

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดทดลองการแพร่กระจายของเสิร์จในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
**Experimental Kit for Surge Distribution in High Voltage
Transformer Windings**



นาย วิรุทธ ปานทอง
นาย เสกสรรค์ งามศรีตระกูล
นาย สมพร เนติขจร
นาย อุดม ปัญญารัตนะ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62035
วัน,เดือน,ปี 27 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองการแพร่กระจายของเสิร์จในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
Experimental Kit for Surge Distribution in High Voltage Transformer Windings

โดย

นาย วีรยุทธ	ปานทอง	44010468
นาย เสกสรรค์	งามศรีตระกูล	44010495
นาย สมพร	เนติขจร	44010505
นาย อุดม	ปัญญารัตน์	44010618



อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดลองการแพร่กระจายของเล็ร์จในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

Experimental Kit for Surge Distribution in High Voltage Transformer Windings

ผู้จัดทำ

นาย วีรยุทธ	ปานทอง	44010468
นาย เสกสรรค์	งามศรีตระกูล	44010495
นาย สมพร	เนติขจร	44010505
นาย อุดม	ปัญญารัตน์	44010618



(Handwritten signature)

(ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองการแพร่กระจายของเสิร์จในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

นาย วีรยุทธ	ปานทอง	44010468
นาย เสกสรรค์	งามศรีตระกูล	44010495
นาย สมพร	เนติขจร	44010505
นาย อุดม	ปัญญารัตน์	44010618

ผศ.ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร
อาจารย์ที่ปรึกษา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาถึงการแพร่กระจายของเสิร์จในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้ชุดจำลองขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวจำเป็นต้องสร้างเครื่องกำเนิดเสิร์จแรงดันต่ำ ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้สร้างแรงดันเสิร์จหรือเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แรงดันต่ำ ที่สามารถปรับความชันหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ได้ แล้วจ่ายแรงดันเสิร์จเข้าไปในชุดจำลองขดลวดหม้อแปลงชนิด Disc winding เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายของเสิร์จในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

Experimental Kit for Surge Distribution in High Voltage Transformer Windings

Mr.Weerayut	Parntong
Mr.Seksun	Ngamsritrakul
Mr.Somporn	Netikajorn
Mr.Udom	Panyaruttan

Advisor
Assistant Prof..Dr.Anantawat Kunakorn
Department of electrical engineering
Year 2004

ABSTRACT

The thesis presents studies of surge distribution along a transformer winding using transformer winding experimental kit. A low voltage surge generator which can vary steep-front time is designed and constructed. The surges, then, are injected to a model representing a disc type transformer winding in order to study characteristics of surge propagation.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญรูปภาพ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	2
1.2 ขอบเขตของการทำโครงการ	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยโครงการ	2
1.4 การพัฒนาโครงการในอนาคต	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	4
2.1 จุดกำเนิดของ Steep-Fronted Surge	4
2.2 แรงดันเกินชนิดต่างๆ	4
2.3 การพันขดลวด	7
2.4 ผลกระทบของความถี่ที่มีผลต่อขดลวด	8
2.5 ค่าเริ่มต้นการกระจายของเสิร์จ	9
2.6 Transformer Capacitance	12
2.7 Transformer Model	12
2.8 Traveling Wave (การเดินทางของคลื่น)	13
บทที่ 3 วงจร Surge Generator และ การทำงาน	16
3.1 หลักการทำงานของ Low voltage surge generator	16
3.2 Power Supply	16
3.3 การออกแบบวงจร Astable Circuit	16
3.4 Monostable Circuit	18
3.5 วงจร Discharge pulse generator	19
3.6 วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge	20
บทที่ 4 ผลการทดลอง	21
บทที่ 5 สรุป	72
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	รูปคลื่นแรงดัน Impulse ชนิดต่างๆ	5
รูปที่ 2.2	รูปคลื่นแรงดัน Impulse สวิตซ์	6
รูปที่ 2.3	ลักษณะสำคัญของช่วงเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	7
รูปที่ 2.4	รูปการพันขดลวด	7
รูปที่ 2.5	ขดลวดที่นำมาใช้ในการวัด	8
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Impedance กับ Frequency ของขดลวด	8
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Impedance กับ Frequency ของขดลวด	9
รูปที่ 2.8	วงจรสมมูลของ Single layer Coil ขณะมีเกิดแรงดันเสิร์จในขดลวด	9
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันกับขดลวดของแต่ละ α	11
รูปที่ 2.10	วงจรสมมูลในช่วงเวลาสั้นๆ	13
รูปที่ 2.11	วงจรสมมูลในช่วงเวลาปกติ	13
รูปที่ 2.12a	ระบบสายส่งสองสาย	13
รูปที่ 2.12b	การเกิดค่า L และ C ของสายส่ง	13
รูปที่ 3.1	วงจรการต่อ Astable ของ NE555N	17
รูปที่ 3.2	การต่อวงจรใช้งาน Astable ของ NE555N	17
รูปที่ 3.3	TTL 74123 in-out	18
รูปที่ 3.4	Truth Table ของวงจร Monostable	18
รูปที่ 3.5	วงจร Monostable ที่สร้าง Trigger pulse	19
รูปที่ 3.6	วงจร Discharge pulse generator	20
รูปที่ 3.7	วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge	20
รูปที่ 4.1	กรณีวงจรมีค่า L และ C_g	21
รูปที่ 4.2	กรณีวงจรมีค่า L, C_g และ C_s	21
รูปที่ 4.3	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s กรณีมี L และ C_g	26
รูปที่ 4.4	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 500 ns กรณีมี L และ C_g	31
รูปที่ 4.5	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s กรณีมี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 150 pF	36
รูปที่ 4.6	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 500 ns กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 150 pF	41
รูปที่ 4.7	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 3200 pF	46

รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 500 ns กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 3200 pF	51
รูปที่ 4.9	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Steep-Fronted Surge ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s กรณีมี L และ C_g	56
รูปที่ 4.10	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Steep-Fronted Surge ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 150 pF	61
รูปที่ 4.11	เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Steep-Fronted Surge ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 3200 pF	66
รูปที่ 4.12	การกระจายที่ Disc ต่างๆ ของผล Simulation ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s	67
รูปที่ 4.13	การกระจายที่ Disc ต่างๆ ของผลการทดลอง Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s	68
รูปที่ 4.14	การกระจายที่ Disc ต่างๆ ของผล Simulation ที่หน้าคลื่น 500 ns	68
รูปที่ 4.15	การกระจายที่ Disc ต่างๆ ของผลการทดลอง Function Generator ที่หน้าคลื่น 500 ns	69
รูปที่ 4.16	การกระจายที่ Disc ต่างๆ ของผล Simulation ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s ของแรงดันอิมพัลส์	70
รูปที่ 4.17	การกระจายที่ Disc ต่างๆ ของผลการทดลอง Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s ของแรงดันอิมพัลส์	70

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ประเภทขดลวดใน Power system เช่น ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีผลทำให้เกิดความเสียหาย สามารถระบุสาเหตุได้ว่าส่วนหนึ่งมาจากการเกิด Faults ของฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวด ซึ่งการเกิด Faults จะเกิดตรงบริเวณส่วนปลายของขดลวดเป็นส่วนใหญ่ และอีกส่วนหนึ่งจะมาจากการเกิด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงดัน Steep-Fronted Transient ที่ฉนวนซึ่งกั้นระหว่างขดลวด โดยแรงดันดังกล่าวจะเกิดจากการตัดต่อของ Circuit Breaker ซึ่งเป็นผลให้เกิดความเครียดระหว่างขดลวดเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ฉนวนไม่สามารถทนได้ ส่วนในหม้อแปลงแรงดันต่ำมักจะ ไม่ค่อยเกิดการชำรุดเสียหายของฉนวนระหว่างรอบของขดลวดตัวนำ เว้นแต่จะเกิดมีความดันทางกล (Stress) อย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากการลัดวงจรภายนอกทำให้ฉนวนแตกหรือแยกตัว ส่วนหม้อแปลงแรงดันสูงซึ่งต่ออยู่กับสายส่งแรงดันสูงแบบขึงสายในอากาศจะมีโอกาสถูกแรงดันแบบอิมพัลส์ (Impulse Voltage) ซึ่งสูงชัน แรงดันนี้มีขนาดค่ายอดเป็นหลายเท่าของแรงดันกำหนดของระบบ ค่าความทนของฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวดต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจาก Steep-Fronted Surge ในปัจจุบันยังไม่มีกำหนดเป็นมาตรฐานที่แน่นอน และในการทดสอบเรื่อง Steep-Fronted Surge เช่น แรงดันที่ใช้จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ใช้จริง แต่ข้อมูลที่ได้อีกก็สามารถเพียงพอต่อการที่จะประเมินดูแนวโน้มของผลกระทบที่เกิดจาก Steep-Fronted Surge ได้ ในการศึกษาเรื่อง Steep-Fronted Surge สิ่งแรกที่ต้องทำความเข้าใจก็คือ คุณสมบัติของ Steep-Fronted Surge ถ้าเกิดขึ้นแล้วมีผลอย่างไรต่อระบบ การทดลองในระบบจริงเป็นเรื่องยุ่งยาก ดังนั้นจึงใช้ชุดทดลอง R,L,C ต่อกันเพื่อที่จะทำเป็นรูปแบบจำลองของระบบ เช่น ระบบสายส่งแบบจำลองของขดลวดมอเตอร์ แบบจำลองของ Generator แบบจำลองของขดลวดหม้อแปลง ขดลวดของอุปกรณ์ใน Power system เมื่อจำลองรูปแบบออกมาแล้วจะเหลือแต่ R,C ซึ่งค่า R (ความต้านทาน) มีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น โครงงานประกอบปริญญาโทฉบับนี้จึงสร้างชุดจำลอง Steep-Fronted Surge ที่สามารถปรับความชันหน้าคลื่นได้ โดยมีขนาดแรงดัน 5 Vdc เพื่อจ่ายเข้าสู่ชุดจำลองขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วทำการศึกษาการกระจายของรูปคลื่นที่ความชันหน้าคลื่นต่างๆของขดลวด จากนั้นทำการเปรียบเทียบกันที่ความชันหน้าคลื่นต่างๆ โดยเมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับชุดจำลองขดลวดจะสามารถเห็นแนวโน้มของผลกระทบจาก Steep-Fronted Surge ต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เพื่อหาแนวทางป้องกันในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษา และสร้างชุดจำลองดังกล่าวพร้อมทั้งได้ทำการทดลอง เพื่อที่จะศึกษา แนวโน้มของความรุนแรงที่มีต่อระบบ โดยเฉพาะกับขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวถึงใน ปรินูญานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งได้ดังนี้

- บทนำ เนื้อหาโดยย่อของแต่ละบท วัตถุประสงค์ ขอบเขตการทำโครงการ การใช้งานในอนาคต และประโยชน์ที่ได้จากโครงการนี้
- ทฤษฎีพื้นฐาน เกี่ยวกับการกระจายของแรงดัน Surge รูปแบบจำลองของขดลวดหม้อแปลง
- การสร้างวงจร Surge Generator พร้อมทั้งอธิบายขั้นตอนการสร้างแต่ละส่วนของวงจร
- ผลการทดลองของ Surge Generator ที่ความชันหน้าคลื่นต่างๆ
- สรุปผล และวิจารณ์ผลการทดลอง พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำโครงการ

1. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของ Steep-Fronted Surge ที่มีต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งในโครงการนี้จะ ศึกษาเฉพาะ ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

2. ขอบเขตของการทำโครงการ

สร้างชุดจำลองขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า และชุดจำลอง Steep-Fronted Surge ที่สามารถปรับความ ชันหน้าคลื่นได้ โดยมีขนาดแรงดัน 5 Vdc เพื่อจ่ายเข้าสู่ชุดจำลองขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วทำการศึกษาการ กระจายของรูปคลื่นที่ความชันหน้าคลื่นต่างๆ ของขดลวด แล้วทำการเปรียบเทียบกันที่ ความชันหน้าคลื่น ต่างๆ

3. ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยโครงการ

- เห็นแนวโน้มของผลกระทบจาก Steep-Fronted Surge ต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เพื่อหาแนว ทางป้องกันในอนาคต
- ทำให้ผู้สนใจเรื่อง Steep-Fronted Surge เมื่ออ่านปรินูญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว มีความเข้าใจมาก ขึ้น และสามารถนำบางส่วนจากปรินูญานิพนธ์ไปใช้ประกอบการทำการวิจัยได้

4. การพัฒนาโครงการในอนาคต

จากโครงการนี้สามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบในการทำการวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับเรื่อง Steep-Fronted Surge ได้ และอาจเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูงเพื่อมีความใกล้เคียงมากขึ้น

5. ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ทำการ Simulaion วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วบันทึกรูปคลื่นเพื่อศึกษาก่อนที่จะทำการสร้างชุดจำลองของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า
- สร้างชุดจำลองของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า
- สร้างชุดกำเนิด Steep-Fronted Surge ที่สามารถปรับความชันหน้าคลื่นได้
- ทำการทดลอง โดยจ่าย Steep-Fronted Surge ให้กับชุดจำลองขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า
- ทำการวัดรูปคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ ของชุดจำลองขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า
- นำรูปคลื่นที่ได้มาทำการวิเคราะห์ โดยใช้การเขียนกราฟเปรียบเทียบในแต่ละความชันของรูปคลื่น

6. เปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงการ

ข้อดี

- มีความปลอดภัยในการทดลอง เนื่องจากใช้แรงดันต่ำคือ 5 Vdc
- เคลื่อนย้ายสะดวก เนื่องจากมีขนาดเล็ก

ข้อเสีย

- การกระจายของแรงดันเสิร์จในขดลวดแรงดันต่ำกับแรงดันสูงต่างกัน ทำให้เมื่อเปรียบเทียบชุดทดลองกับขดลวดหม้อแปลงจริง

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 จุดกำเนิดของ Steep-Fronted Surge

ปรากฏการณ์ Lightning หรือ Switching เกิดจาก Steep-Fronted ของแรงดัน Transient ที่มีการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอสูงในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอนี้จะทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าในส่วนของขดลวด มีค่าสูงขึ้นมากกว่าในช่วงเวลาของการทำงานปกติ การศึกษาถึงเรื่องนี้ก็เพื่อที่จะประเมินผลความทนทานของฉนวนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้า สิ่งที่ต้องรู้ก็คือขนาดและการแปรผันตามเวลาของความเครียดสนามไฟฟ้า

การกระจายของแรงดันในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม โดยใช้ Lightning Transient ที่เป็นรูปคลื่น Impulse ตามมาตรฐาน IEC คือ 1.2/50 μ s จ่ายเข้าไปในขดลวด โดยทั่วไปแล้ว เป็นที่ยอมรับว่าภายใต้เงื่อนไขที่รูปหน้าคลื่นของแรงดัน Transient มีความชัน มากจะเป็นการพิจารณาของ Switching Transient มากถึง 80-90 % ของการเกิดแรงดัน Transient ขึ้น ซึ่งอาจปรากฏอยู่ในเส้นลวดของคอยล์ นอกจากนี้ โดยปกติแล้วถ้าความชันหน้าคลื่นของแรงดัน Transient มีค่าคงที่แล้วการกระจายของแรงดันเสร็จภายในขดลวดก็จะกระจายอย่างสม่ำเสมอด้วย

2.2 แรงดันเกินชนิดต่างๆ

แรงดันที่มีค่ามากกว่าแรงดันสูงสุด (V_m) เราเรียกว่าแรงดันเกิน (Overvoltage) หรือบางครั้งก็เรียกว่า แรงดันผิดปกติ (Abnormal Voltage) แต่แรงดันผิดปกติจะรวมถึงแรงดันที่ต่ำจากแรงดันอย่างมากด้วย

แรงดันเกินมีหลายประเภท ซึ่งแบ่งได้เป็น แรงดันเกินแบบเสถียร (Surge Overvoltage) และแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) โดยในแรงดันเกินแบบเสถียร ยังแบ่งเป็นแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) และ แรงดันเกินสวิตซ์ (Switching Overvoltage) ส่วนแรงดันเกินชั่วคราวยังแบ่งเป็น แรงดันเกินความถี่ฮาร์มอนิกและแรงดันเกินความถี่ปกติ นอกจากนี้ยังอาจแยกประเภทของแรงดันเกินตามแหล่งที่เกิด เช่น แรงดันเกินจากภายในระบบและแรงดันเกินภายนอกระบบ

เสถียร (Surge) มีลักษณะเป็นคลื่นจร (Traveling Wave) ส่วนคำว่า อิมพัลส์ (Impulse) นั้น มักใช้เรียกแรงดันเกินที่สร้างขึ้นในห้องทดลองเพื่อเลียนแบบเสถียร เสถียรฟ้าผ่าเกิดจากการที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบซึ่งมีสาเหตุมาจากนอกระบบ ช่วงระยะเวลาที่เกิดขึ้นสั้นมาก อยู่ในช่วง ไมโครวินาที ส่วนเสถียรสวิตซ์ซึ่งจะเกิดจากการเปิดปิดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้เกิดภาวะการเปลี่ยนแปลงชั่วคราว (Transient) อันเนื่องมาจากค่าคงที่ต่างๆ ของระบบ ซึ่งมีสาเหตุมาจากภายในระบบเอง ช่วงเวลาที่เกิดจะยาวกว่าโพลไฟฟ้าผ่า คืออยู่ในช่วง มิลลิวินาทีกับคิกฟ้าผ่าที่เคยเรียกกันว่า Lightning Arrester มาเป็นเวลานานก็ได้รับการเปลี่ยนชื่อใหม่เป็น กับ

ดักเสิร์จ (Surge Arrester) โดยคณะกรรมการ IEC เนื่องจากเห็นว่านอกจากจะป้องกันเสิร์จฟ้าผ่าแล้วยังใช้ป้องกันการเกิดเสิร์จสวิตซ์อีกด้วย

แรงดันเกินชั่วคราว หมายถึง แรงดันเกินที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของระบบ (50 Hz) หรือเป็นความถี่ฮาร์มอนิกของมัน ช่วงเวลาที่เกิดขึ้นมักอยู่ในช่วงมิลิวินาที ไปจนถึงวินาที ขึ้นอยู่กับความไวของระบบควบคุม

แรงดันอิมพัลส์ของรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นจะประกอบไปด้วยรูปคลื่นพื้นฐานสามแบบ คือ

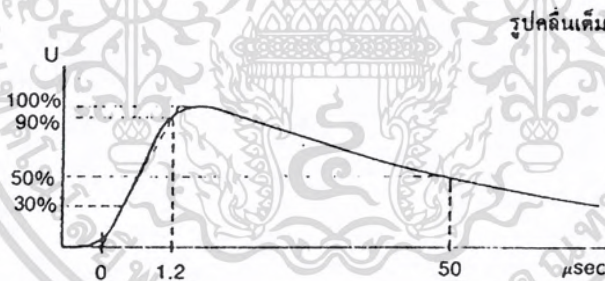
1. คลื่นเต็ม (Full wave)
2. คลื่นตัด (Chopped wave)
3. หน้าคลื่น (Front-of-wave)

รูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งนิยมเรียกกันว่า แรงดันอินพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning impulse voltage) จะแบ่งออกเป็นสามแบบด้วยกันคือ

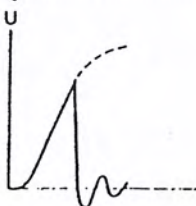
1. รูปคลื่นเต็ม
2. รูปคลื่นตัด

รูปคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น
รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น

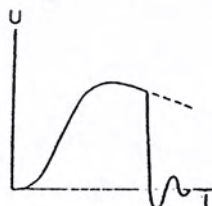
3. รูปคลื่นสวิตซ์



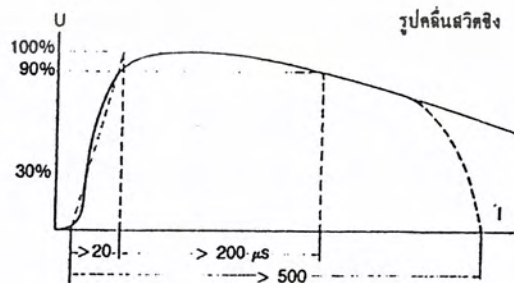
รูปคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น



รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น



รูปคลื่นสวิตซ์



รูป.2.1 รูปคลื่นแรงดัน Impulse ชนิดต่างๆ

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ขนาดของแรงดัน (Amplitude) ซึ่งวัดจากค่ายอดของแรงดัน (Peak voltage) ในกรณีที่รูปคลื่นมีการกระเพื่อมเกิดออสซิลเลชัน หรือ Overshoot ซึ่งยอมให้เกิดขึ้นได้ $\pm 5\%$ ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดของแรงดัน

2. เวลาช่วงหน้าคลื่น T1 และเวลาช่วงหลังคลื่น T2 โดย T1 คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด และ T2 คือ ช่วงเวลานับตั้งแต่แรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอด จนกระทั่งขนาดของแรงดันลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่ายอด (time to half-value)

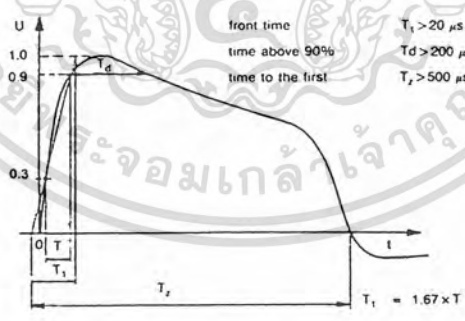
3. ขั้ว (Polarity) ของแรงดันจะเป็นแบบ Positive หรือ Negative ก็ได้เมื่อเทียบกับ Reference earth (นิยมใช้ Negative voltage)

แรงดันอิมพัลส์ชนิดรูปคลื่นตัดอาจเกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันรูปคลื่นเต็มให้กับหม้อแปลงแล้วฉนวนทนไม่ได้เกิดการสปาร์กผ่านจากส่วนที่มีศักดาไฟฟ้าสูงๆ ไปส่วนที่มีศักดาไฟฟ้าต่ำกว่า

การทดสอบความคงทนของฉนวนหม้อแปลงด้วยรูปคลื่นตัดนี้จะเกิดความเค้นขึ้นกับฉนวนภายในเป็นอย่างมาก ลักษณะที่เป็นอันตรายของรูปคลื่นชนิดนี้ก็คือ ความชันของรูปคลื่นซึ่งมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน และขนาดของแรงดันค่ายอดมีค่าสูงกว่ารูปคลื่นเต็มกว่าเท่าตัว

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิ่งมีลักษณะแตกต่างไปจากรูปคลื่นฟ้าผ่า กล่าวคือ จะมีลักษณะของเวลาช่วงหน้าคลื่น T1 ยาวกว่ามาก

แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งซึ่งเป็นแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเอง เช่น เกิดจากการปลด-สับเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชนิดนี้ก็เพื่อต้องการตรวจดูว่าหม้อแปลงสามารถทนต่อแรงดันเกินที่มีช่วงเวลายาวนานขนาดนี้ได้หรือไม่ และจะใช้ทดสอบกับหม้อแปลงที่มีพิคแรงดันสูงกว่า 115 kV



รูป 2.2 รูปคลื่นแรงดัน อิมพัลส์สวิตชิ่ง

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและรูปคลื่นตัด

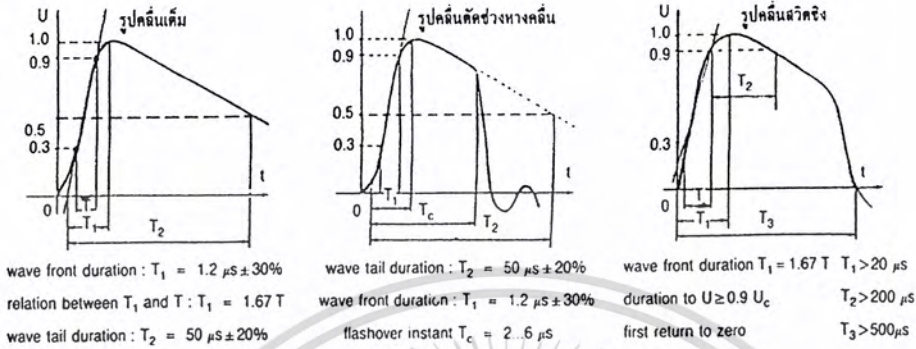
เวลาช่วงหน้าคลื่น	$T1 = 1.2\mu s \pm 30\%$
เวลาช่วงหลังคลื่น	$T2 = 50 \mu s \pm 20\%$
ค่ายอดของแรงดัน	$Um = \pm 3\%$

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 \geq 20 \mu\text{s}$

เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 \geq 200 \mu\text{s}$

เวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนลดลงเหลือศูนย์ $T_3 \geq 500 \mu\text{s}$

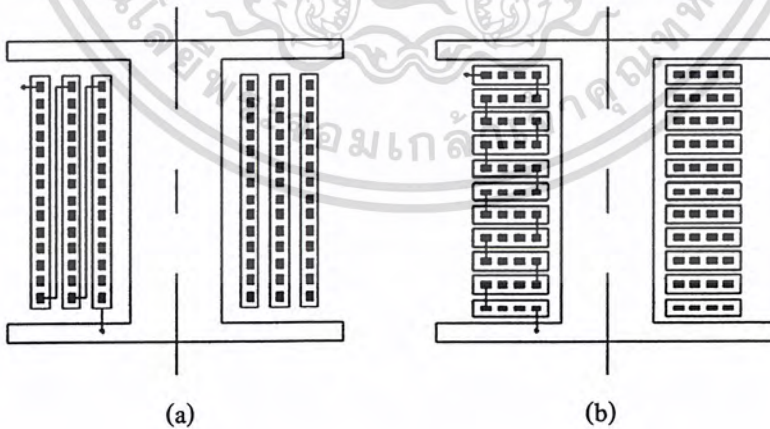


รูป 2.3 ลักษณะสำคัญของช่วงเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

2.3 การพันขดลวด

การพันขดลวดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- Layer winding ลักษณะการวางขดลวดจะวางขนานกับแกนเหล็กชั้นกันไปเรื่อยๆ โดยแต่ละชั้นจะมีจำนวนคั่น
- Disc winding ลักษณะการวางขดลวดจะวางตั้งฉากกับแกนเหล็กชั้นกันไปเรื่อยๆ โดยแต่ละชั้นจะมีจำนวนคั่น

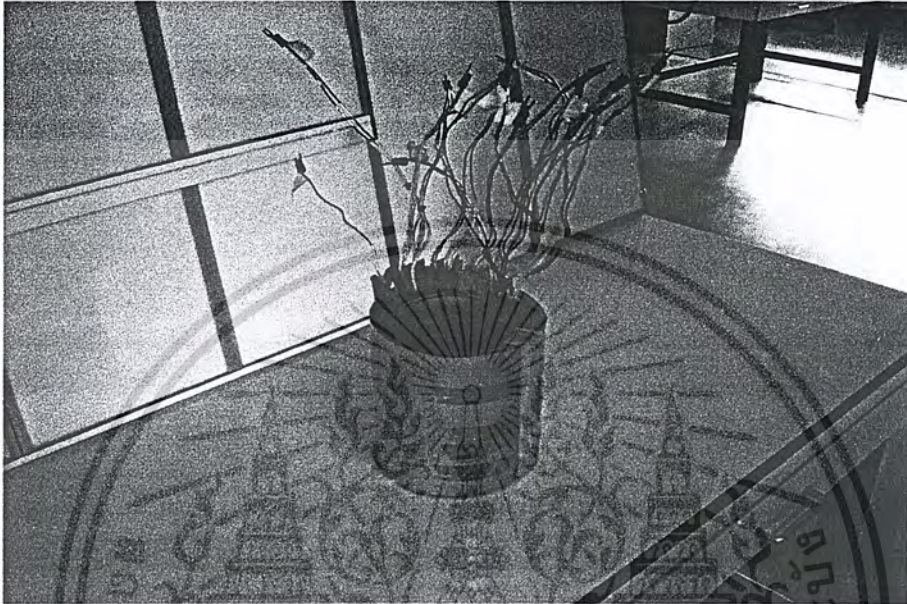


รูป 2.4 (a) ขดลวดแบบ Layer winding

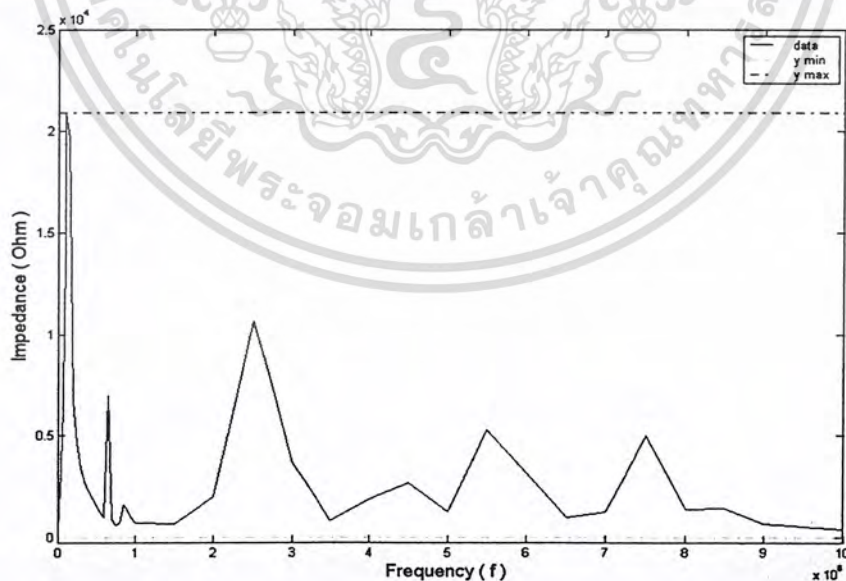
(b) ขดลวดแบบ Disc winding

2.4 ผลกระทบของความถี่ที่มีผลต่อขดลวด

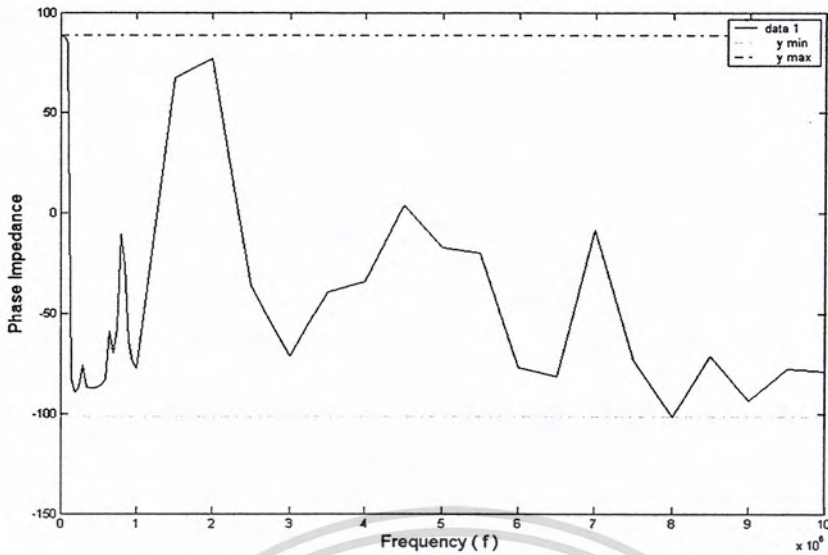
เราได้ทำการป้อนความถี่ต่างๆ เข้าขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Impedance Analyser ที่มีแหล่งจ่ายแรงดันขนาด 40 V วัดที่ปลายขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจากความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆกัน ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Impedance กับความถี่ ดังรูป โดยจากกราฟทำให้เราทราบว่าในช่วงความถี่ใดจะมีผลต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูป2.5 ขดลวดที่นำมาใช้ในการวัด



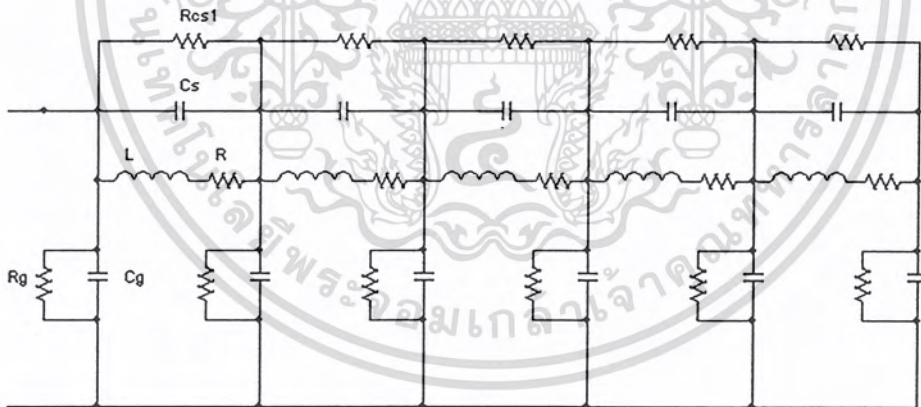
รูป2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Impedance กับ Frequency ของขดลวด



รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Impedance กับ Frequency ของขดลวด

2.5 คำเริ่มต้นการกระจายของเสิร์จ

ในการพิจารณาออกแบบการพันขดลวด ปัญหาอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคือ การกระจายของแรงดันเสิร์จในขดลวด ขั้นตอนแรกในการหาเหตุผลนี้จะพิจารณาถึงวงจรสมมูลของ Single layer coil มีลักษณะดังรูป



รูป 2.8 วงจรสมมูลของ Single layer Coil ขณะมีเกิดแรงดันเสิร์จในขดลวด

จากรูปแต่ละบล็อกจะแทนการพันขดลวด 1 รอบ ถ้าทำการป้อน Step function voltage เข้าไปในขดลวด โดยให้เวลาที่ป้อนการกระจายของแรงดันคงที่ โดยกระจายใน Cs และ Cg สำหรับส่วนของ L จะมีลักษณะ High impedance ซึ่งค่า L นี้จะต้องคำนึงถึงเป็นพิเศษเนื่องจากมีส่วนที่ทำให้เกิดการ Oscillate และส่วนของ Loss จะถูกกำหนดโดย Rg และ Rcs มีค่าสูงเช่นกัน กระแสจะไหลผ่าน Cs ตัวแรก ได้ดีกว่าการไหล

ผ่าน C_s ตัวที่ 2 เนื่องจากกระแสบางส่วนจะไหลผ่าน C_g ด้วย ดังนั้นแรงดันตกคร่อม C_s ตัวที่ 1 จะมีค่ามากกว่า C_s ตัวที่ 2 โดยตัวที่ 2 จะมีค่ามากกว่าตัวที่ 3 ซึ่งจะมีลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ

ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดหนึ่ง แรงดันจะไปปรากฏที่ปลายของขดลวดหนึ่ง และขนาดแรงดันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของขดลวด แต่การแปรผันตามอัตราส่วนของขดลวดจะไม่เป็นจริงทุก ๆ ความถี่ หม้อแปลงจะทำหน้าที่เหมือน Filter โดยจะกรองบางความถี่ออก ค่า Inductive ของหม้อแปลงมีผลมากที่ความถี่ต่ำ โดยจะกรองความถี่ต่ำออก ส่วน Capacitance ของหม้อแปลงจะกรองความถี่สูงออก

พิจารณาใหม่โดยการลดรูปวงจรของขดลวด โดยให้เหลือเพียงค่า C อย่างเดียวโดยให้

C_g คือผลของ Capacitance ระหว่างขดลวดและกราวด์

C_s คือผลของ Capacitance ระหว่างขดลวดที่พิจารณากับขดลวดข้างๆ

Δx คือความยาวของขดลวดในบล็อกที่พิจารณา

l คือความยาวของขดลวดทั้งหมด

$$\partial C_g = C_g \frac{\partial X}{l}$$

$$\partial C_s = C_s \frac{1}{\partial x}$$

จากรูปดังกล่าวจะมีความถี่ค่าหนึ่งและเมื่อป้อน Voltage เข้าไปจะง่ายต่อการพิจารณาซึ่งค่า Voltage จะมีความสัมพันธ์กับ ω แบบผกผันและเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่นของแรงดันแบบ Step voltage จะมีค่าความถี่สูง ดังนั้น

$$\frac{\partial e}{\partial x} = \frac{i}{\omega C_s l}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{e C_g \omega}{l}$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} - \frac{\alpha^2 e}{l^2} = 0 \text{ where } \alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$$

สมการเชิงอนุพันธ์มีผลเฉลยของคำตอบอยู่ในรูป

$$e = AE^{\alpha x/l} + BE^{-\alpha x/l}$$

กรณีให้จุดนิวตรอนเป็นกราวด์ และ V คือ แอมพลิจูดของ Step Function Surge

$$e = E \frac{\sinh(\alpha x/l)}{\sinh \alpha}$$

กรณีแยกสายนิวตรอน

$$e = E \frac{\cosh(\alpha x/l)}{\cosh \alpha}$$

เมื่อมีการต่อสายนิวตรอน

$$\frac{de}{dx} = \frac{\alpha E}{l} \frac{\cosh(\alpha x/l)}{\sinh \alpha}$$

ถ้า $X = l$

$$\frac{de}{dx} \text{ Line} = \frac{E}{l} \alpha \coth \alpha \text{ and } \coth \alpha \rightarrow 1$$

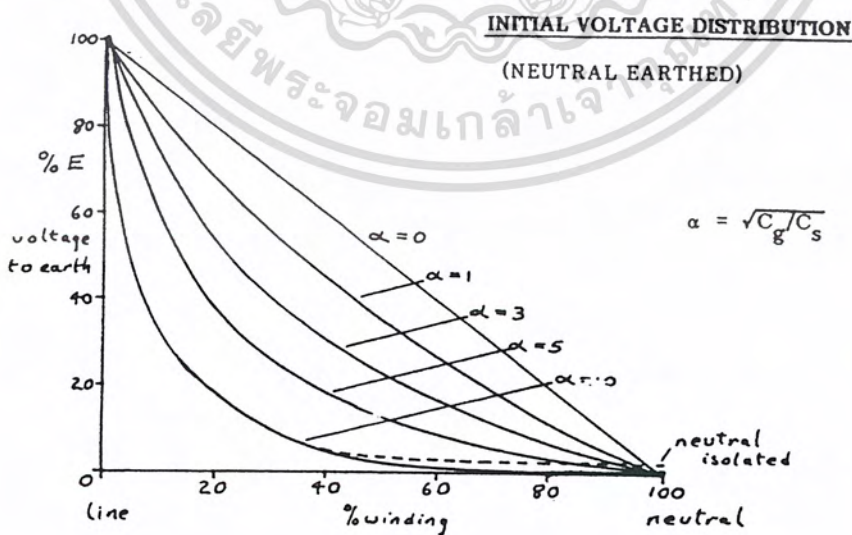
จะได้

$$\frac{de}{dx} \text{ Line} = \frac{E}{l} \alpha$$

ที่ค่า α มีค่ามากจะทำให้ $\coth \alpha \approx \tanh \alpha \approx 1$ ดังนั้นทั้งสองสถานะจะได้

$$\frac{de}{dx} = \alpha \frac{V}{l} \text{ ซึ่งก็คือ}$$

α เป็นจำนวนเท่าความชันนั่นเอง



รูป 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันกับขดลวดของแต่ละ α

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้การเกิด Surge ฉนวนระหว่างขดลวดที่บริเวณปลายขดลวดจะได้รับความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงมาก การค้นพบเหตุการณ์นี้ครั้งแรก ทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไม ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนมาก จึงเกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนขึ้นที่บริเวณนี้

จากอัตราส่วนของ α นี้เองทำให้ค่า Capacitance ของขดลวดมีส่วนสำคัญมากในการทำรูปร่างของขดลวด โดยที่รูปร่างของขดลวดและจำนวนรอบของขดลวด จะต้องมีส่วนสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ ยังมีส่วนที่ต่อถึงกราวด์ ของโครงสร้างของหม้อแปลงด้วย

ดังนั้นจึงไม่ต้องแปลกใจเลยว่า ถ้าขดลวดที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ทำไมจึงให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อมีการจ่าย Steep-Fronted เข้าไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขดลวดจะมีอยู่สองแบบคือ แบบ Layer ซึ่งวางขดลวดขนานกับแกนเหล็กซ้อนกัน ไปเรื่อยๆ และอีกแบบคือแบบ Disc โดยจะวางในแนวตั้งฉากกับแกนเหล็ก

