้ของการกระจายค่าความไม่แน่นอน (The Prabability of the Uncertainty) ว่าเป็นแบบใด สามารถแบ่งเป็นแบบต่างๆได้ ดังนี้

1. แบบ Rectangular Prabability Distribution

ค่าความไม่แน่นอนแบบนี้ใช้กับกรณีที่ให้ค่ามาเป็นค่าความไม่แน่นอนสูงสุด และมีโอกาสเป็นค่าใดๆ เท่ากันทุกค่าตลอดช่วง ดังภาพ



รูปที่ ค.7 Rectangular Prabability Distribution

คำนวณได้โดย

1.1 หาค่าครึ่งหนึ่งของช่วงสูงสุด – ต่ำสุด เป็น “a”

1.2 หารด้วยค่า $\sqrt{3}$

Standard Uncertainty

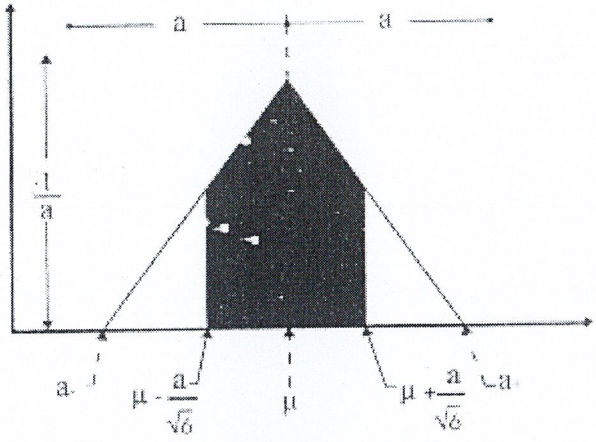
$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$$

ตัวอย่าง Type B Uncertainty ของเครื่องมือที่ใช้ที่มี Rectangular Prabability Distribution มีดังนี้ ค่า Accuracy, Drift, Hysteresys, Resolution เป็นต้น

2. แบบ Triangular Prabability Distribution

ค่าความไม่แน่นอนแบบนี้ คือ กรณีที่เรารู้ว่าส่วนใหญ่ค่าของมันจะอยู่ใกล้ค่ากลางของการกระจาย นั่นคือโอกาสที่ค่าความไม่แน่นอนจะเป็น คือค่ากลางเป็นส่วนใหญ่ ดังภาพ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.8 Triangular Distribution

คำนวณได้โดย

2.1 หาค่าครึ่งหนึ่งของช่วงสูงสุด – ต่ำสุด เป็น “a”

2.2 หารด้วย $\sqrt{6}$ ค่าความไม่แน่นอนเป็น

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}} \qquad \text{(ค.10)}$$

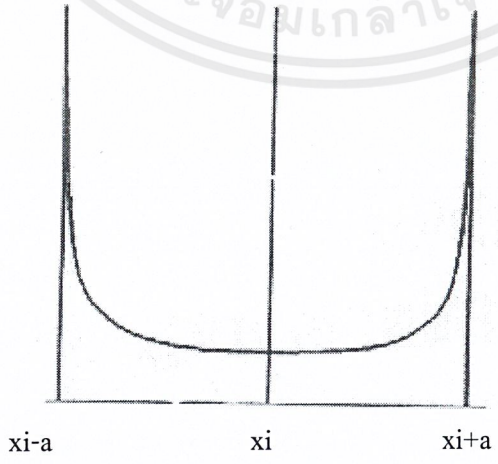
ตัวอย่างค่าความไม่แน่นอนแบบนี้ เช่น การระบุการควบคุมอุณหภูมิห้องสอบเทียบเป็น 20 ± 2°C นั้น อุณหภูมิจริงของห้องจะอยู่ใกล้ 20°C เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น

หาค่าครึ่งหนึ่งของช่วงสูงสุด – ต่ำสุด คือ 2-(-2) = 2°C

จึงให้คิดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิที่ 2°C

3. แบบ U-Shape Prabability Distribution

ค่าความไม่แน่นอนแบบนี้ คือ กรณีเกิดความไม่เข้ากันหรือไม่สอดคล้องกัน (Mismatch) ของตัวส่งกับตัวรับใดๆ (เช่น เครื่องส่งคลื่นวิทยุ เป็นต้น) ดังภาพ



รูปที่ ค.9 U-Shape Prabability Distribution

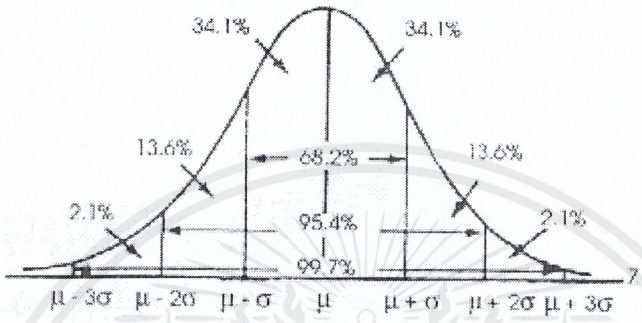
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ค่าความไม่แน่นอนจะเป็น

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{2}} \qquad \text{(ค.11)}$$

4. แบบ Normal or Gaussian Prabability Distribution

คือค่าความไม่แน่นอนที่บอกมาพร้อมค่าระดับความมั่นใจ (Confidence Level) เช่น > 95% หรือ ~ 99% ดังภาพ



รูปที่ ค.10 Normal or Gaussian Prabability Distribution

การหาค่า 1 Standard Uncertainty ได้โดยการหารด้วยค่าดังต่อไปนี้

ค่า Confidence Level ที่บอก	ให้หารด้วยค่า k =
95%	1.96
Approximately 95%	2
99%	2.58
Approximately 99%	3