2.6 Transformer Capacitance

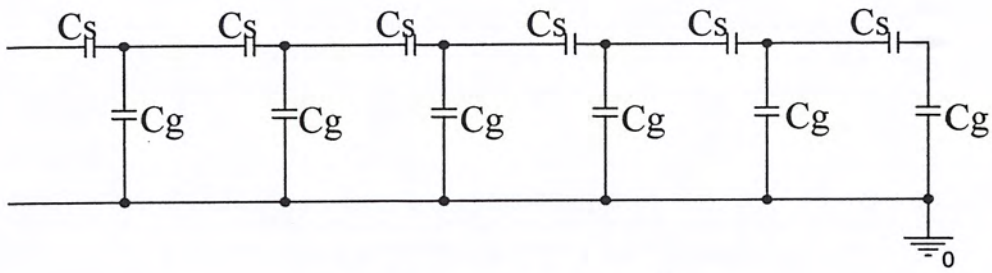
หม้อแปลงพิกัดแรงดันสูงจะต้องมีค่า C ที่ต่ำกว่าหม้อแปลงพิกัดแรงดันต่ำ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะรูปร่างใหญ่กว่า เราอาจจะสมมุติค่า C ของหม้อแปลงแรงดันสูง น้อยกว่าค่านแรงดันต่ำ ในอัตราที่เปรียบเทียบได้ในความจริงของแรงดันสูงต้องการระยะห่างระหว่างขดมากกว่า และก็ระหว่างขดลวดกับแกนมากกว่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้หม้อแปลงแบบแห้งจะมีค่า C น้อยกว่าหม้อแปลงแบบที่ใช้น้ำมัน ในทางปฏิบัติเราสามารถพบได้จากการสังเกตว่าเป็นเหมือนกับข้อเท็จจริง เราสามารถคิดเป็นแบบจำลองแบบง่ายได้ดังนี้ รายละเอียดของการออกแบบ, ชนิดของขดลวดที่ใช้, จะมีผลกระทบต่อค่า C ดังที่บอกกล่าวไว้แล้ว การออกแบบขดลวดของหม้อแปลงจะมีอยู่ 2 แบบคือ Layer กับ Disc จากการพิจารณาทางโครงสร้างของการวางขดลวดจะมีค่า C ระหว่างขดลวดเอง และระหว่างขดลวดกับกราวด์ และพบว่าค่า Effective Capacitance ระหว่างขดลวดกับกราวด์ของขดลวดแบบ Disc มีค่าไม่เกิน 30-40% ของค่าขดลวดแบบ Layer ในพิกัด kVA เดียวกัน

เหมือนกับ Inductance ค่า Capacitance จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของขดลวดซึ่งก็คือระยะห่างระหว่างขดลวดและระยะห่างระหว่างขดลวดกับกราวด์และอื่นๆ

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{D}$$

2.7 Transformer Model

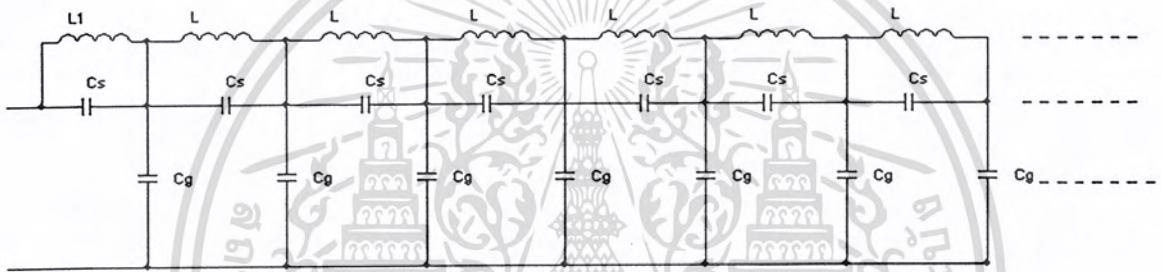
การออกแบบหม้อแปลง สิ่งที่อยู่อกแบบหม้อแปลงจำเป็นต้องทราบคือ เมื่อมี Steep-Fronted Surge เข้ามาในระบบ จะมีผลกระทบเช่นไรต่อพฤติกรรมของหม้อแปลง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีวงจรสมมูลย์มาศึกษาถึงพฤติกรรมของหม้อแปลง ซึ่งเราจะพิจารณาในช่วงสั้นๆเป็นไมโครวินาที



รูป2.10 วงจรสมมูลในช่วงเวลาสั้นๆ

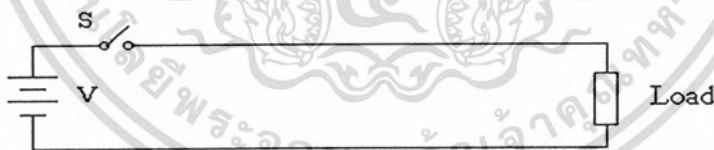
จากวงจรสมมูลดังรูป จะไม่มีค่า L เพราะการพิจารณาในช่วงเวลาสั้นๆ เป็นไมโครวินาที ซึ่งกระแสที่ไหลผ่าน L จะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้

ซึ่งถ้าเราพิจารณาในช่วงเวลาปกติ จะมีผลของค่า L เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยทำให้วงจรสมมูลที่ต้องพิจารณาเปลี่ยนรูปไปดังนี้

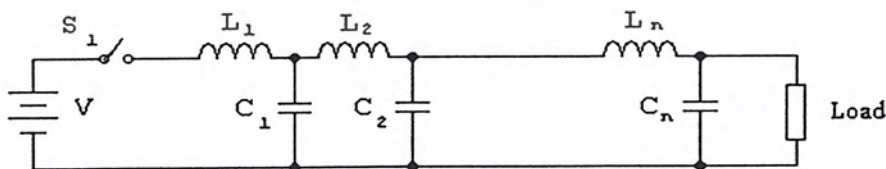


รูป2.11 วงจรสมมูลในช่วงเวลาปกติ

2.8 Traveling Wave (การเดินทางของคลื่น)



(a)



(b)

รูป2.12 (a)รูประบบสายส่งสองสาย

(b)รูปการเกิดค่า L และ C ของสายส่ง

จากการจำลองคั้งรูปข้างบนสามารถนำไปใช้ได้กับรูปแบบจำลองของขดลวดได้ ซึ่งจาก รูป 2.12 (b) เมื่อสวิตช์ S_1 ปิดวงจร กระแสจะเริ่มไหลไปตามสายส่งผ่านอินดักเตอร์ตัวแรก (L_1) และเข้าไปชาร์จที่คาปาซิเตอร์ตัวแรก (C_1) อย่างรวดเร็ว ทำให้แรงดันตกคร่อมช่วงต่อไปของสายส่ง และกระแสจะไหลต่อไปผ่านอินดักเตอร์ตัวต่อไป (L_2) และไปชาร์จที่คาปาซิเตอร์ตัวต่อไป (C_2) และเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึง L_n และ C_n เมื่อเราพิจารณาจากจุดที่หยุดนิ่งแล้วหลังจากเวลาผ่านไป Δt และระยะทางความยาว Δx ของวงจรที่มีการชาร์จวงจร ถ้าคาปาซิเตอร์ของสายคือ C ซึ่งมีหน่วยเป็น F/m จะมีประจุ

$$Q = CV \Delta x \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อมีประจุไหลผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดเหตุการณ์สองอย่างคือ เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำตลอดความยาว Δx ของสาย และเกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำ โดยมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำ กระแสพิกัดได้ชาร์จผ่านเข้าไปและออกมาตามสายส่งคือ $I = dQ/dt$ ดังนั้นจากสมการที่ (1)

$$I = VC \frac{\Delta x}{\Delta t} = CV \frac{dx}{dt} \quad \text{ที่ความยาวกำหนด}$$

โดย $\frac{dx}{dt}$ คือ พิกัดการกระจายของคลื่นไปตามสาย โดยจะใช้สัญลักษณ์ v แทน ดังนั้น

$$I = CVv \quad \dots\dots\dots (2)$$

จากการที่เกิดสนามแม่เหล็กนี้จึงทำให้เกิด inductance ขึ้นบนตัวนำ โดยมีค่า L (H/m) ขณะที่กระแสไหลผ่านตัวนำยาว Δx (m) ทำให้เกิด flux linkage, Φ โดย

$$\Phi = L \Delta x I = L \Delta x CVv$$

และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} &= LCv^2 \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ &= LCv^2 \quad \text{ที่ความยาวกำหนด} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ดังนั้น $v = LCv^2$

หรือ $v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \dots\dots\dots (4)$

ความเร็วของการกระจายคลื่นของกระแสและแรงดันบนตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและคุณสมบัติของแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวกลาง นั่นก็คือคุณสมบัติของ L และ C โดยถ้าระยะห่างระหว่างสายตัวนำคือ d ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง r โดยไม่คำนึงถึง Flux ภายในตัวนำ ดังนั้นจะสามารถประมาณค่า L และ C ได้ดังนี้

$$L = \frac{\mu_0 \ln \frac{d}{r}}{\pi}$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln d/r}$$

นำไปแทนค่าในสมการที่ (4) โดย

หรือ

$$LC = \mu_0 \epsilon_0$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

ซึ่งก็คือความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ หรือก็คือความเร็วแสงนั่นเอง และความเร็วนี้ก็ไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของสาย



บทที่ 3

วงจร Surge Generator และ การทำงาน

3.1 หลักการทำงานของ Low voltage surge generator

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินที่เกิดจากเหตุภายนอก คือแรงดันที่เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือ เกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ ซึ่ง ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดลองก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งานเพื่อจะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้ไหม ความคงทนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ของฉนวนมิใช่ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับการแปรของแรงดัน ไปตามเวลาอีกด้วย

หลักการที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ทำให้ต้องสร้างวงจรที่กำเนิดรูปคลื่นของ Steep-Fronted Surge ขึ้นมา ในการตรวจจับสัญญาณที่จุดต่างๆ ของหม้อแปลง ซึ่งจะทำการวัดค่าโดยใช้ Oscilloscope มาทำการวัด โดยเครื่อง Steep-Fronted Surge Generator นี้ควรมีความสามารถในการกำเนิดรูปคลื่นที่แตกต่างกัน ทั้งหม้อแปลงที่ฉนวนด้วยอากาศและน้ำมัน รูปคลื่น Pulse จะเกิดขึ้นเร็วมาก เพราะการแพร่ผ่านในขดลวดนั้นจะชัดเจน

เนื่องด้วยเครื่อง Discharge pulse generator จะถูกติดตั้งระหว่างปลายของขดลวดหม้อแปลง ดังนั้นวงจรจึงต้องเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อที่จะง่ายต่อการทดลอง จึงเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการสร้างวงจร

เพราะฉะนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบการสร้างวงจร

1. ต้องกำเนิด Pulse ได้ทั้งฉนวนด้วยอากาศและน้ำมัน
2. ต้องมีขนาดเล็ก

3.2 Power Supply

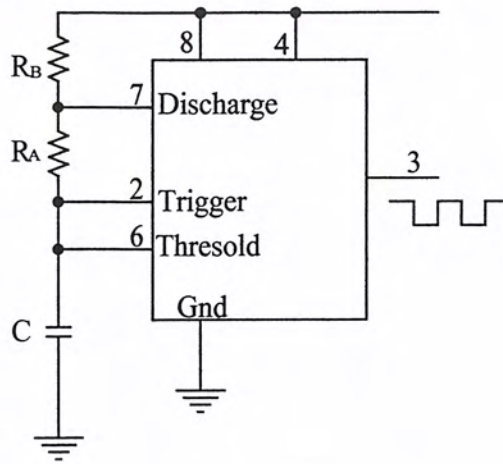
ใช้แหล่งจ่ายไฟ DC 9 V จ่ายให้กับ IC Regulator L7805CV ซึ่งจะใช้งานร่วมกับ Capacitor ที่ค่า 220 nF และ 100 nF โดย IC Regulator L7805CV จะมีขา 3 ขา รับ input ได้ 7 V-30 V และจะให้ output 5 V คงที่ ที่กระแส 1.5 A

3.3 การออกแบบวงจร Astable Circuit

ไอซี NE555N สามารถใช้ทำเป็น Astable หรือตัวกำเนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยมได้ดีมากซึ่งมีความถี่การทำงานถึง 100 kHz Astable มีเสถียรภาพของความถี่ที่ดีมาก สำหรับการออกแบบวงจรนี้จะถูกใช้งานเพื่อกำเนิดสัญญาณ Pulse ที่ความถี่ 50 Hz และ NE555N เป็นชิปที่หาได้ง่ายและมีวงจร Astable ซึ่งจะกำเนิด Pulse ที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.1 วงจรการต่อ Astable ของ NE555N

และเมื่อใช้วงจรนี้สร้าง Pulse ต่อเนื่องที่มีความถี่ 50 Hz rise time และ fall time ก็จะสามารถได้จากสูตร

$$t_1(\text{rise time}) = 0.693(R_A + R_B)C$$

$$t_2(\text{fall time}) = 0.693R_B C$$

โดย Discharge pulse ที่ความถี่ 50 Hz t_1 และ t_2 เท่ากับ 10 ms และเลือกค่า C เท่ากับ 1 μF

$$t_1 = t_2 = 0.693 R_B * 1\mu\text{F}$$

$$R_B = 14.43 \text{ k}\Omega$$

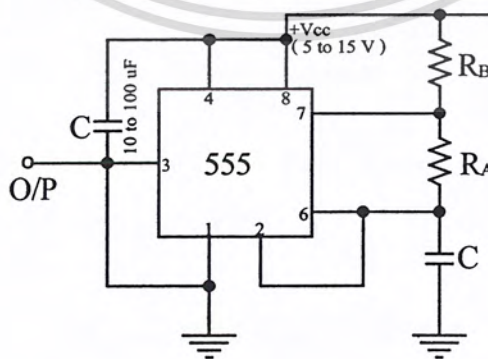
$$t_1 = 0.693(R_A + R_B)C$$

$$10 \text{ ms} = 0.693(R_A + R_B)C$$

$$R_A = 1.43 \text{ k}\Omega$$

เลือก $R_A = 2.2 \text{ k}\Omega$

ในการใช้งานที่ความถี่ของ Pulse 50 Hz จะต้องใช้ที่มากกว่า $R_A = 1.43 \text{ k}\Omega$ ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้ $R_A = 2.2 \text{ k}\Omega$ และ NE555N จะให้ Output voltage 5V การต่อวงจร Astable ของ IC NE555N หาได้ใน Data sheet และค่า C ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 10-100 μF ซึ่งในที่นี้จะใช้ 10 μF ดังรูปที่ 3.2

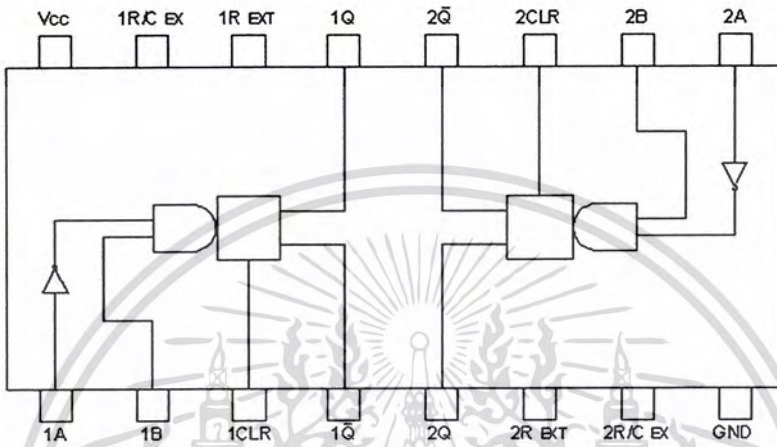


รูปที่ 3.2 การต่อวงจรใช้งาน Astable ของ NE555N

Output ที่ได้จาก IC นี้จะถูกต่อเป็นวงจร Astable ที่สามารถปรับความกว้างของ Pulse ขาออกได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

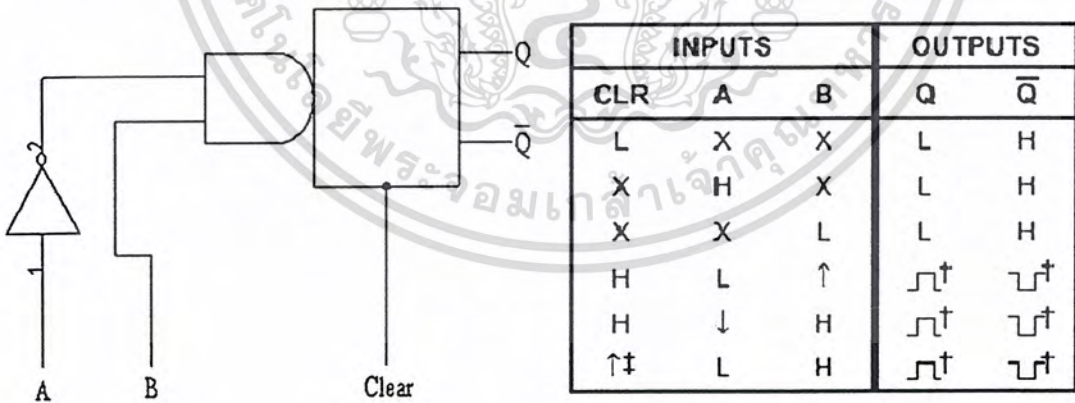
3.4 Monostable Circuit

วงจร Monostable ถูกใช้เพื่อสร้างสัญญาณ Pulse การเลือกวงจรมันเพราะว่ามันมีความสามารถในการปรับความกว้างของ Pulse ได้ มีความแน่นอนและราคาถูก รวมทั้งยังมี IC ที่มีวงจรมันบรรจุอยู่จึงง่ายต่อการใช้งาน IC LS221 จะประกอบด้วยวงจร Monostable 2 วงจร แต่ในที่นี้จะใช้เพียง 1 วงจร เท่านั้นดังรูป



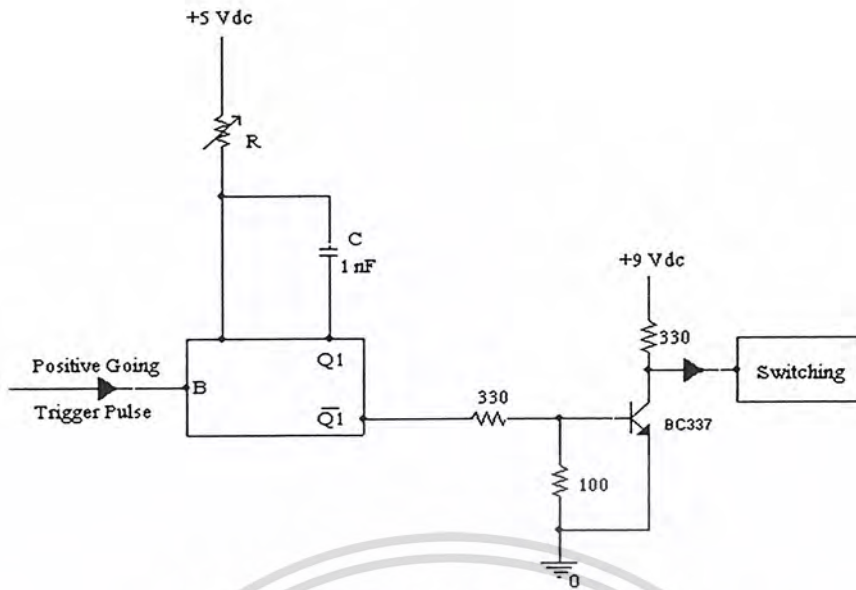
รูปที่ 3.3 TTL 74123 in-out

ที่ขา R/C_{EXT} และ R_{EXT} จะเป็นขาที่ R และ C จะต่อไว้เพื่อปรับความกว้างของ Pulse โดยจะแสดง Truth Table ของวงจร Monostable ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Truth Table ของวงจร Monostable

ซึ่งสังเกตว่าที่ขา Clear เป็น High และ A เป็น Low จะทำให้ B กลายเป็น Input ของวงจร Monostable ซึ่งสามารถปรับตามต้องการ



รูปที่ 3.5 วงจร Monostable ที่สร้าง Trigger pulse

วงจร Monostable จะกลับเฟสเพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ Output เป็น 0 จากนั้น RC ที่ต่ออยู่ก็จะกลับเฟสเป็น +5V อีกครั้งและ RC นี้ก็เป็นตัวปรับความกว้างของ Pulse ขาออกด้วย, t_w