ค่าจาก Calibration Certificate คำนวณโดย

$$u(x_i) = \frac{u}{k}$$

จากค่า Manufacturer Specification คำนวณโดย

$$u(x_i) = \frac{tolerance\,\lim it}{k}$$

การรวมผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนทั้งหมด

หลังจากพิจารณาค่าความไม่แน่นอน Type A และ Type B ว่ามีอไรบ้างแล้ว เราจะต้องคำนวณผลรวมข้อมูลค่าความไม่แน่นอนที่ได้มาแบบต่างๆ นั้น เป็นค่า Combined Standard Uncertainty (u_c) ดังสมการนี้

1. ถ้าค่าความไม่แน่นอน เป็นชนิดอิสระจากกัน(Uncorrelated Type) ใช้วิธี RSS = Root of sum of Square ดังสมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2(y)} \qquad \text{(ค.12)}$$

c_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลง(Conversion) หรือ ความไว(Sensitivity) ของค่าวัด

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \updownarrow x_1 = x_n = x_n \qquad \text{(ค.13)}$$

ถ้าความไม่แน่นอน Type A ประกอบด้วย

$$A = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + ...s_m^2} \qquad \text{(ค.14)}$$

ถ้าความไม่แน่นอน Type B ประกอบด้วย

$$B = \sqrt{\frac{a_1^2}{k^2} + [\frac{a_2^2 + a_3^2 + ...a_m^2}{3}]} \qquad \text{(ค.15)}$$

ผลรวมข้อมูลค่าความไม่แน่นอนที่ได้มาแบบต่างๆ นั้น คือ

$$u_c(y) = \sqrt{A^2 + B^2} \qquad \text{(ค.16)}$$

2. ถ้าค่าความไม่แน่นอน Type A และ Type B เป็นชนิดสัมพันธ์กัน (Corelated Type) ใช้วิธีรวมกันโดยตรง ดังสมการนี้

$$(u_c) = +/-(A_1 + B_1 + B_2 + \ldots + B_n)$$

3. ค่า Combined Uncertainty ที่ได้นี้ ยังไม่มีค่าความมั่นใจมากพอสำหรับงานทางพานิชย์บางอย่าง ทางอุตสาหกรรม ทางกฎหมาย (เช่น แง่สุขอนามัย ความปลอดภัยที่ต้องคำนึง) เพราะเป็นค่า 1 Standard Uncertainty มีความมั่นใจประมาณ 68%

เพื่อเพิ่มความมั่นใจ (Confidence Level) เราจึงใช้วิธีเพิ่มความไม่แน่นอน (Expanded Uncertainty) ใช้สัญลักษณ์ U ได้จาก การคูณ $u_c(y)$ ด้วยค่า Coverage Factor k จะได้ว่า

$U = k\, u_c(y)$

จึงเขียนผลใหม่ได้ว่า $Y = y \pm U$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coverage Factor (k) จะเป็นค่าเท่าไหร่นั้นขึ้นอยู่กับความต้องการระดับความมั่นใจ (p) ว่าเป็นกี่ % ซึ่งคำนวณหาได้จากตาราง student's t-Distribution มีวิธีดังนี้

4. การหา Coverage Factor (k)

ใช้ 4 ขั้นตอนในการคำนวณหาค่า k

4.1 ได้ค่า y และ u_c (y)

4.2 ประมาณค่า V_{eff} ของ u_c (y) จาก The welcn Satterthwaite formula :

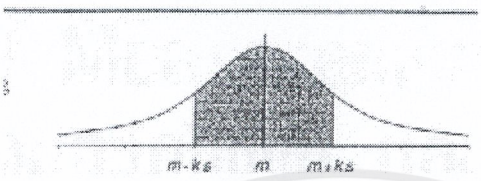
$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \qquad \text{(ค.17)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table ค.6 Student's t-distribution

Values of k for specified confidence limit, P , as a function of the number of degrees of freedom v , where N measurements are used to determine ρ parameter, the number of degrees of freedom is $v = N - \rho$. When calaulating a mean $v = N - 1$

P is the percentage probability of finding X within $m \pm ks$



P(%)	50	68.3	95.0	95.5	99.0	99.7
v						
1	1.000	1.84	12.7	14.0	63.7	236
2	0.817	1.32	4.30	4.53	9.92	19.2
3	0.765	1.20	3.18	3.31	5.84	9.22
4	0.741	1.14	2.78	2.87	4.60	6.62
5	0.727	1.11	2.57	2.65	4.03	5.51
6	0.718	1.09	2.45	2.52	3.71	4.90
7	0.711	1.08	2.36	2.43	3.50	4.53
8	0.706	1.07	2.31	2.37	3.36	4.28
9	0.703	1.06	2.26	2.32	3.25	4.09
10	0.700	1.05	2.23	2.28	3.17	3.96
11	0.697	1.05	2.20	2.25	3.11	3.85
12	0.695	1.04	2.18	2.23	3.05	3.76
13	0.694	1.04	2.16	2.21	3.01	3.69
14	0.692	1.04	2.14	2.20	2.98	3.64
15	0.691	1.03	2.13	2.18	2.95	3.59
16	0.690	1.03	2.12	2.17	2.92	3.54
17	0.689	1.03	2.11	2.16	2.90	3.52
18	0.688	1.03	2.10	2.15	2.88	3.48
19	0.688	1.03	2.09	2.14	2.86	3.45
∞	0.675	1.00	1.96	2.00	2.58	3.00

V_i = Degre of freedom ของ U (xi) = n-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 หาค่า t – factor t_p (V_{eff}) ที่ตรงกับระดับความมั่นใจที่ต้องการ (เช่น 95.5%) จากตาราง student's t-Distribution ที่ให้มาด้วยแล้ว ถ้า V_{eff} ที่คำนวณได้ไม่เป็นเลขจำนวนเต็มให้ปรับใช้ตัวเลขที่ต่ำกว่า

4.4 ใช้ $k = t_p(V_{eff})$ และคำนวณ $U = k\, u_c\, (y)$

5. การเขียนรายงานผล

ให้เขียนรายงานผลการสอบเทียบในใบ Calibration Report ด้วยรายละเอียด ดังนี้

a) ผลการวัด

b) Expanded Uncertainty

c) ค่า Level of Confidence ถ้าเป็นค่าประมาณเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม ให้ใส่คำว่า Approximately ด้วย

d) ค่า Coverage Factor (k) พร้อมค่า Effective Degrees of freedom ถ้าจำเป็น

ตัวอย่างการเขียนรายงาน

1. ผลการวัด คือ $Y = y \pm U$ ด้วยค่า Confidence Level 95.5% Coverage Factor (k) = 2.28, Effective Degrees of freedom = 10

2. มิเตอร์ A ให้ผลการวัด ค่ามาตรฐาน (250 V) ค่าอ่านได้ (25.3 V), Error = 0.3 V ค่า Uncertainty = +/-0.1 V ค่า Confidence Level ~ 95%, Coverage Factor (k) = 2.28, Effective Degrees of freedom = 10

แหล่งกำเนิดความผิดพลาด(Error) และความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement)ในงานสอบเทียบมาตรฐานเครื่องวัดทางไฟฟ้า

ที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นคำอธิบายแหล่งกำเนิดความผิดพลาดของระบบและความไม่แน่นอน (หลังการแก้ค่าผิดพลาด : Correction) ในงานสอบเทียบทางไฟฟ้า พร้อมความเห็นย่อๆ เกี่ยวกับธรรมชาติของมัน เป็นตัวอย่างที่กล่าวใน M3003 : The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement ของ United Kingdom Accreditation Service : UKAS (ยกเว้นรูปประกอบซึ่งนำมาจาก Fluke Corporation, U.S.A.) ซึ่งแนะนำให้หารายละเอียดเพิ่มขึ้นจากสิ่งพิมพ์เทคนิคเฉพาะทางและเอกสารประยุกต์ของผู้ผลิตและแหล่งอื่นๆ (และไม่ใช่มีเพียงที่กล่าวนี้ที่นี้เท่านั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความไม่แน่นอนนำเข้า (Import) จากภายนอก

เป็นค่าความไม่แน่นอนที่ระบุมากับ Certificate of Calibration ของเครื่องวัด, อุปกรณ์ มาตรฐานอ้างอิงที่นำมาใช้จะต้องถูกนำมาคิดรวมอยู่ใน Uncertainty Budget (งบประมาณค่าความไม่แน่นอน) ดังตัวอย่างรูปที่ ค.7

CERTIFICATE OF CALIBRATION

FLUKE PRECISION MEASUREMENT LTD HURRICANE WAY NORWICH NORFOUK NR6 6JB, UNITED KINGDOM TELEPHONE +44(0)1603 256600 FAX : +44(0)1603 483670

UKAS Accredited Calibration Labaratary No 0183

Certificate No 014818 Page 3 of 10

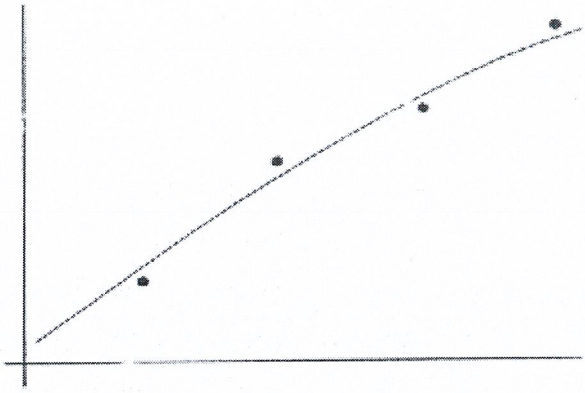
Range	Applied Value	indicated Value	Deviation	Expanded Uncertainty
200 v	0.00000 v	-0.00000 v	0.00000 v	0.00005 v
200 v	100.000500 v	100.00050 v	0.00000 v	0.00007 v
200 v	-100.000480 v	-100.00048 v	0.00000 v	0.00007 v
1000 v	0.0000 v	0.00000 v	0.0000 v	0.0002 v
1000 v	1000.00140 v	1000.0014 v	0.0000 v	0.0011 v
1000 v	-1000.00140 v	-1000.0010 v	0.0001 v	0.0011 v

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลจาก Calibration Certificate

2. ความเสถียรภาพทางกายภาพ

2.1 สมรรถนะของเครื่องวัดทุกตัวและค่าของมาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) จะต้องคาดว่ามีการเปลี่ยนไปปริมาณหนึ่งตามกาลเวลาที่ผ่านไป Passive Cevices เช่น ความต้านทานมาตรฐาน High-Grade RF and Microwave Attenuator ก็ต้องคาดว่าจะต้องเปลี่ยนค่า (Driff) อย่างช้าๆ ตามกาลเวลา การประมาณค่าที่เปลี่ยนดังกล่าวจะประเมินจากพื้นฐานของค่าที่ได้จากการสอบเทียบครั้งก่อนๆ เราไม่สามารถสมมุติว่าค่าที่เปลี่ยนจะเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) ข้อมูลสามารถรับได้ถ้าแสดงในรูปของกราฟ วิธีการ Curve Fitting (ดูรูปที่ 14) ที่ให้น้ำหนักก้าวหน้ามากกว่าแต่ละค่าที่ได้จากการสอบเทียบครั้งหลังๆ สามารถนำมาใช้กับค่าที่เป็นไปได้ที่สุด ณ ขณะที่ทำการประเมินระดับความซับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.11 วิธีการ Curve Fitting

ในการทำ Curve Fitting เป็นสาระของการตัดสินใจ ในบางกรณีการเขียนเส้นโค้งเรียบผ่านจุดข้อมูลที่เลือกด้วยมือก็สามารถให้ผลที่น่าพอใจได้ เมื่อใดก็ตามที่สอบเทียบใหม่จะต้องทำการประเมินค่าเปลี่ยน(Driff)ใหม่ ค่าแก้ไขความผิดพลาด (Correction) ที่ใช้กับค่าเปลี่ยนจะมีค่าความไม่แน่นอนบนพื้นฐานของการกระจายของจุดข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติการเปลี่ยนค่า ขนาดของค่าเปลี่ยนและความไม่เสถียรภาพแบบ Random ของเครื่องวัดและค่าความแม่น (Accuracy) ที่ต้องการ จะเป็นตัวประเมินหาช่วงระยะเวลาสอบเทียบใหม่(Calibration Interval)