ความกว้างของ Pulse, t_w ปรับความกว้างของ Pulse ได้โดยการปรับค่า R และ C ซึ่งในที่นี้เราใช้ $C = 1 \text{ nF}$ และเราใช้ R ปรับค่าได้มาปรับความกว้างของ Pulse ถ้าปรับ R มากขึ้นทำให้ความกว้างของ Pulse มากขึ้น ซึ่งในวงจร Surge นี้เวลาที่ใช้ทำให้สวิทช์เกิดการสวิตช์ซึ่งได้ต้องใช้ความกว้างของ Pulse ประมาณ $1.2 \mu\text{s}$

โดยสัญญาณที่ออกจาก IC LS221 จะผ่าน Transistor BC337 ซึ่งทำงานเหมือน Inverter เพื่อกลับเฟสของสัญญาณเพื่อนำไปควบคุม Transistor BC337 แบบ npn ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิทช์ของวงจร Discharge Generator โดยต่อ $r = 2 \text{ k}\Omega$ เข้าไปที่ขา base เพื่อควบคุม Transistor ให้ทำงานที่กระแสที่เหมาะสมและไม่ให้กระแสไหลเข้าขา Base ของ Transistor มากเกินไป

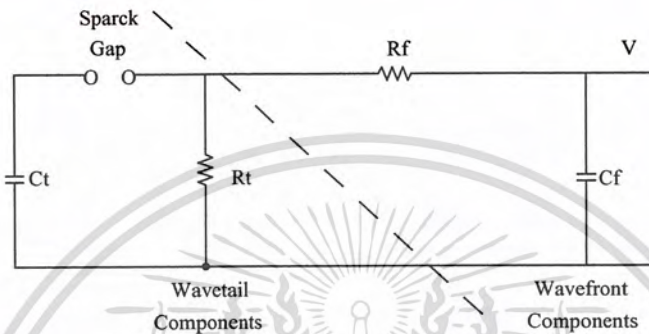
3.5 วงจร Discharge pulse generator

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ แรงดันกระแสตรง u_0 เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ u_0 การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน R_c ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุเร็วหรือช้า (ปกติ 2-3 วินาที) ค่าแรงดันอัดประจุได้ u_0 นี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์กแก๊ปซึ่งในที่นี้ใช้อุปกรณ์สวิตซ์ชิ่งแทน เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการและนอกจากจะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุแล้วยังทำหน้าที่เหมือนสวิทช์เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_c ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสวิตซ์ชิ่งจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว คือ ใช้เวลาน้อยกว่า $100 \mu\text{s}$ เมื่อสวิตซ์ on แรงดันอัดประจุ u_0 จะคร่อม R_c และ C_c นับเป็นช่วงเวลาหน้าคลื่น ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า R_c และ C_c นี้จะเป็นตัวกำหนดเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้ C_c จนเต็มที่แล้วประจุนี้ก็จะคดซารจ์ไปสู่ R_c จึงอาจกล่าวได้ว่า R_c ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น T_2 คือถ้า R_c มีค่าสูง T_2 จะมีค่ามากตามไปด้วย

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง u จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ u_0 เพราะประจุจะกระจายให้กับ C_t และ C_f ฉะนั้นอัตราส่วนของ u ต่อ u_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจร} \quad n = \frac{u}{u_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b}$$

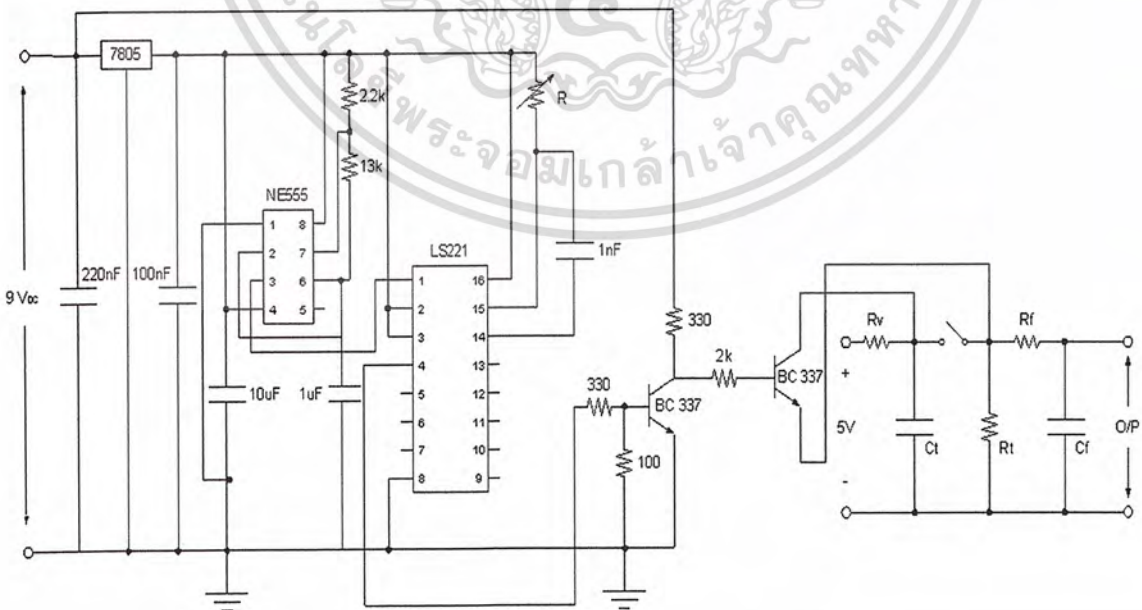
ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ ควรเลือกให้ C_t มีค่าสูงกว่า C_f มากๆ



รูปที่ 3.6 วงจร Discharge pulse generator

3.6 วงจรกำเนิด Step-Fronted Surge

ในการสร้างแรงดัน Surge ที่มีความชันหน้าคลื่นสูง ความเร็วในการ Switching เป็นสิ่งจำเป็นดังนั้นจึงเลือกใช้ Transistor BC337 ซึ่งสามารถทำงานได้ที่เวลา 1.2 μ s มาเป็นสวิตช์ควบคุมวงจร Discharge pulse generator ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรกำเนิด Step-Fronted Surge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

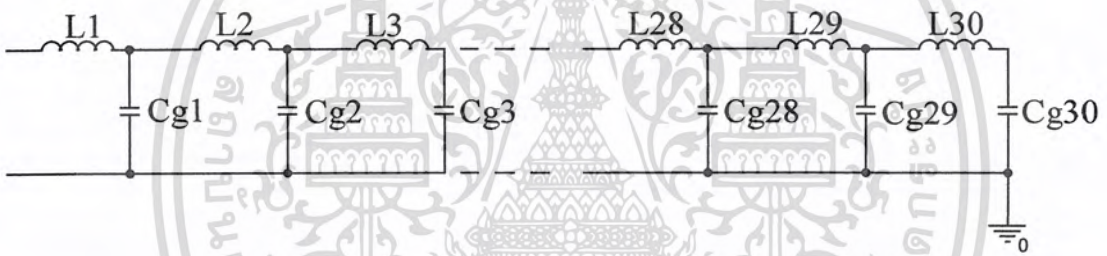
บทที่ 4

การกระจายของ Steep-Fronted Surge ในขดลวด

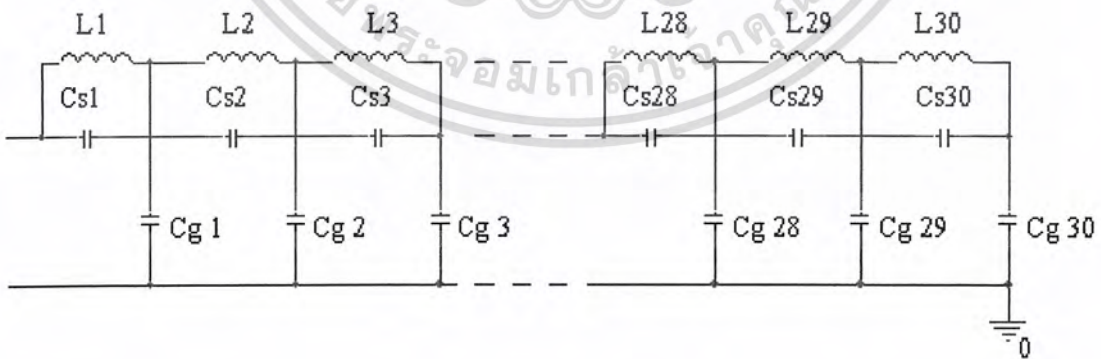
ในการทดลองจะทำการทดลอง 3 แบบ คือ จากการใช้โปรแกรม Orcad ทำการ Simulation, จากการใช้ Function Generator เป็นแหล่งจ่ายจ่ายเข้าไปในชุดจำลองขดลวดหม้อแปลง และจากการสร้างวงจร Steep-Fronted Surge ขึ้นมาเป็นแหล่งจ่ายแล้วจ่ายให้ชุดจำลองขดลวดหม้อแปลง และทำการวัดที่ Disc ต่างๆ กัน คือ 1,5,10,15,20,25 และ 30 จากนั้นทำการเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบ การทดลองทั้ง 3 แบบ ซึ่งสมมติให้ขดลวดมีลักษณะการต่อแบบ Disc winding และมีลักษณะการต่อภายในดังนี้

1. กรณีวงจรมีค่า L (102 μH) และ C_g (60 pF)
2. กรณีวงจรมีค่า L (102 μH), C_g (60 pF) และ C_s (150 pF)
3. กรณีวงจรมีค่า L (102 μH), C_g (60 pF) และ C_s (3200 pF)

โดยมีลักษณะการต่อวงจรดังนี้



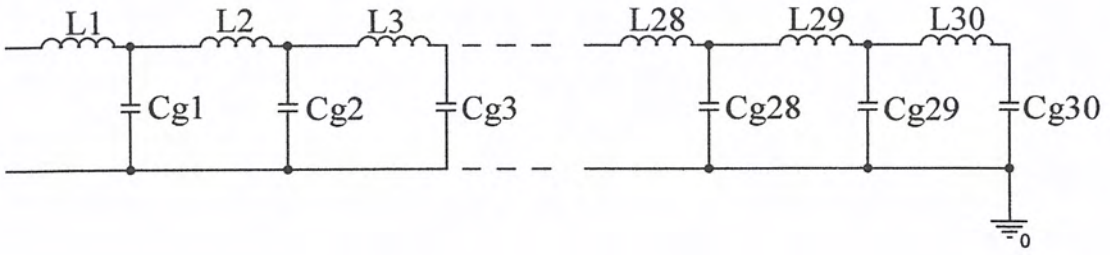
รูปที่ 4.1 กรณีวงจรมีค่า L และ C_g



รูปที่ 4.2 กรณีวงจรมีค่า L , C_g และ C_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่าง ผลจาก Simulation และผลจาก Function Generator
 ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$)



ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μs , แรงดัน 12 V

ความถี่ออสซิลเลชั่น = 90.91 kHz

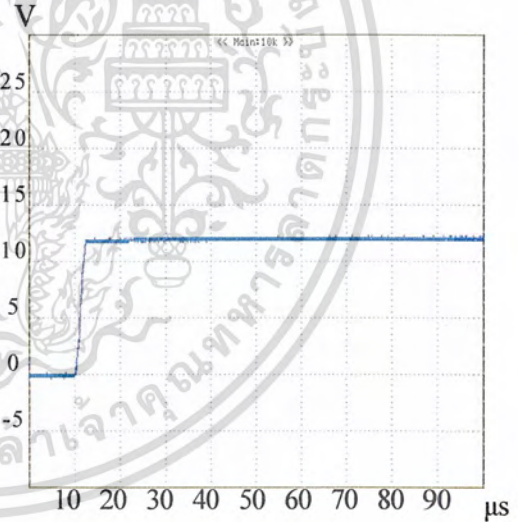
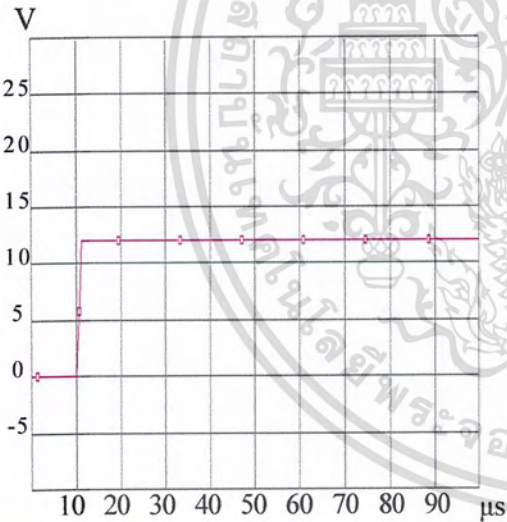
ความถี่ออสซิลเลชั่น = 83.33 kHz

ผลจาก Simulation

ผลจากเครื่อง Function Generator

ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย

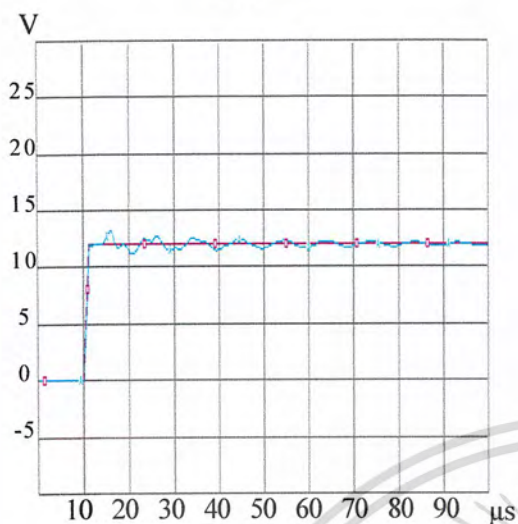
ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

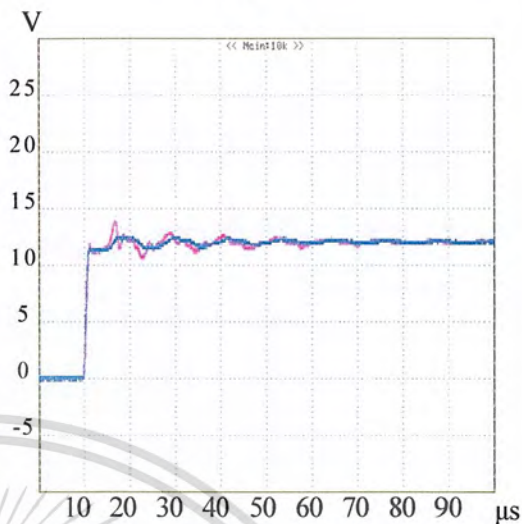
ผล Simulation

Disc ที่ 1

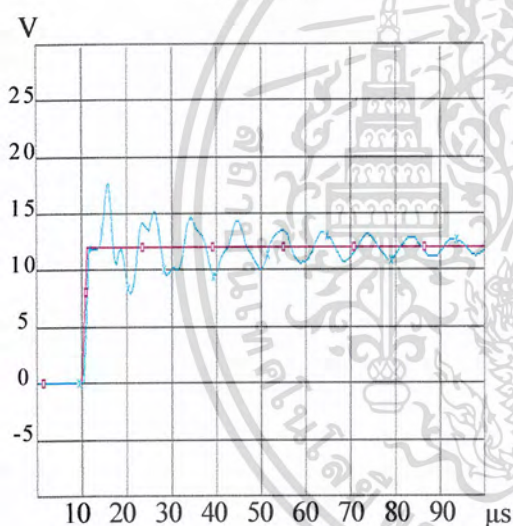


ผล Function Generator

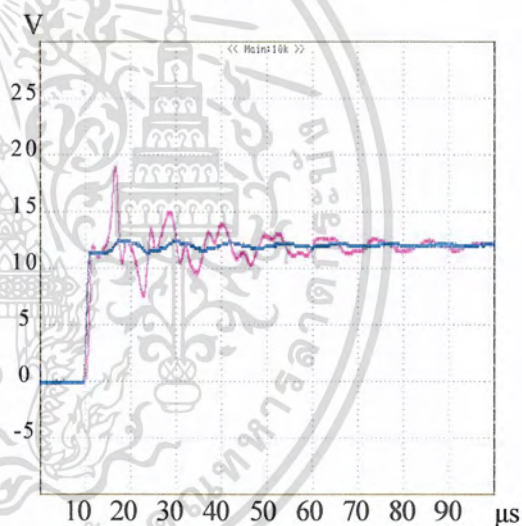
Disc ที่ 1



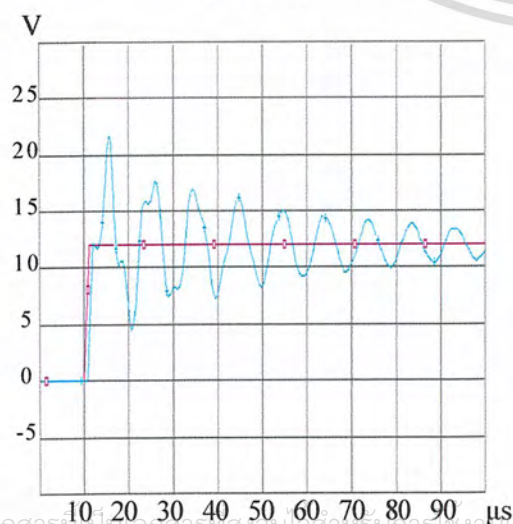
Disc ที่ 5



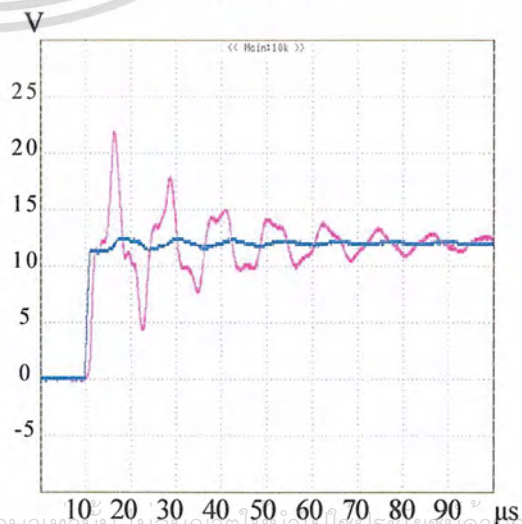
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



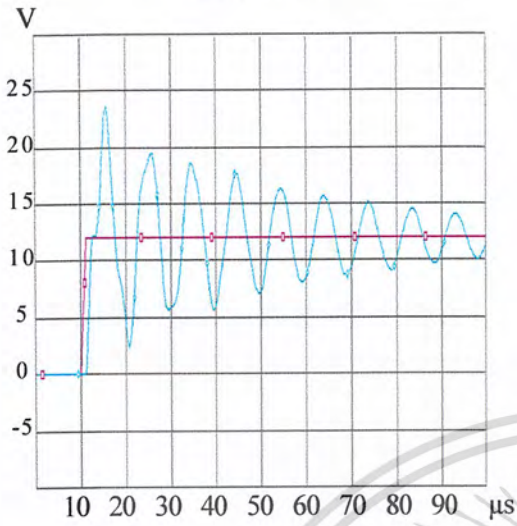
Disc ที่ 10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ตามการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