2.2 สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนจะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้เสมอไป เพราะการเปลี่ยนแปลงในสมรรถนะ (Performance) จะคาดได้ว่ามีการแปรปรวน (Random) ได้มากกว่าตามธรรมชาติของอุปกรณ์ในช่วงเวลาที่ค่อนข้างยาวนาน การตรวจสอบเทียบกับ Passive Standard จะสามารถกำหนดว่าเป็นไปตาม Specification ที่ต้องการรักษาไว้หรือการสอบเทียบที่จะบอกว่าจะต้องประบเทียบใหม่หรือไม่ Specification ที่ผู้ผลิตระบุ (ดูรูปที่ 15) สามารถใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการกำหนดค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนค่าของเครื่องวัด แต่จะต้องยืนยันโดยการวิเคราะห์การควบคุมคุณภาพและข้อมูลการสอบเทียบ โปรดสังเกตว่าค่าความไม่แน่นอนของการวัดมากขึ้นตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC Voltage

DC Voltage [1] [2] [3]

Range	Full Scale	Uncertainty Relative to Cal Stds ± (ppm Reading + ppm Range)			Absolute Uncertainties	
		24 hour TCal ± 1°C	90 day TCal ± 1°C	365 day TCal ± 1°C	365 day TCal ± 1 °C	365 day TCal ± 5 °C
95 % Confidence Level						
200 mV	199.999999	0.7 + 0.5	1.4 + 0.5	2.7 + 0.5	4.5 + 0.5	5.0 + 0.5
2 V	1.9999999	0.5 + 0.2	1.4 + 0.2	2.7 + 0.2	3.0 + 0.2	3.5 + 0.2
20 V	19.999999	0.5 + 0.2	1.4 + 0.2	2.7 + 0.2	3.0 + 0.2	3.5 + 0.2
200 V	199.999999	1.0 + 0.5	2.6 + 0.2	4.7 + 0.2	4.5 + 0.2	5.5 + 0.2
1000 V	1050.00000	2.6 + 0.5	2.6 +0.5	4.0 + 0.5	4.5 + 0.5	5.5 + 0.5
99 % Confidence Level						
200 mV	199.999999	0.8 + 0.6	2.0 + 0.6	3.5 + 0.6	6.0 + 0.6	6.5 + 0.6
2 V	1.9999999	0.6 + 0.25	1.8 + 0.25	3.5 + 0.25	4.0 + 0.25	4.5 + 0.25
20 V	19.999999	0.6 + 0.25	1.8 + 0.25	3.5 + 0.25	4.0 + 0.25	4.5 + 0.25
200 V	199.999999	1.2 + 0.25	3.5 + 0.25	5.2 + 0.25	6.0 + 0.25	7.0 + 0.25
1000 V	1050.00000	1.2 + 0.6	3.5 + 0.6	5.2 + 0.6	6.0 + 0.6	7.0 + 0.6

ตารางที่ ค.8 แสดง DC Voltage Specification ของ Fluke 8508A Reference Multimeter

3. สภาพแวดล้อม (Environment Condition)

3.1 สภาพแวดล้อมห้องปฏิบัติการวัดสามารถเป็นสิ่งหนึ่งของการพิจารณาว่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการสอบเทียบทางไฟฟ้า บ่อยครั้งที่อุณหภูมิแวดล้อมที่มีอิทธิพลมากที่สุด และข้อมูลเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวอย่าง เช่น ตัวต้านทานมาตรฐานจะต้องค้นหาหรือคำนวณประเมิน (อาจดูได้จากใบ Certificate of Calibration ที่แนบมากับตัวต้านทาน) ความแปรเปลี่ยนของความชื้นสัมพัทธ์เช่นกันที่มีผลกระทบต่อค่าของอุปกรณ์ที่ไม่มีการเปิดผนึก (Unseaied) ความดันบรรยากาศก็มีผลต่อการวัดมาตรฐานทางไฟฟ้าบางอย่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความถี่วิทยุ (RF) และไมโครเวฟอุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ตัวอย่างเช่น ตัวลดสัญญาณ (Attenuators), Impedance Standard ที่ขึ้นกับขนาดทางกลที่มีผลต่อค่าของมันและส่วนประกอบอื่นๆ ที่เที่ยงตรง (Precision) อุปกรณ์ที่เกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิ เช่น ตัววัดกำลังไฟฟ้า (power Sensor) สามารถมีผลกระทบจากการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็วที่เกิดจาก เช่น ถือหรือเปิดให้ได้รับความร้อนแสงแดดหรือแหล่งความร้อนอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกันที่จะระวังผลกระทบที่เกิดจากสภาพการใช้งาน เช่น การระบายความร้อน Harmonic Distortion ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเครื่องแตกต่างไปจากค่าใช้เมื่อทำการสอบเทียบเครื่องนั้น เครื่องมือ เช่นน Resistance Standard, Resistive Voltage Divider, Attenuators ที่ความถี่ใดๆ สามารถมีผลกระทบจากความร้อนที่เกิดจากตัวเครื่องเองและหรือเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป เป็นสิ่งสมควรที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องมือทุกตัวได้ทำงานภายในช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ผู้ผลิตกำหนด ดังตัวอย่าง

General Specifications

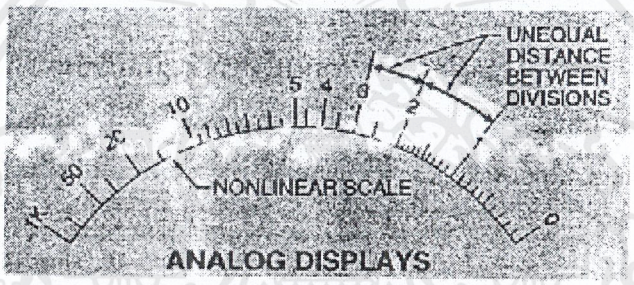
Power	
Voltage	100 V to 120 V ± 10%
	Or 200 V to 240 V ± 10%
Frequency	47 Hz to 63 Hz
Congumption	80 VA
Dimonsions	
Height	88 mm (3.5 inches)
Width	427 mm (16.8 inches)
Depth	487 mm (19.2 inches)
Weight	11.5 kg (25.5 lbs)
Envirenment	
Temperature :	
Operating	0 °C to 5 °C
Specified Operation	5 °C to 40 °C
Calibration (TCal)	20 °C to 25 °C
Factory Cal Temperater	23 °C
Storage	-20 °C to 70 °C
Warm Up	4 hours to full uncertainty
	Specification
Relative Humidity	(non condensing)
Operating	< 90% (5 °C to 40 °C)
Storage	< 95% (0 °C to 70 °C)
Altitude :	
Operating	< 2000 m
Storage	< 12000 m
Vibration and Shock	Complies with MIL-PRF-28800F Class 3
EMC	EN50081-1 Class B, EN55011/22
	EN61326-1:1998, EN50082-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ผลของฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) และสัญญารบกวน (Noise) ในการสอบเทียบสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) อาจมีอิทธิพลต่อค่าปรากฏ (Apparent Value) ของสัญญาณเหล่านี้ และเช่นกันผลเกิดจากการมี Common-mode Signal ในระบบการวัดอาจต้องนำมาคิดประเมินด้วย

4. ค่าระหว่างจุดสอบเทียบ (Interpolation of Calibration Data)

4.1 เมื่อเครื่องวัดที่มีความสามารถในการวัดได้ช่วงกว้าง (Broad Range) ถูกสอบเทียบจะมีองค์ประกอบในทางปฏิบัติและทางเศษฐศาสตร์ ที่จะมีการจำกัดจุดสอบเทียบไว้จำนวนหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นค่าของปริมาณที่จะถูกวัด และ/หรือความถี่ของการวัดอาจแตกต่างไปจากจุดที่สอบเทียบไว้ เมื่อค่าของปริมาณที่วัดนั้นอยู่ระหว่างจุดสอบเทียบ 2 จุด การพิจารณาจะต้องคิดถึงความผิดพลาดของระบบ (System Error) ที่เกิดขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น ความไม่เชิงเส้นของสเกล (ดูรูปที่ ค.12 ประกอบ)



รูปที่ ค.12 การอ่านค่าระหว่างจุด

4.2 ค่าความถี่ของค่าที่ทำการวัดตกอยู่ระหว่างค่าความถี่ที่ทำการสอบเทียบมา 2 ค่า ก็จำเป็นต้องประเมินความไม่แน่นอนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ค่าอยู่ระหว่าง 2 ค่าที่เกิดขึ้นได้เราสามารถดำเนินการต่อไปด้วยความมั่นใจได้ ถ้า

ก. รู้ทฤษฎีการทำงานของเครื่องวัดจากผู้ที่สามารถทำนายคุณสมบัติทางความถี่หรือมีข้อมูลสอบเทียบทางความถี่เพิ่มเติมจากรุ่นอื่นๆ ของเครื่องวัดนั้น

ข. สมรรถนะของเครื่องวัดที่ใช้จริงได้ถูกตรวจด้วยระบบวัดชนิดกวาดความถี่ (Swept Frequency Measurement System) เพื่อทวนสอบว่าไม่เกิดผลกระทบรีโซแนนซ์ (Resonance Effect) หรือการเบี่ยงเบผิดปกติอันเนื่องมาจากการผลิตหรือสมรรถนะที่มีจำกัด

ดูตัวอย่าง AC Voltage Specification ของ DMM รุ่นหนึ่ง (Fluke 8508A) ในตารางที่ ค.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Voltage

Range	Full Scale	Frequency(Hz)	Uncertainty relative to Cal Stds ± (ppm Reading + ppm Range)			Absolute Uncertainties	
			24 hour TCal ± 1°C	90 day TCal ± 1°C	365 day TCal ± 1°C	365 day TCal ± 1°C	365 day TCal ± 5°C
95% Confidence Level							
200 mV	199.9999	1 – 40	80 + 70	120 + 70	120 + 70	160 + 70	165 + 70
		10 – 40	80 + 20	120 + 20	120 + 20	130 + 20	140 + 20
		40 – 100	60 + 20	100 + 20	100 + 20	110 + 20	115 + 20
		100 – 2k	40 + 10	100 + 10	100 + 10	105 + 10	110 + 10
		2k – 10k	60 + 20	100 + 20	100 + 20	105 + 20	135 + 20
		10k – 30k	25 + 30	300 + 40	300 + 40	305 + 40	340 + 40
		30 – 100k	400 + 100	700 + 100	700 + 100	705 + 100	765 + 100
2 V	1.999999	1 – 40	70 + 60	100 + 60	100 + 60	140 + 60	150 + 60
20 V	19.99999	10 – 40	70 + 10	100 + 10	100 + 10	105 + 10	115 + 10
200 V	199.9999	40 – 100	50 + 10	80 + 10	80 + 10	85 + 10	90 + 10
		100 – 2k	30 +10	60 + 10	60 + 10	65 + 10	75 + 10
		2k – 10k	50 + 10	80 + 10	80 + 10	85 + 10	110 + 10
		10k – 30k	100 + 20	200 + 20	200 + 20	205 + 20	220 + 20
		30 – 100k	250 + 100	500 + 100	500 + 100	505 + 100	570 + 100
		100k – 300k	0.15%+0.1%	0.3%+0.1%	0.3%+0.1%	0.3%+0.1%	0.3%+0.1%
		300k – 1M	1% + 0.5%	1%+1%	1%+1%	1%+1%	1%+1%