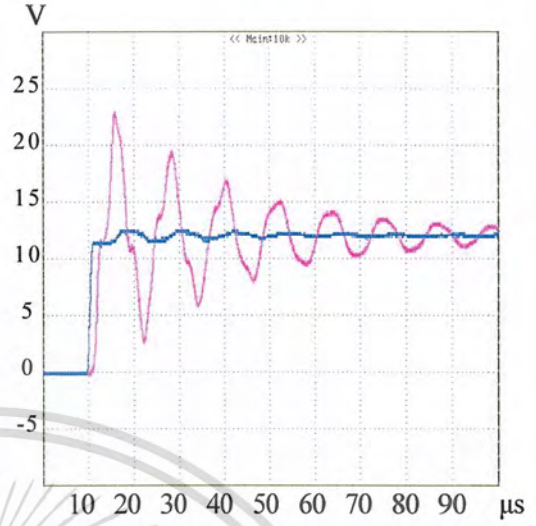
ผล Simulation

Disc ที่ 15

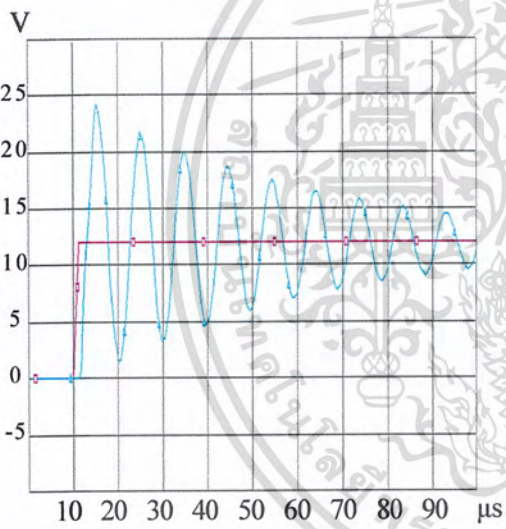


ผล Function Generator

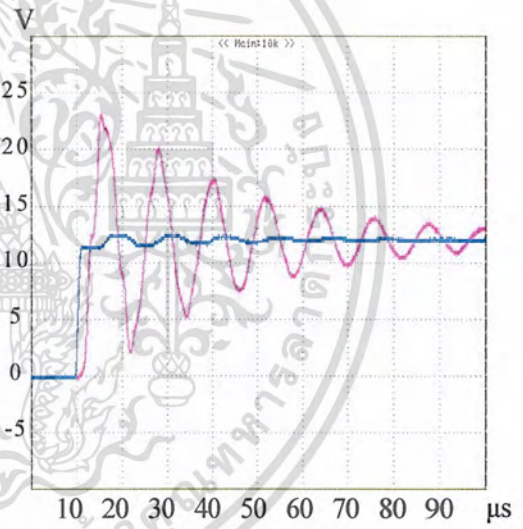
Disc ที่ 15



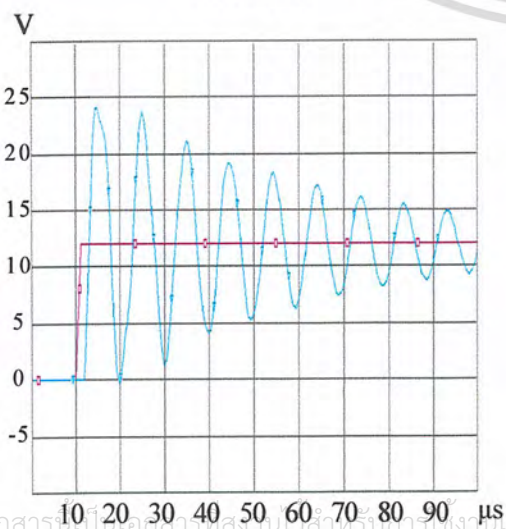
Disc ที่ 20



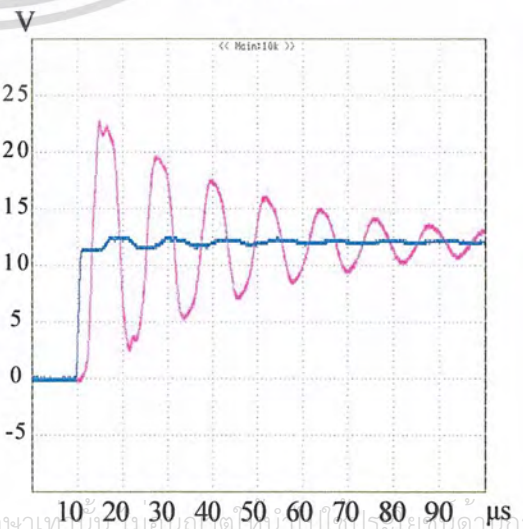
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



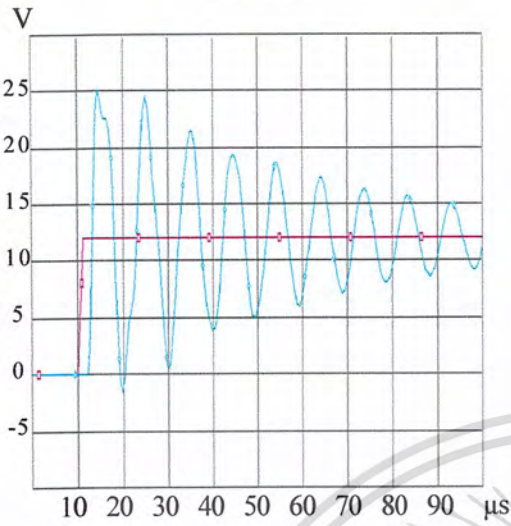
Disc ที่ 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

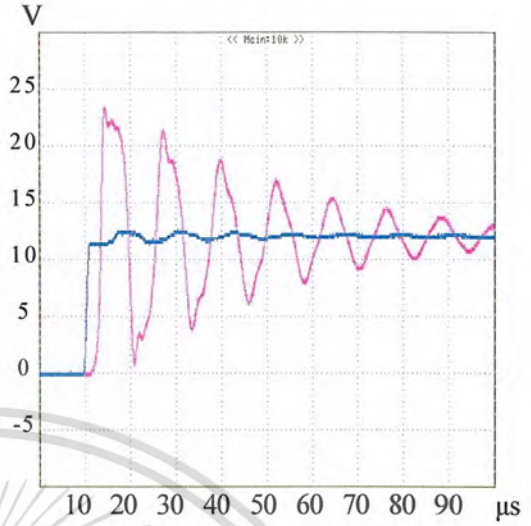
ผล Simulation

Disc ที่ 30

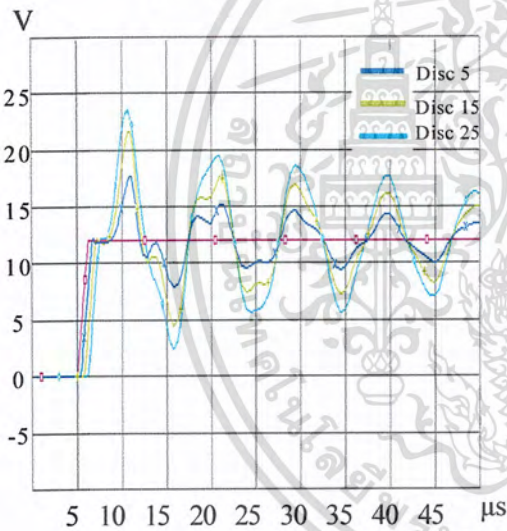


ผล Function Generator

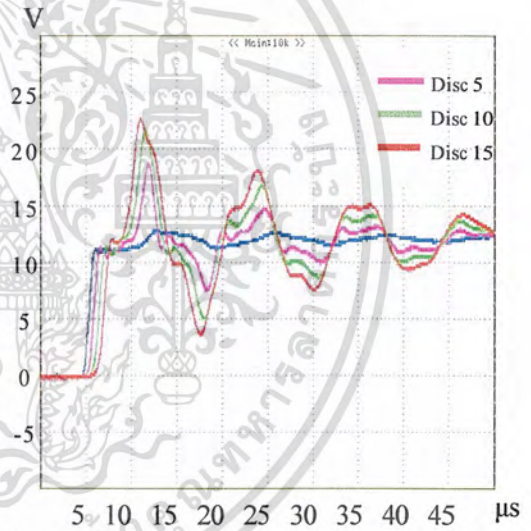
Disc ที่ 30



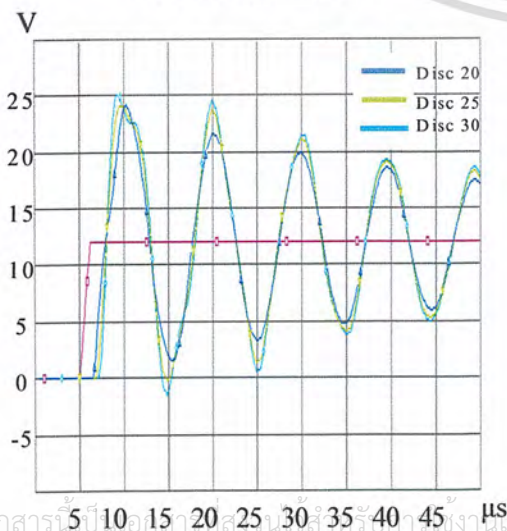
Disc ที่ 5,10 และ 15



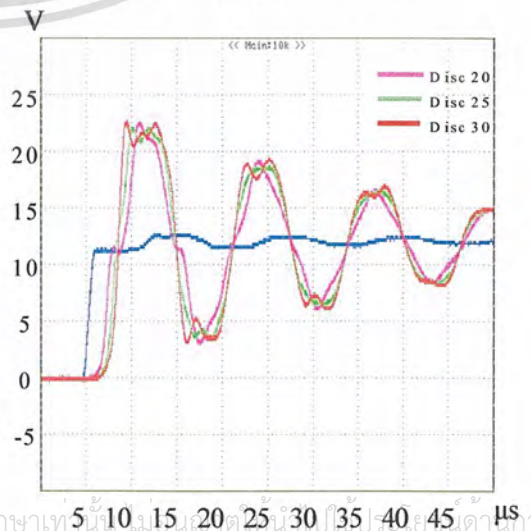
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



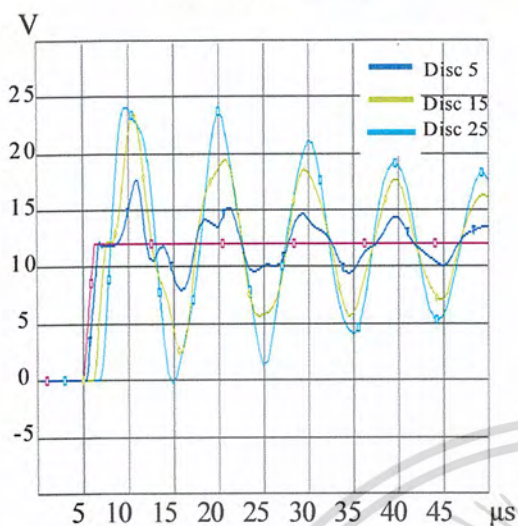
Disc ที่ 20,25 และ 30



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การคัดลอกหรือการนำเอกสารไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

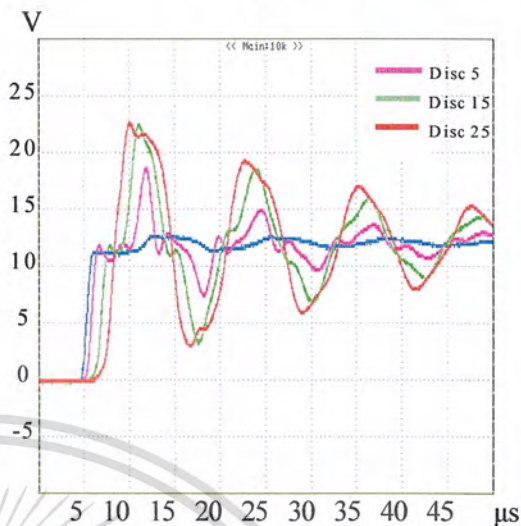
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

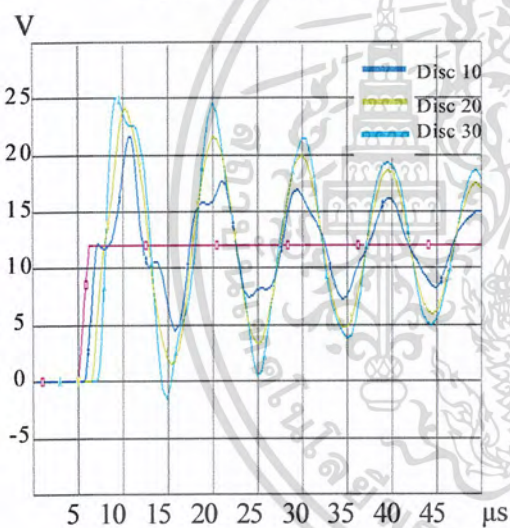


ผล Function Generator

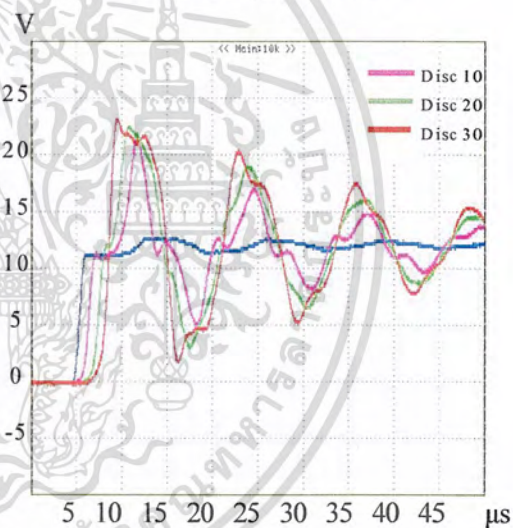
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



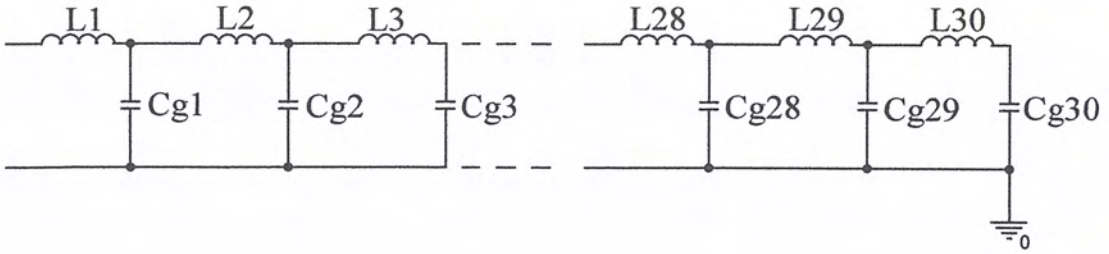
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s
กรณีมี L และ C_g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$)



ที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns, แรงดัน 12 V

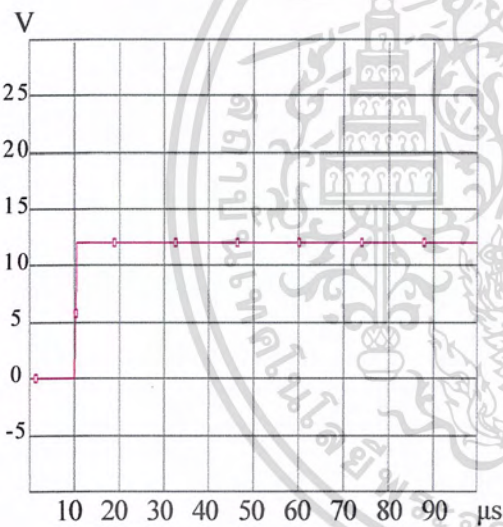
ความถี่ออสซิลเลชัน = 90.91 kHz

ความถี่ออสซิลเลชัน = 80.00 kHz

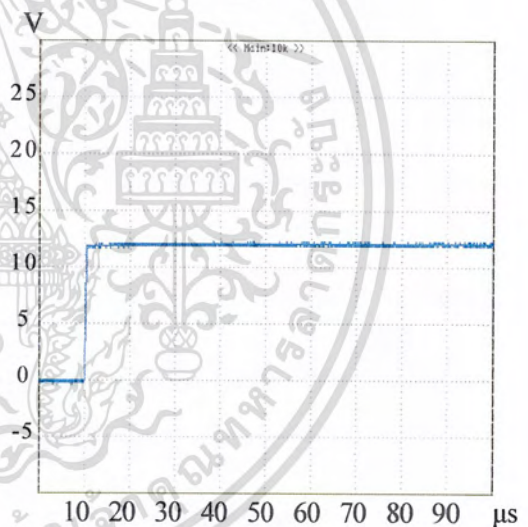
ผลจาก Simulation

ผลจากเครื่อง Function Generator

ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย



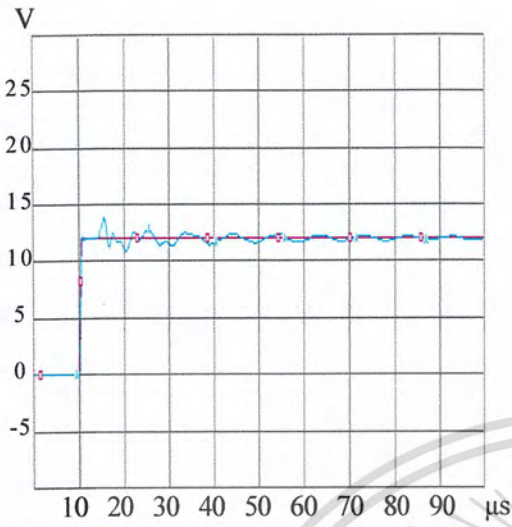
ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

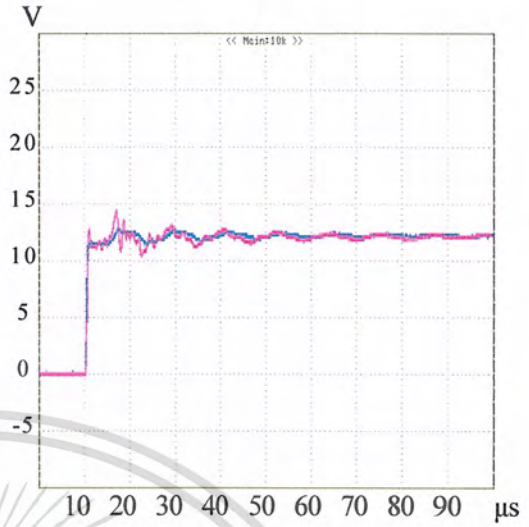
ผล Simulation

Disc ที่ 1

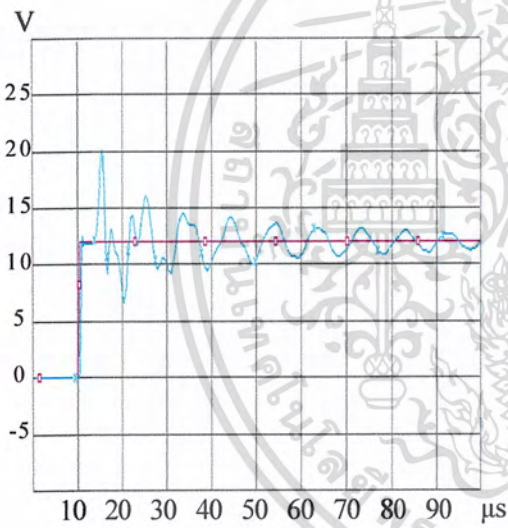


ผล Function Generator

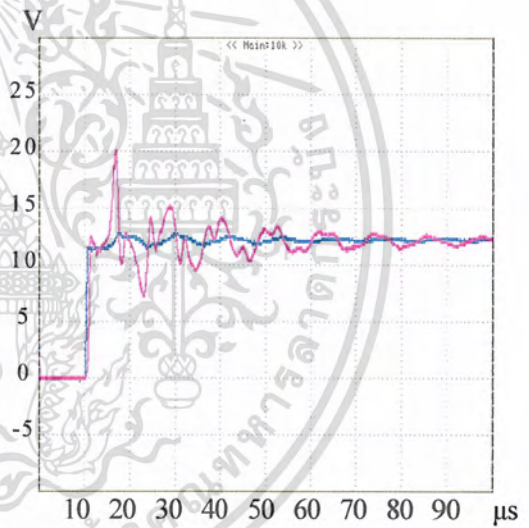
Disc ที่ 1



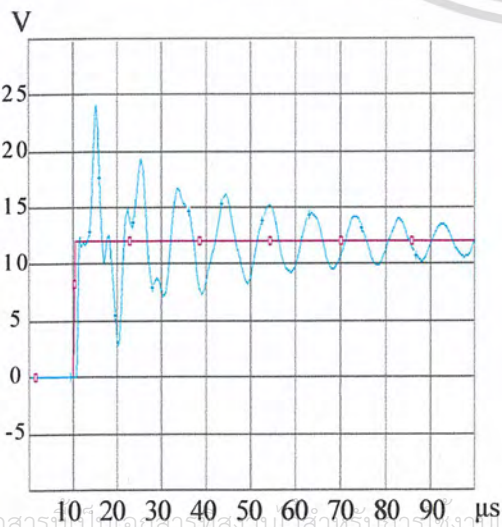
Disc ที่ 5



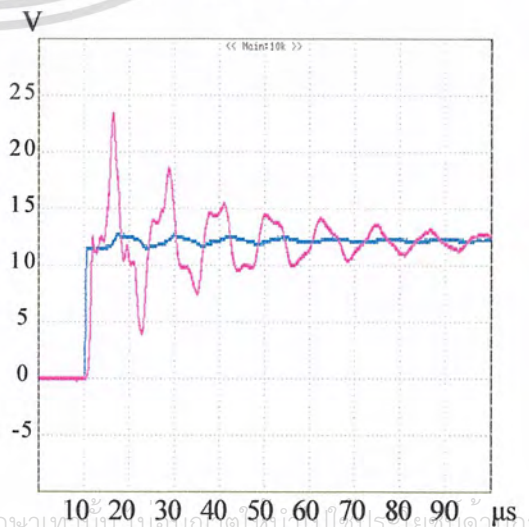
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