ตารางที่ ค.9 AC Voltage Specification ของ DMM รุ่น Fluke 8508A

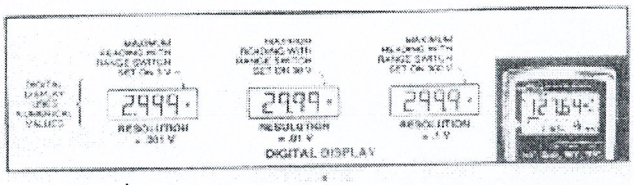
5. ความละเอียดที่อ่านค่าได้ (รีโซลูชั่น : Resolution) ของเครื่องมือวัด

5.1 ขีดจำกัดความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะแสดงค่าเปลี่ยนแปลงน้อยๆ ของปริมาณที่วัดจะเรียกว่า รีโซลูชั่น (Resolution) หรือ "ความผิดพลาดจากตัวเลขเต็ม (Digital Rounding Error) " ถือว่าเป็นองค์ประกอบความไม่แน่นอนของระบบ **(ดูรูปที่ ค.13 ประกอบ)**

5.2 เครื่องวัดจำนวนมากที่แสดงผลเป็นตัวเลขนั้น จะใช้อุปกรณ์ Analogue-to Digital Converter (ADC) ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอะนาล็อก (Anolog Signal) ของสิ่งที่ตรวจวัดไปเป็นรูปแบบที่สามารถแสดงผลเป็นตัวเลขได้ ตัวเลขหลักท้ายสุดที่แสดงจะถูกทำนายเป็นตัวเลขเต็ม (Rounded) ที่แทนค่าตลอดช่วงของสัญญาณอะนาล็อก ค่าผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการนี้จะเป็นค่าจาก -0.5 Digit (หลัก) (มิฉะนั้นเลขสุดท้ายจะต่ำลงไป 1) ถึง +0.5 Digit (หลัก) (มิฉะนั้นเลขสุดท้ายจะสูงขึ้นไป 1) การผิดพลาดจากการแปลงค่า +0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

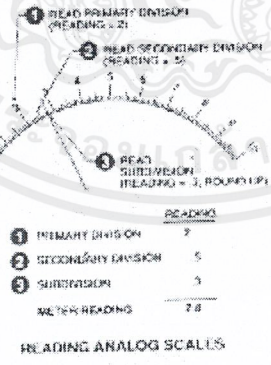
Digit จะเกิดขึ้น ในการนี้ไม่มีทางที่จะรู้ว่าภายในช่วงนี้ค่าที่วัดนั้นค่าจริงอยู่ที่ใด ผลความผิดพลาดจึงถูกสมมุติเป็น 0 ภายในขีดจำกัด ±0.5 Digit



รูปที่ ค.13 ความผิดพลาดจากตัวเลขเต็ม

5.3 ค่าผิดพลาด “Digital Rounding Error” ±0.5 Digit อาจไม่ถูกนำไปใช้กับทุกกรณี และการเข้าใจการทำงานของเครื่องวัดจะจำเป็นถ้าต้องการให้การกำหนดค่าความไม่แน่นอนนั้นถูกต้องเป็นจริง ตัวอย่างเช่น เครื่อง Direct-gating Frequency Counter ที่มีค่า Digital Rounding Error เป็น ±0.1 Digit อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์สุ่ม (Random Relationship) ระหว่างสัญญาณที่วัดกับสัญญาณนาฬิกาภายในเครื่อง เครื่องวัดบางชนิดอาจแสดงผล Hysteresis ที่แม้ไม่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติการแสดงผลของตัวเครื่องเอง แต่อาจมีผลในความไม่แน่นอนอื่นๆ ถึงหลาย Digit

5.4 ใน Analog Instrument ผลของรีโซลูชั่น(Resolution) จะถูกประเมินโดยทางปฏิบัติว่า สามารถอ่านตำแหน่งของเข็มชี้บนสเกลได้ดีเพียงใด ในบางกรณีเลขหลักสุดท้าย (Last Digit) ที่ถูกบันทึกจริงจะมีค่าความไม่แน่นอนอย่างน้อย ± 0.5 Digit การมีสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าที่เป็นเหตุให้ค่าอ่านจากเครื่องวัดเปลี่ยนขึ้นลงนั้นจะประเมินโดยการใช้ค่า รีโซลูชั่นที่สามารถใช้ได้ อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่จะประมาณตำแหน่งค่ากลางของการแกว่งตัวของเข็มได้ดีด้วยสายตา**(ดูรูปที่ ค.14 ประกอบ)**

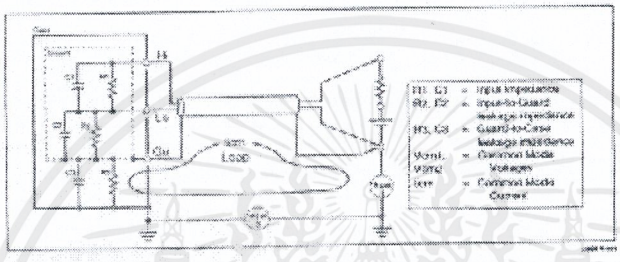


รูปที่ ค.14 ผลของรีโซลูชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตำแหน่งการวางเครื่องวัด