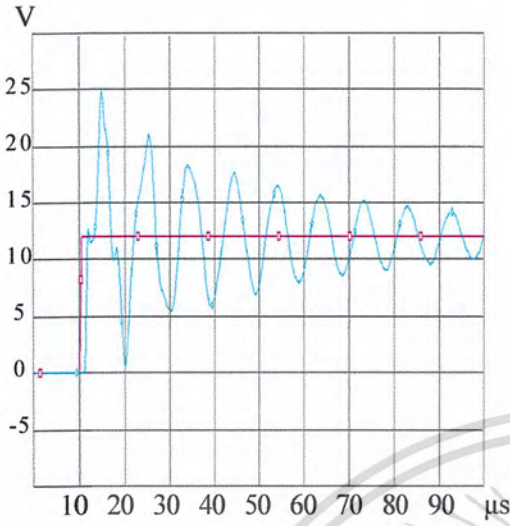
Disc ที่ 10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยัดใ้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

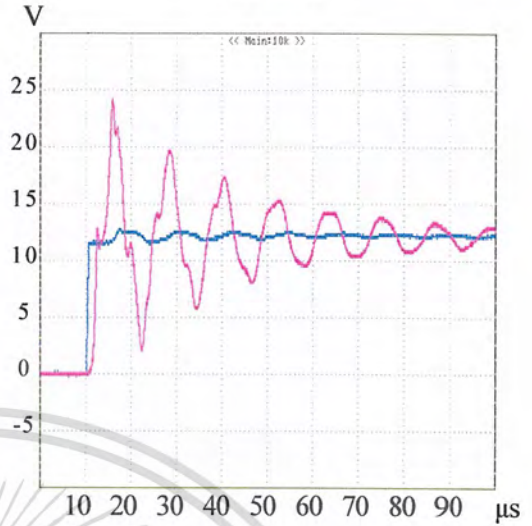
ผล Simulation

Disc ที่ 15

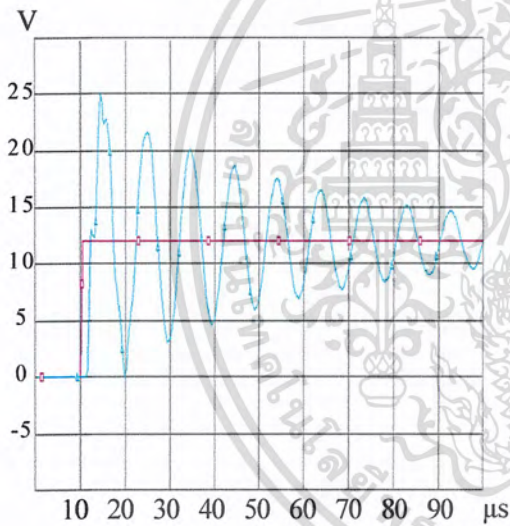


ผล Function Generator

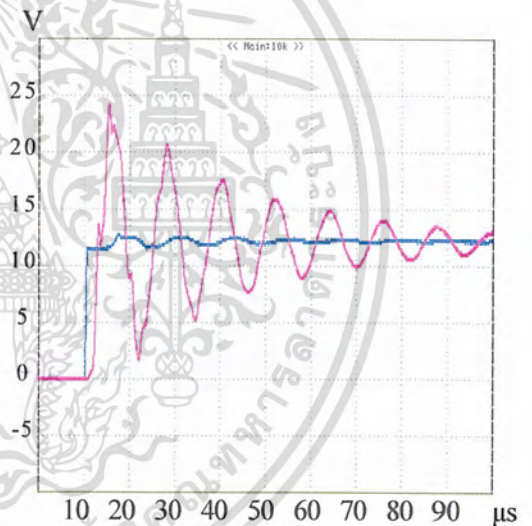
Disc ที่ 15



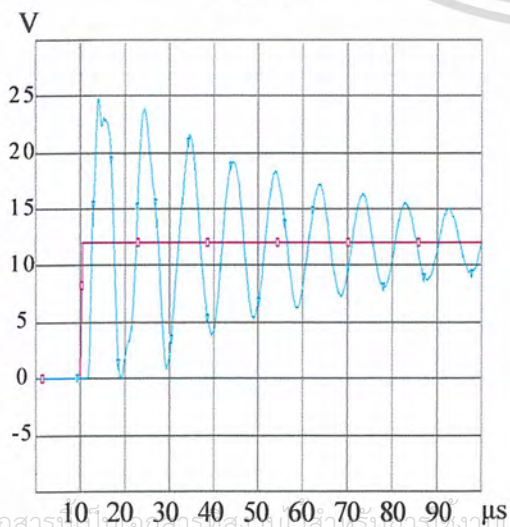
Disc ที่ 20



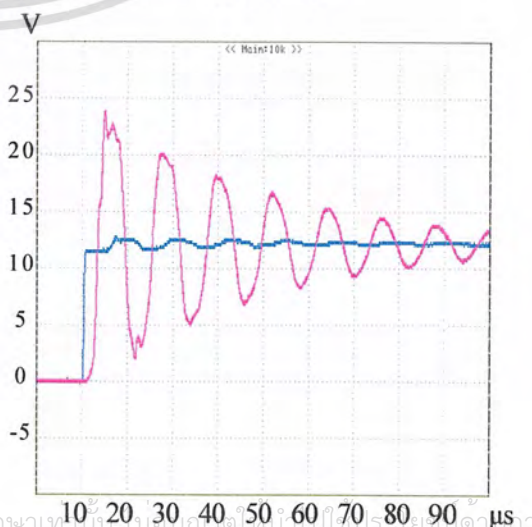
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



Disc ที่ 25

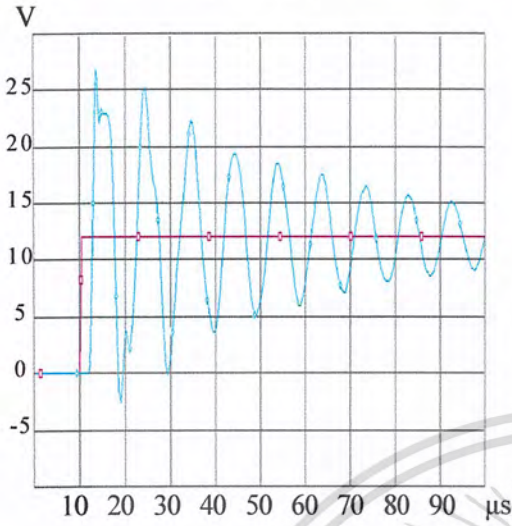


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อยู่ใต้เงื่อนไขไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

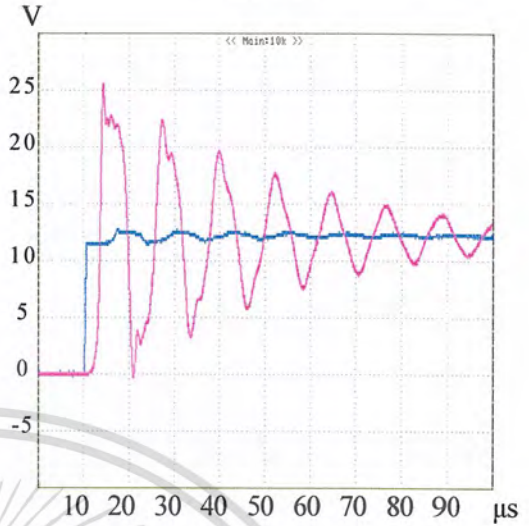
ผล Simulation

Disc ที่ 30

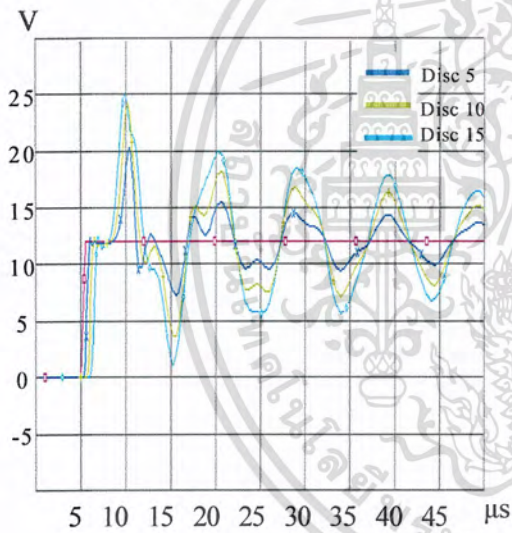


ผล Function Generator

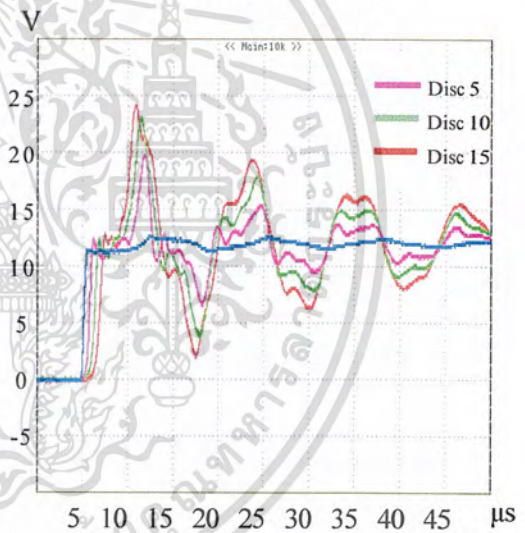
Disc ที่ 30



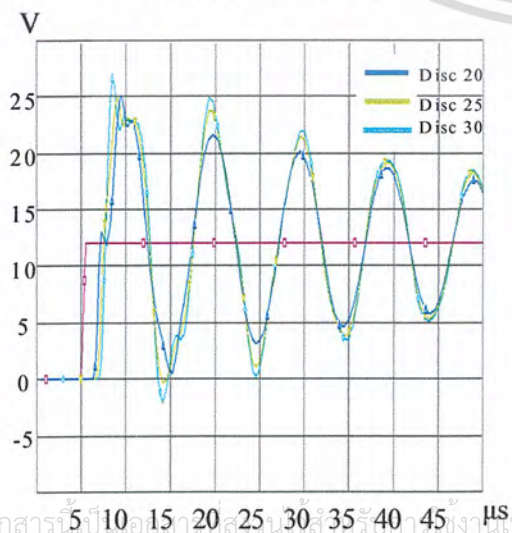
Disc ที่ 5,10 และ 15



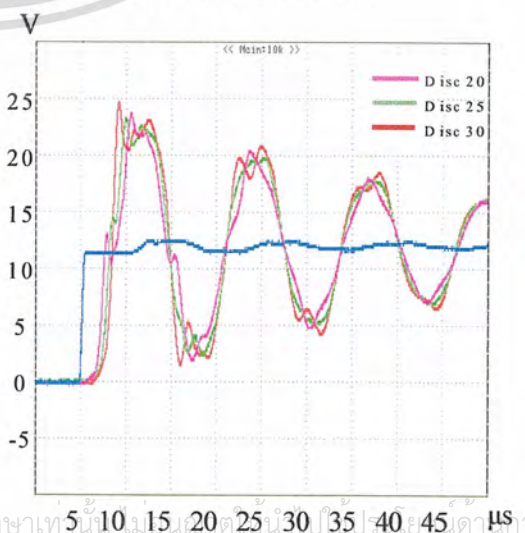
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



Disc ที่ 20,25 และ 30

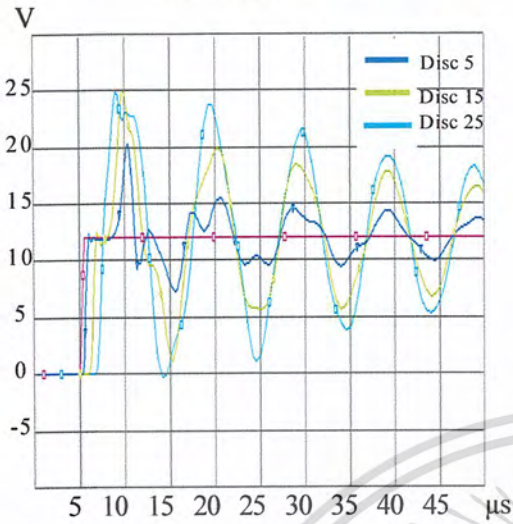


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

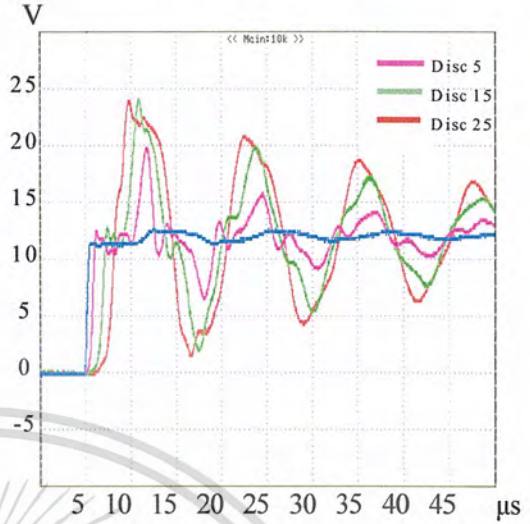
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

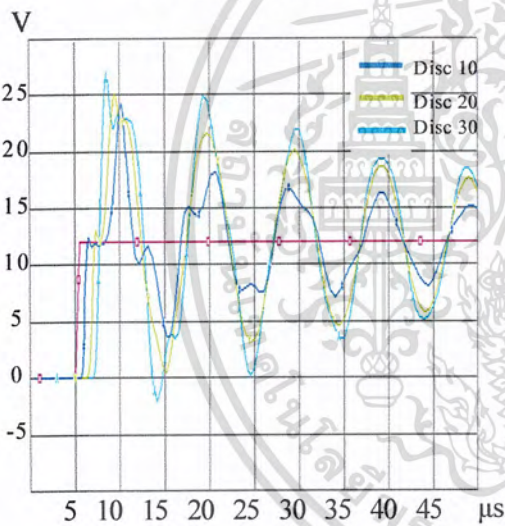


ผล Function Generator

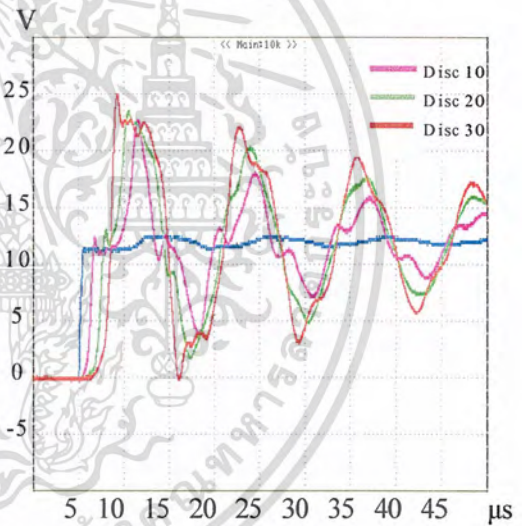
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



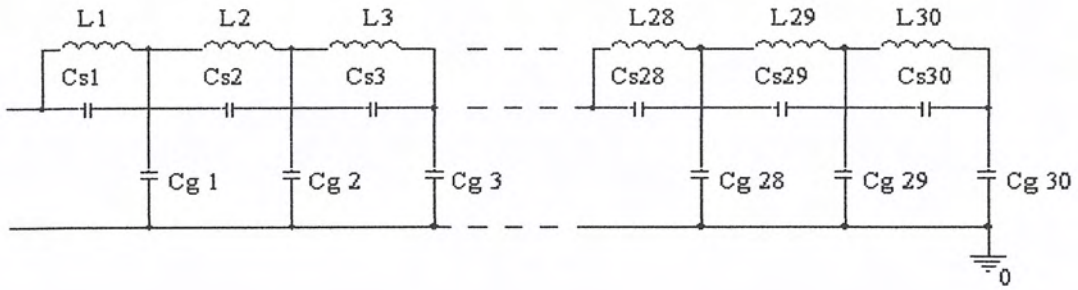
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 500 ns
กรณีมี L และ C_g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$ และ $C_s = 150 \text{ pF}$)



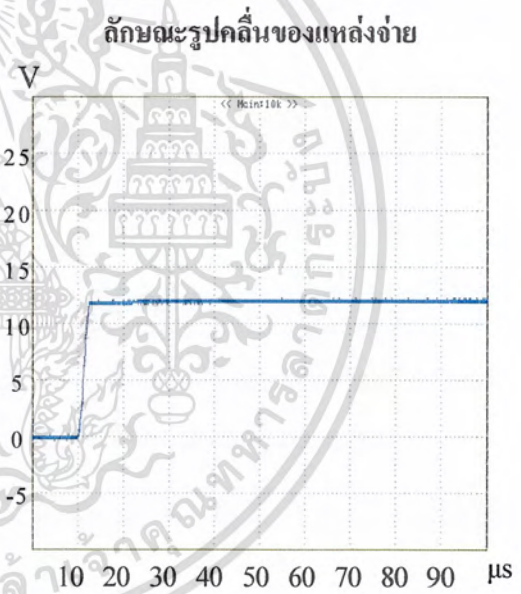
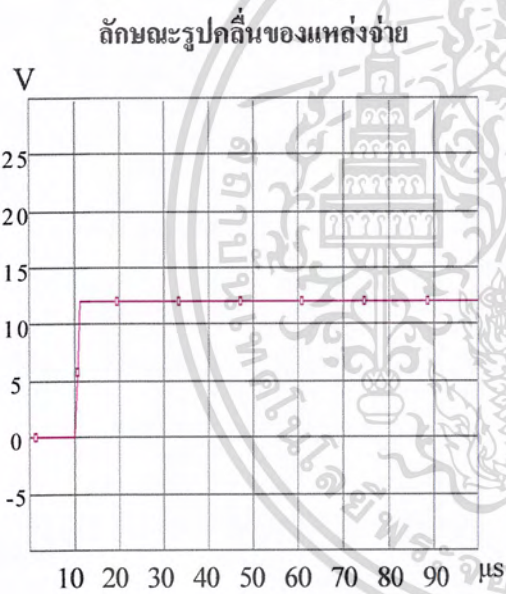
ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μs , แรงดัน 12 V

ความถี่ออสซิลเลชัน = 90.91 kHz

ความถี่ออสซิลเลชัน = 83.33 kHz

ผลจาก Simulation

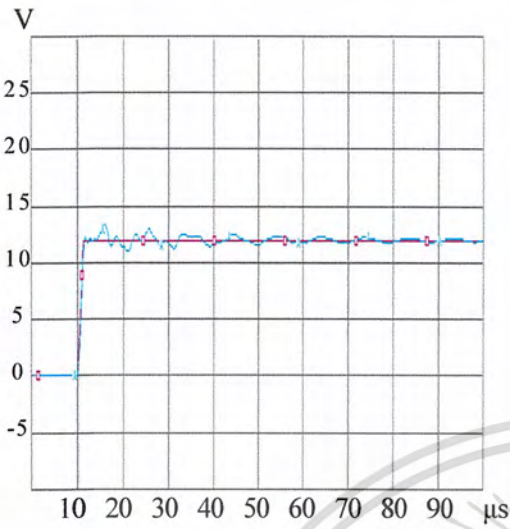
ผลจากเครื่อง Function Generator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