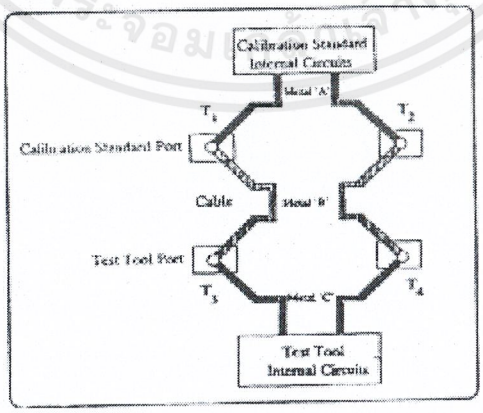
6.1 การจัดวางเครื่องวัดอันใดอันหนึ่งโดยคำนึงถึงเครื่องวัดอื่นๆ และความสัมพันธ์กันของเครื่องวัดเหล่านี้กับระนาบพื้นโลกสามารถมีความสำคัญในการวัดบางอย่าง ดังนั้นการจัดวางที่ต่างกันระหว่างการสอบเทียบ และลำดับการใช้เครื่องมืออาจเป็นต้นกำเนิดความผิดพลาดของระบบ ผลกระทบหลักๆคือกระแสรั่วลงดิน(Earth) การรบกวนจากกระแสวงรอบ(Loop Current) **(ดูรูปที่ ค.15 ประกอบ)** และการรั่วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการวัดค่าหนี่ยวนำจำเป็นต้องกำหนดรูปแบบการต่อสายวัด (Lead) และต้องตระหนักถึงผลที่จะเกิดได้จากระนาบพื้นโลกหรือวัสดุแม่เหล็ก(Ferromagnetic Material) ที่อยู่ใกล้เคียง ผลของความร้อนที่มีต่อกันระหว่างเครื่องวัดก็อาจจำเป็นต้องนำมาพิจารณาด้วย



รูปที่ ค.15 แสดงการรบกวนจากกระแสวงรอบ (Loop Currents : Icm) และวิธีป้องกันด้วย Guard Connection

7. แรงดันไฟฟ้าจากความร้อน(Thermoelectric Voltage)

ถ้าตัวนำไฟฟ้าพาดผ่านบริเวณที่มีความร้อนจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างบริเวณความร้อนนั้น สิ่งนี้รู้จักกันในชื่อ Seebeck Effect และเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าจากความร้อน(Thermoelectric Voltage) ที่เกิดขึ้นนี้ สามารถเป็นต้นเหตุความผิดพลาดในบางระบบการวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดค่า DC Voltage ต่ำๆ **(ดูรูปที่ ค.16 ประกอบ)**



รูปที่ ค.16 แสดงตัวนำไฟฟ้าพาดผ่านบริเวณที่มีความร้อน T1 , T2 , T3, T4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1 เราสามารถลดค่านี้ให้มีน้อยที่สุด โดยการออกแบบการต่อกันโดยมีความเหมือนกันทางความร้อน(Thermally Symmetrical) เพื่อให้ Seebeck Voltage ที่เกิดกับสาย (Lead) เส้นหนึ่งถูกหักล้างด้วยแรงดันที่เหมือนกันและมีขั้วตรงข้ามกันในสาย (Lead) อีกเส้นหนึ่ง ในบางสภาวะ เช่น ac/dc Transfer Measurement ขั้วของแหล่งจ่ายไฟจะกลับขั้วและค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์จะคิดจากการทำการวัดค่า DC จำนวน 2 ชุด

7.2 โดยทั่วไปจะประเมินความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจาก Thermal emf นี้เป็น Type B

8. โหลดดิ้ง (Loading) และความต้านทาน (Impedance) ของสายวัด

8.1 ความต้านทานขาเข้า (Input Impedance) ที่มีอยู่จำนวนหนึ่งในโวลมิเตอร์ ออสซิลโลสโคป และเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าอื่นๆ บางครั้งจะเป็นภาระ (Load) ต่อวงจรที่ต่อเพื่อวัดค่า และเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาดที่มีนัสำคัญ การแก้ค่าโดยชดเชยอาจทำได้ถ้ารู้ค่า Impedance โดยเฉพาะในบาง Multi-function Calibrator สามารถสร้าง Inductive Output Impedance ขึ้นเล็กน้อย หมายความว่า เมื่อต่อกับ Capacitive Load จะส่งผลให้เกิด Resonance ที่อาจทำให้แรงดันขาออกเพิ่ม เมื่อเทียบกับค่าที่เปิดวงจร (Open-Circuit)

8.2 ค่า Impedance และความยาวของสายวัดที่มีอยู่จำนวนหนึ่งสามารถส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของระบบ (Systematic Error) ในการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ใดๆ การใช้การต่อแบบ 4 ขั้ว จะช่วยลดให้เหลือน้อยที่สุดได้ในการวัดค่า DC และ AC บางอย่าง

8.3 การวัดค่าประจุ (Capacitance) คุณสมบัติ Inductive ของสายวัดอาจมีความสำคัญโดยเฉพาะกับการวัดค่าเหนี่ยวนำ (Inductive) ค่าประจุระหว่างสายวัดที่ต่อก็อาจมีความสำคัญ

9. ความผิดพลาดและความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เข้ากันในการวัดระดับคลื่นความถี่วิทยุ(RF Mismatch)

9.1 ที่ความถี่วิทยุและไมโครเวฟ ความไม่เข้ากัน Mismatch ของชิ้นส่วนต่อคุณสมบัติทาง impedance ของสายส่งสัญญาณของระบบวัด สามารถเป็นหนึ่งในแหล่งผิดพลาดที่สำคัญที่สุดและเป็นส่วนประกอบของความไม่แน่นอนในการวัดกำลังและการลดทอนของสัญญาณนี่เป็นเพราะไม่รู้ค่า The Phases of Voltage Reflection Coefficients ทำให้ไม่สามารถใช้ค่าแก้ไขได้

9.2 ในการวัดกำลัง ค่ากำลัง Po1 ค่ากำลัง Po1 ที่จะถูกดูดซับโดยโหลดจะเท่ากับ The Characteristic Impedance of the Transmission Line ดังแสดงให้เห็น ความสัมพันธ์กับค่ากำลังจริง PI1 ที่ถูกดูดซับใน wattmeter terminating the line ด้วยดังสมการ

$$P_o = \frac{P_l}{1-|\Gamma_L|^2}\left(1-2|2\Gamma_G||T_L|\cos\phi+|\Gamma_G|^2|\right)^T \qquad \text{(ค.18)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย ϕ คือ The Relative Phase of The Generator and load Voltage Reflection Coefficients Γ_G and Γ_L เมื่อ Γ_G และ Γ_L L มีค่าน้อย จะมีสมการเป็น

$$P_o = \frac{P_l}{1-|\Gamma_L|^2}\left(1-2|\Gamma_G||\Gamma_L|\cos\phi\right) \qquad \text{(ค.19)}$$