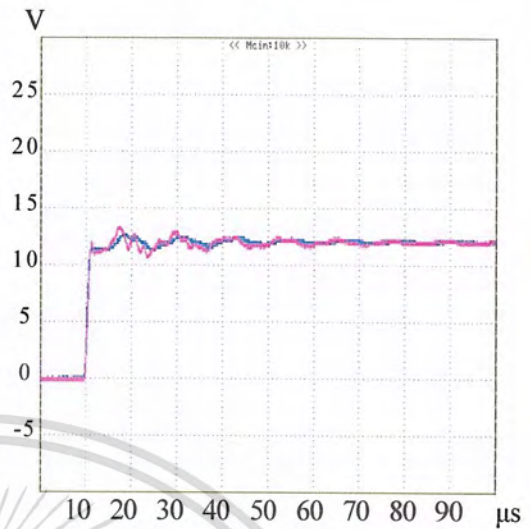
ผล Simulation

Disc ที่ 1

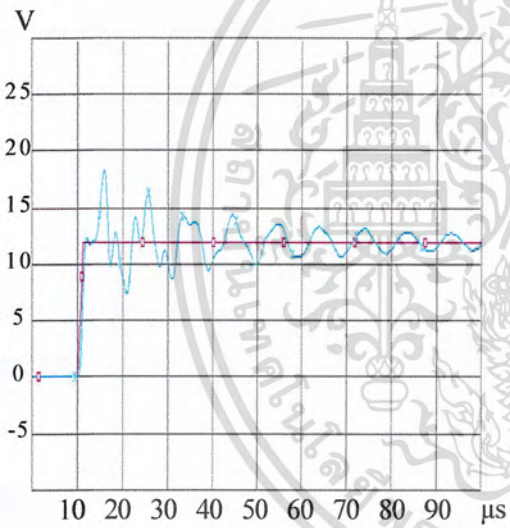


ผล Function Generator

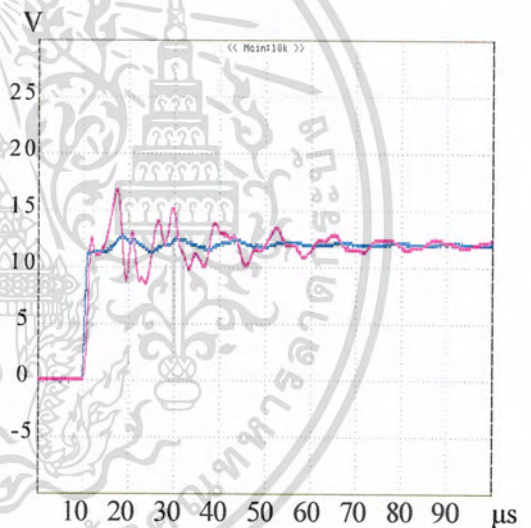
Disc ที่ 1



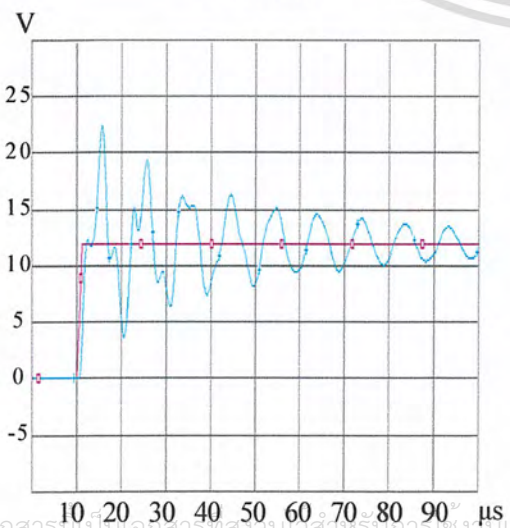
Disc ที่ 5



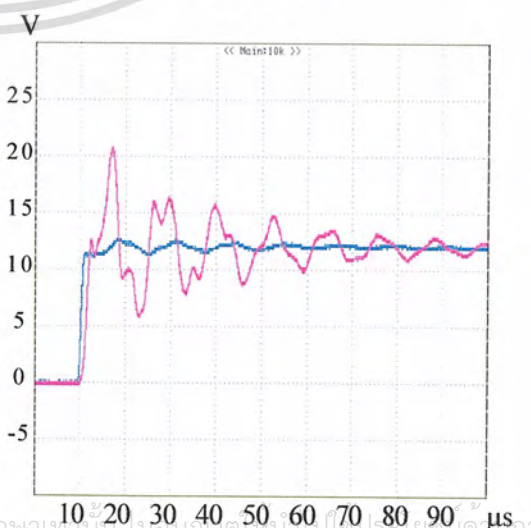
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



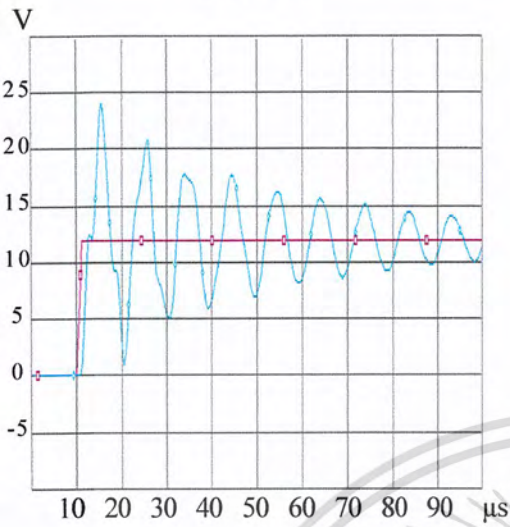
Disc ที่ 10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

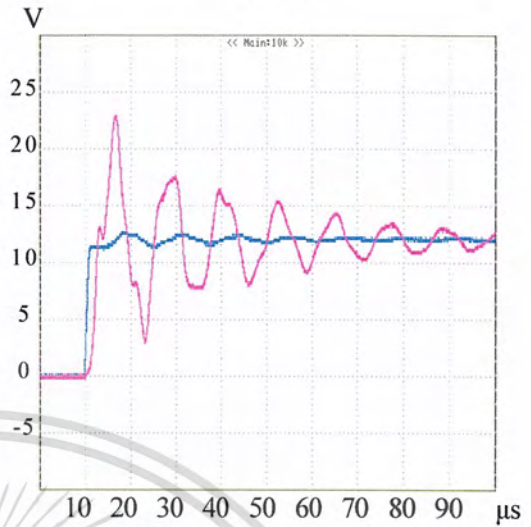
ผล Simulation

Disc ที่ 15

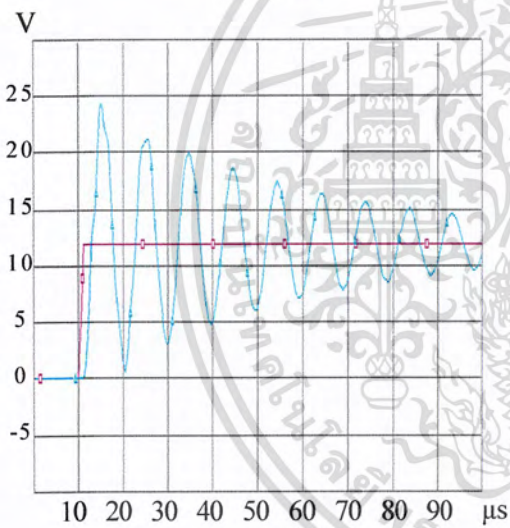


ผล Function Generator

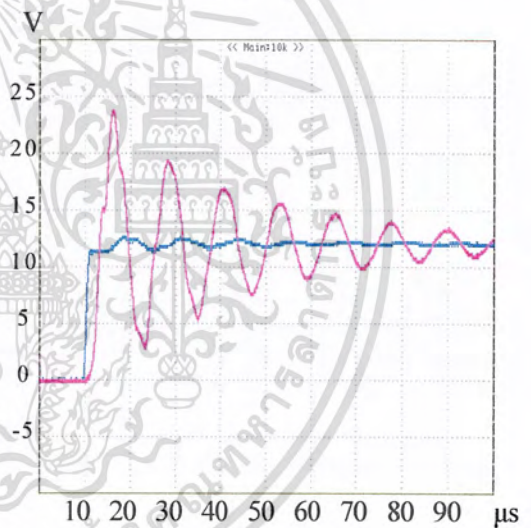
Disc ที่ 15



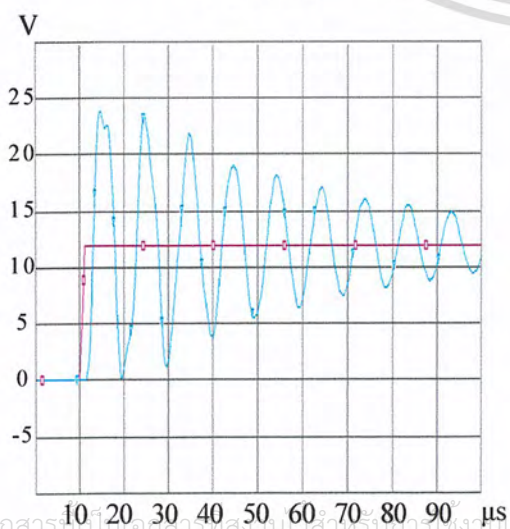
Disc ที่ 20



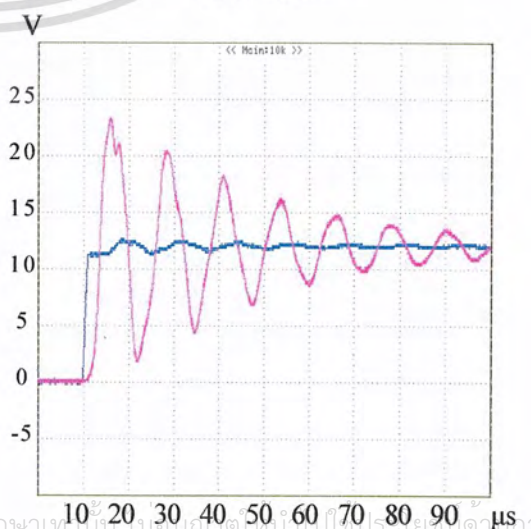
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



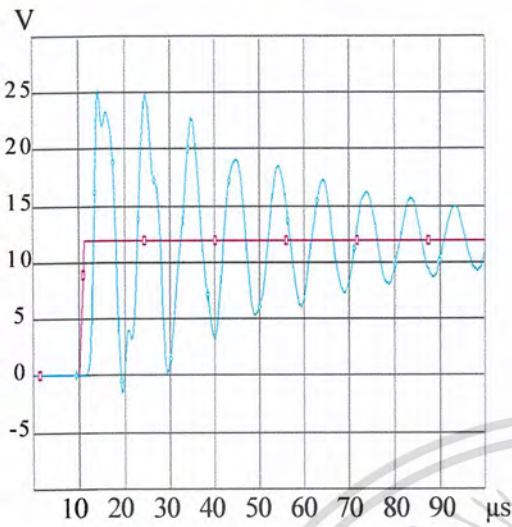
Disc ที่ 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

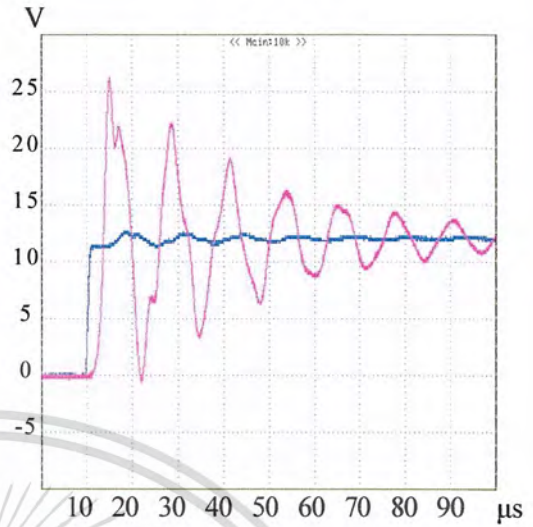
ผล Simulation

Disc ที่ 30

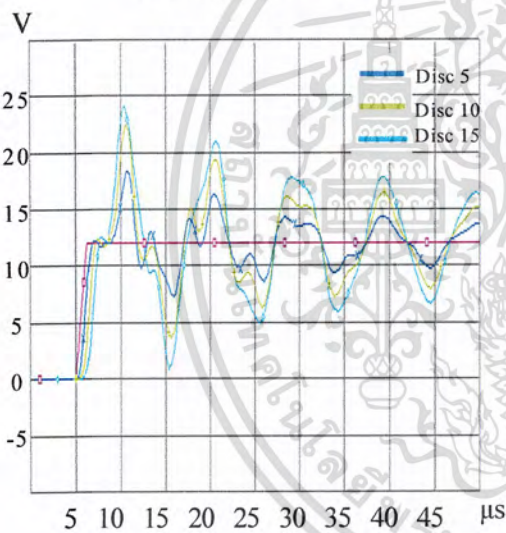


ผล Function Generator

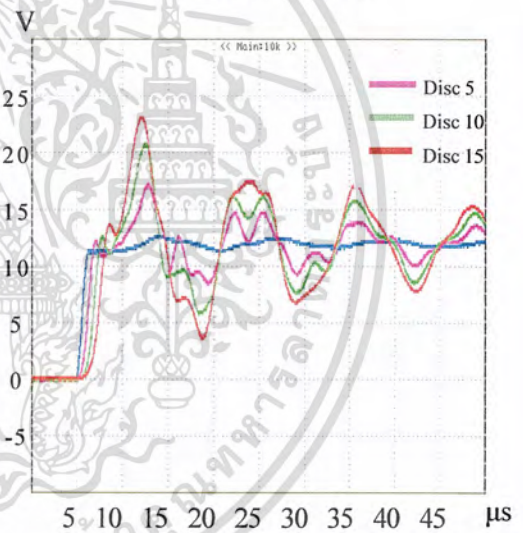
Disc ที่ 30



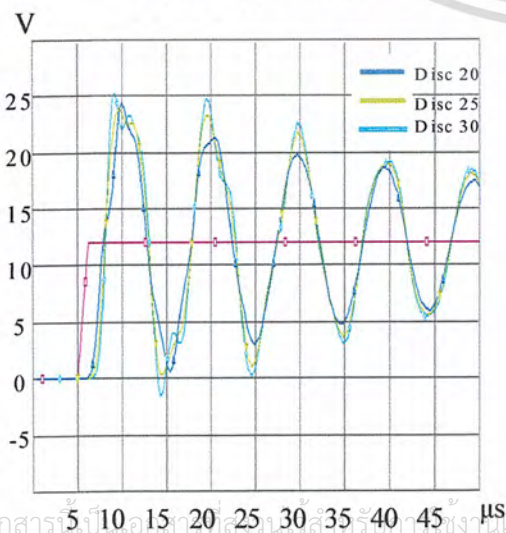
Disc ที่ 5,10 และ 15



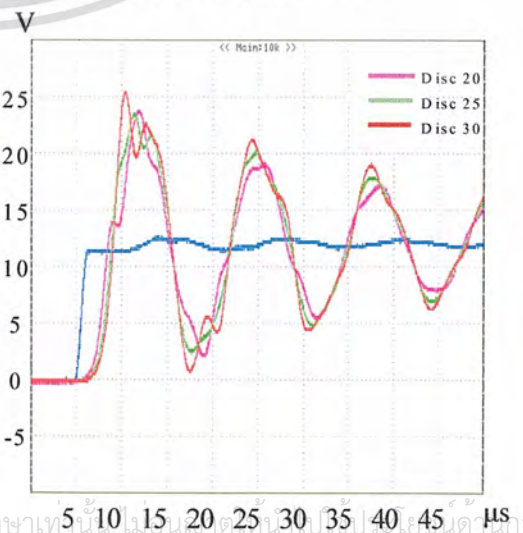
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



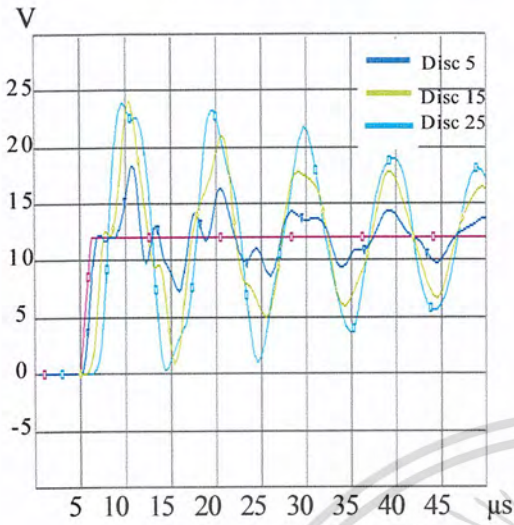
Disc ที่ 20,25 และ 30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

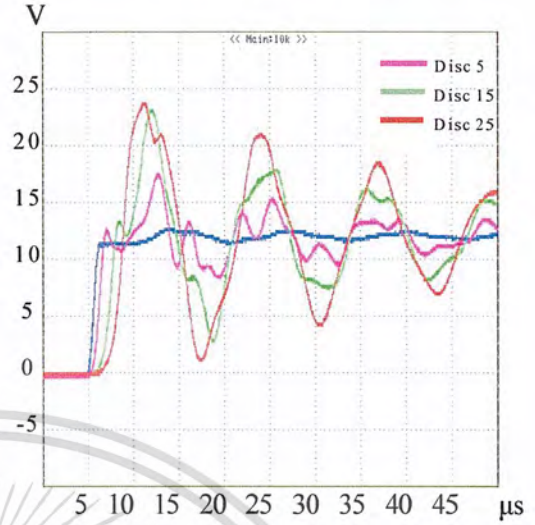
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

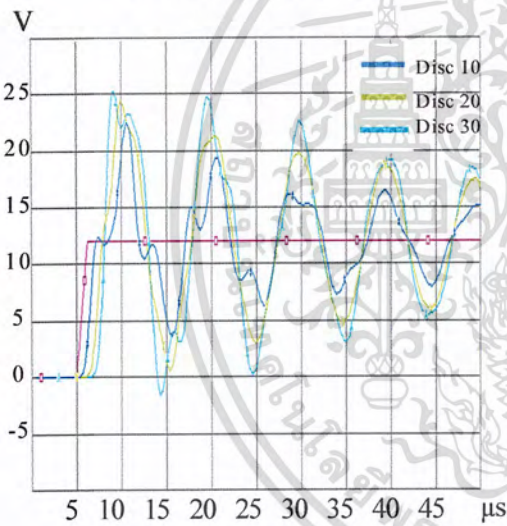


ผล Function Generator

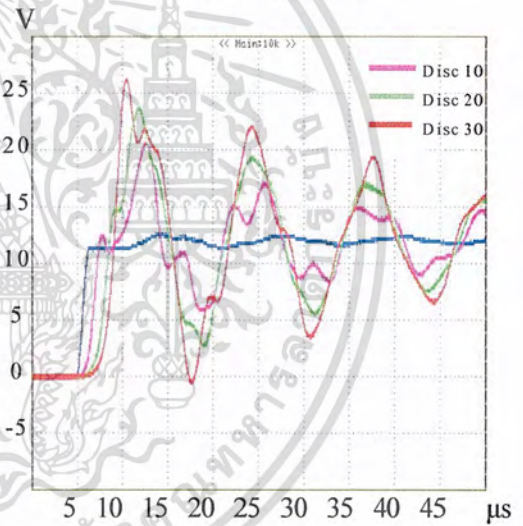
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



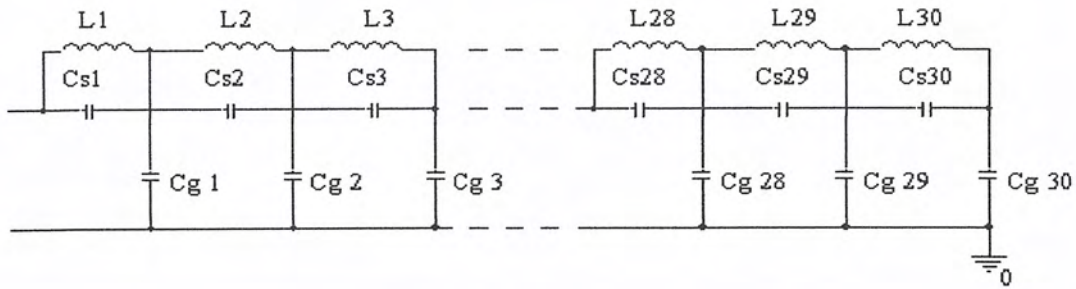
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s
กรณีมี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 150 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$ และ $C_s = 150 \text{ pF}$)



ที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns, แรงดัน 12 V

ความถี่ออสซิลเลชัน = 90.91 kHz

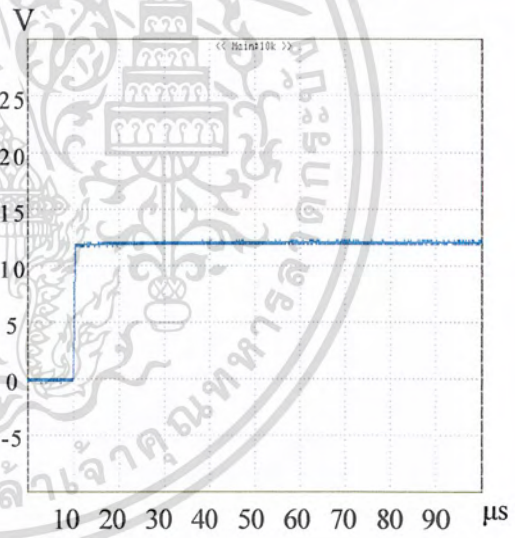
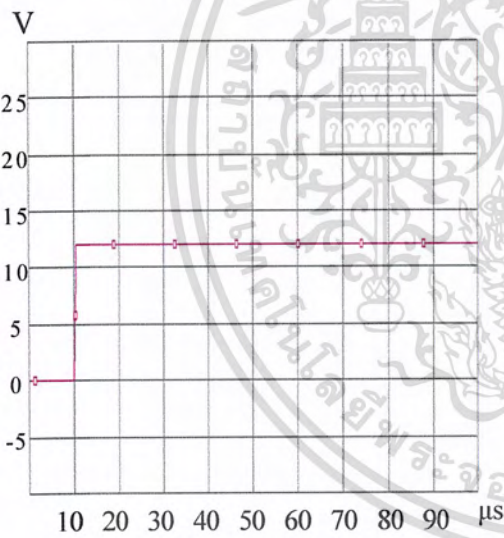
ความถี่ออสซิลเลชัน = 80.00 kHz