9.3 เมื่อไม่รู้ค่า φ การระบุ Absorbed Power สามารถมีขีดจำกัด E

$$P_0(limit) = \frac{P_L}{1-|T_L|^2}\left(1+2|\Gamma_G||\Gamma_L|\right) \qquad \text{(ค.20)}$$

9.4 การคำนวณค่าผิดพลาดได้ 1-$(\Gamma_L)^2$ และมีผลต่อCalibration Factor ในขณะที่ขีดจำกัด Mismatch Uncertainty เป็น $+-2|\Gamma_L||\Gamma_G|$ เพราะ a cosine function มีผลต่อ Probability Distributionของ Uncertainty ,Harris and Warner แสดง Distribution เป็น U-Shaped ด้วย Standard Deviation

$$U(mismatch) = \frac{2|\Gamma_G||\Gamma_L|}{\sqrt{2}} = 1.414\Gamma_G\Gamma_L \qquad \text{(ค.21)}$$

9.5 เมื่อการวัดประกอบด้วย The Attenuation of a Two Port Component แทรกระหว่าง a Generator กับโหลดที่ไม่เข้ากันอย่างสมบูรณ์กับ Transmission Line, Harris and Warner ได้แสดงว่า Standard Deviation of Mismatch (M) ระบุเป็น dB

9.6 ค่าΓ_LและΓ_G ที่ใช้ในสมการ 4 และ5 และ the Scattering Coefficient ที่ใช้ในสมการ 5 นั้นโดยตัวมันเองจะมีความไม่แน่นอนเพราะมันถูกคำนวณมาจากการวัด ความไม่แน่นอนนี้ถูกพิจารณาเมื่อคำนวณความไม่แน่นอนจาการไม่เข้ากันและได้รับการแนะนำให้ทำโดยการบวกค่าใน Quadrature with the Measured or Derived Value of the Reflection Coefficient ตัวอย่างเช่นถ้าวัดค่า Γ_L ได้ 0.03 +- 0.02 ดังนั้น ค่าΓ_L ที่ควรใช้คำนวณคือ $\sqrt{0.03^2+0.02^2} = 0.036$

10. Directivity

10.1 เมื่อทำการวัด Voltage Reflection Coefficient (VRC) ที่ความถี่วิทยุและไมโครเวฟค่า The Finite Directivity of the Bridge หรือ Reflectometer จะเพิ่มค่าความไม่แน่นอนในค่า VRC ถ้ารู้แต่ขนาดไม่รู้เฟสของ The Directivity Component ค่าความไม่แน่นอนจะเท่ากับ Directivity ระบุเป็นเชิงเส้นตัวอย่างเช่น a Directivity of 30 dB มีค่าเท่ากับความไม่แน่นอน +-0.0316 VRC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2 ตาม 9.6 ที่กล่าวมา ขอแนะนำว่าความไม่แน่นอนของการวัดจาก Directivity จะถูกนำมาคำนวณโดยการบวกค่าวัดใน Quadrature กับความไม่แน่นอนแบบปริมาณเชิงเส้น ตัวอย่างเช่นถ้าค่าวัด The Measured Directivity of a Bridge เป็น 36 dB (0.016) และมีค่าความไม่แน่นอน + 8dB – 4dB (+-0.01) ดังนั้นค่า Directivity ที่จะใช้คือ $\sqrt{0.016^2 + 0.01^2} = 0.019$ (34.4dB)

11.Test Port Match

11.1 The Test Port Match of a Bridge or Reflectometer ที่ใช้กับ Reflectometer Coefficient Measurement จะเพิ่มความผิดพลาดในการวัด VRC เนื่องจาการสะท้อนอีกครั้ง (Re-reflection) ความไม่แน่นอน u(TP) ถูกคำนวณจาก u(TP) = TP โดย TP คือ The Test Port Match ระบุเป็น VRC และ $\sqrt{x}$ เมื่อDirectional Coupler ถูกใช้ตรวจดู Incident Power ในการสอบเทียบ Power Meter มันจะเป็น Effective Source Match of the Coupler ที่บอกค่า Γ_G ตามที่เอ่ยในสมการ 9 ด้วยค่าจาก 9.6 และ 10 ค่าวัด Test Port Match จะมีค่าความไม่แน่นอนที่จะต้องนำมาคำนวณ โดยการใช้ Quadrature Summation

12. RF Connector Repeatability

การขาดความสามารถวัดซ้ำของ Coaxial Pair Insertion Loss สู่ Lesser Extent Voltage และ Reflection Coefficient เป็นในการสอบเทียบอุปกรณ์ใน Coaxial Line Measurement System และในการใช้ในระบบอื่น แม้ว่าการต่ออุปกรณ์และการเอาออกจะสามารถประเมินความสามารถวัดซ้ำของคู่ขั้วต่อที่ใช้ได้ แต่คู่ขั้วต่อเหล่านี้เป็นแนวทางสำหรับขั้วต่อแบบอื่นๆที่ใช้ นอกเหนือไปจากที่มีในห้องปฏิบัติการวัดส่วนใหญ่ เอกสารอ้างอิง จัดหาคำแนะนำเกี่ยวกับสมบัติและการใช้ Coaxial Connectors Including รวมทั้งการแนะนำเกี่ยวกับ Repeatability of the Insertion Loss of Connector Pairs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEC Publication 60-2, 1994, High Voltage Test Techniques-Part 2 : Measuring System

[2] Kuffel, E. and Zaengl, W.S., High Voltage Engineering Fundamental, Pergamon Press, Oxford, 2st ed., 1984

[3] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์. การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539

[4] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร

[5] นรเศรษฐ พัฒนเดช, เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2548

[6] นรเศรษฐ พัฒนเดช,เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคนิคการวัดและการทดสอบทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้