ผลจาก Simulation

ผลจากเครื่อง Function Generator

ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย

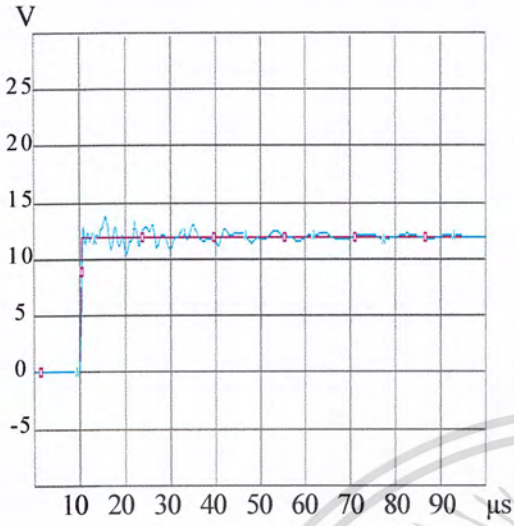
ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

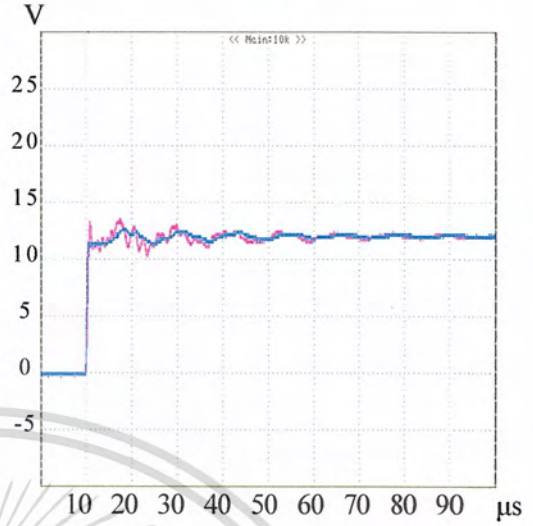
ผล Simulation

Disc ที่ 1

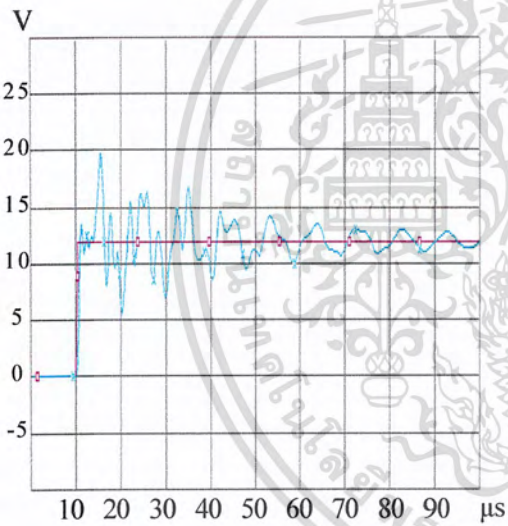


ผล Function Generator

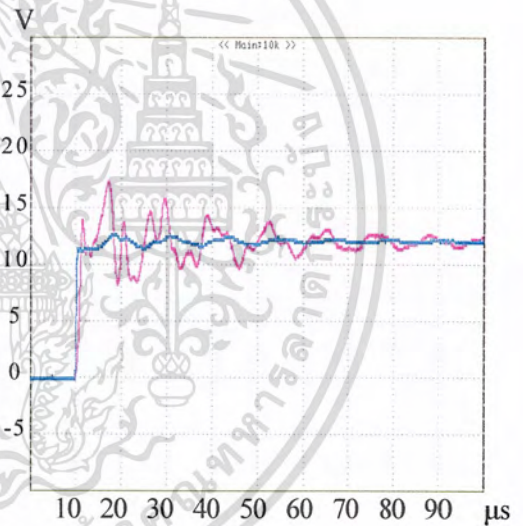
Disc ที่ 1



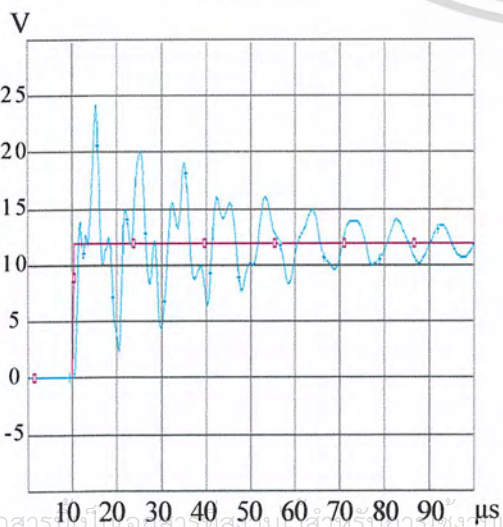
Disc ที่ 5



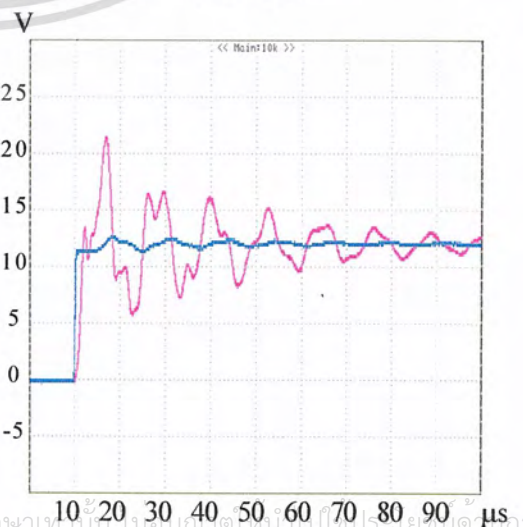
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



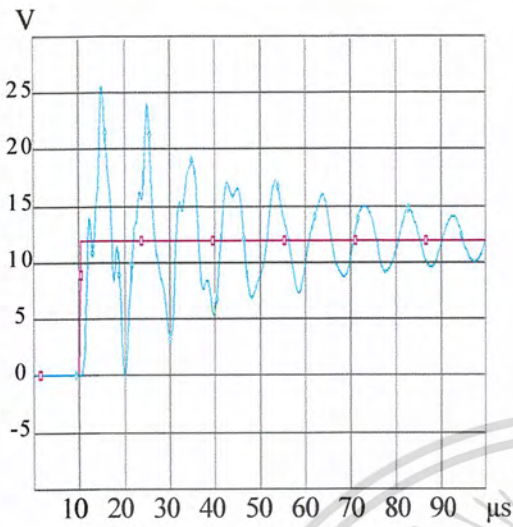
Disc ที่ 10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นการใช้ประโยชน์จากการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

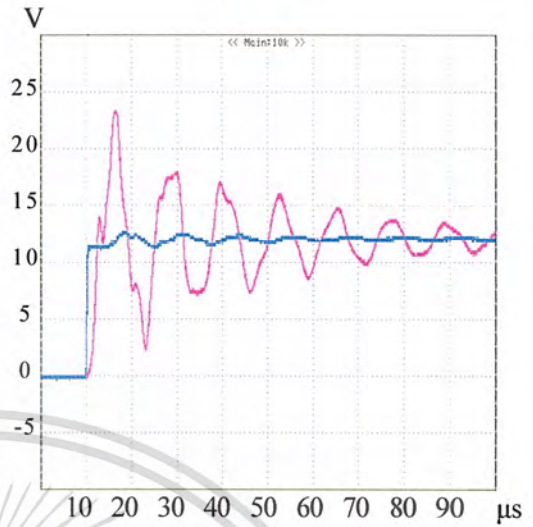
ผล Simulation

Disc ที่ 15

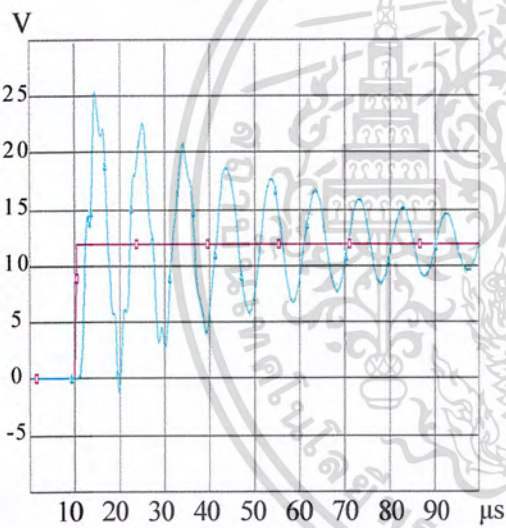


ผล Function Generator

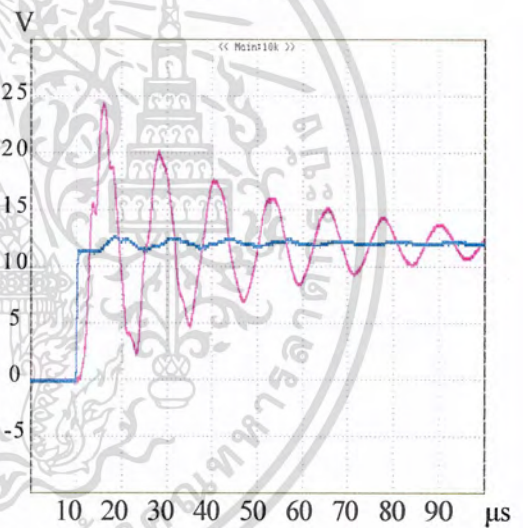
Disc ที่ 15



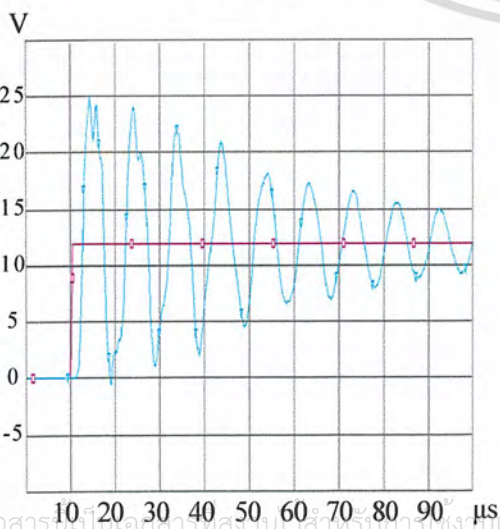
Disc ที่ 20



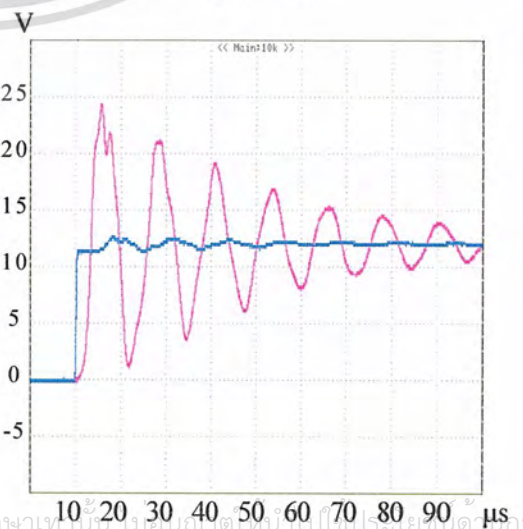
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



Disc ที่ 25

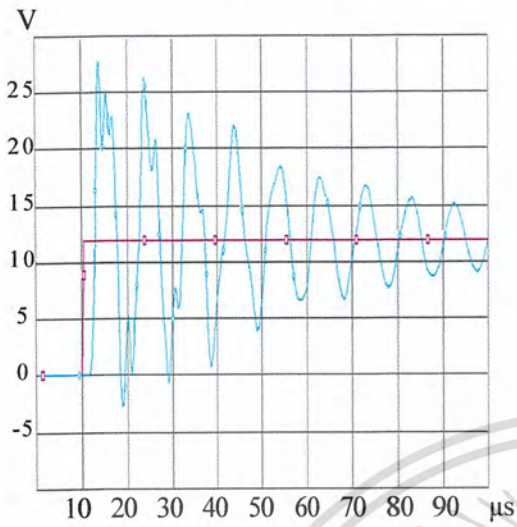


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์อื่นการค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

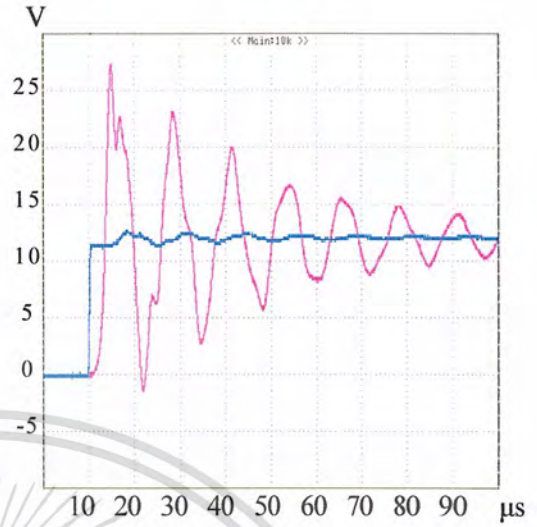
ผล Simulation

Disc ที่ 30

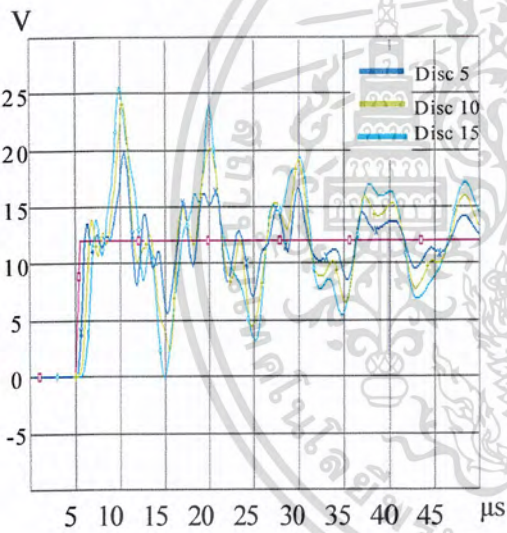


ผล Function Generator

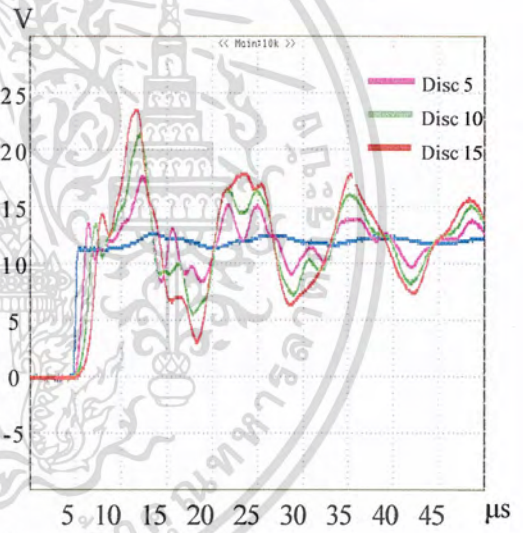
Disc ที่ 30



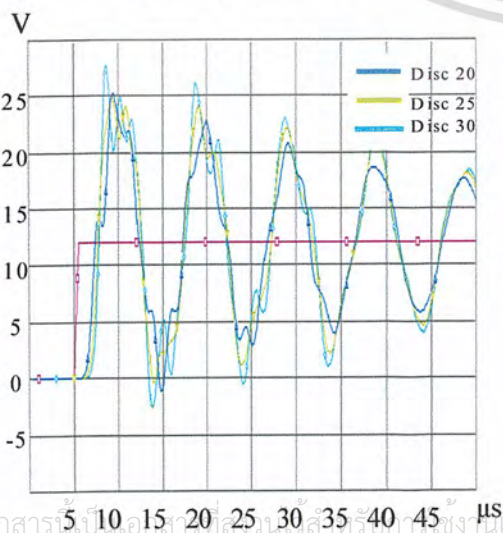
Disc ที่ 5,10 และ 15



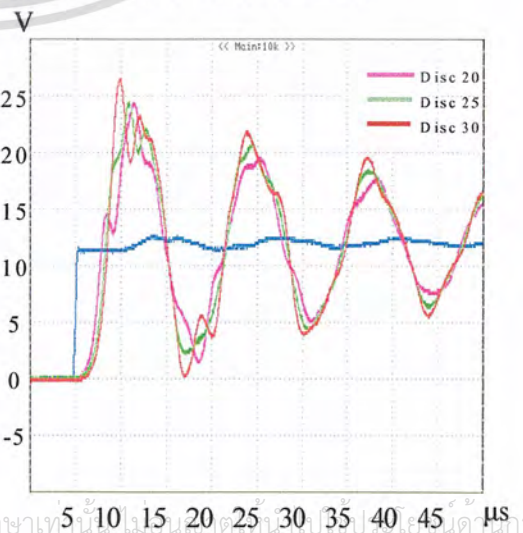
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



Disc ที่ 20,25 และ 30

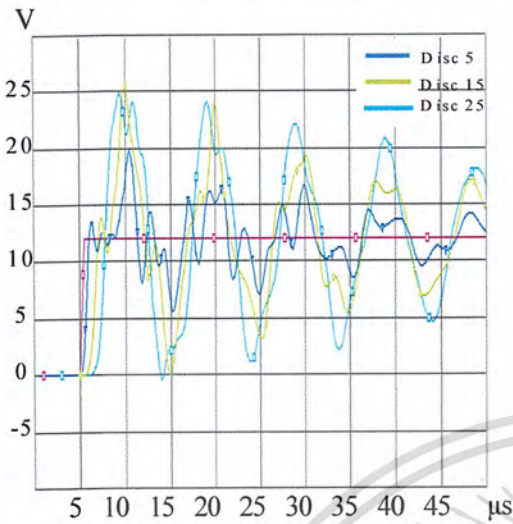


เอกสารฉบับนี้อาจมีข้อผิดพลาดในส่วนใดส่วนหนึ่ง ซึ่งในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการตัดสินใจใดๆ ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

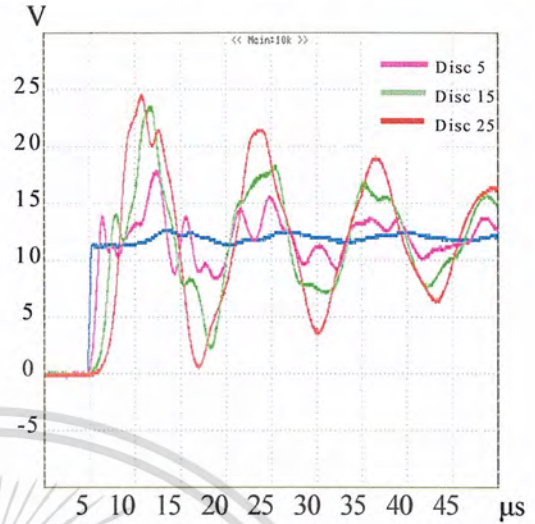
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

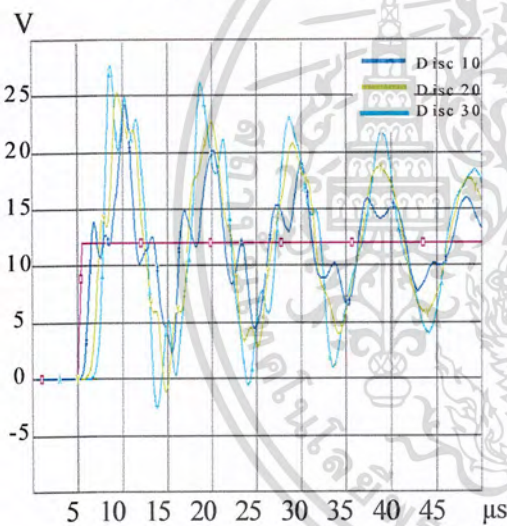


ผล Function Generator

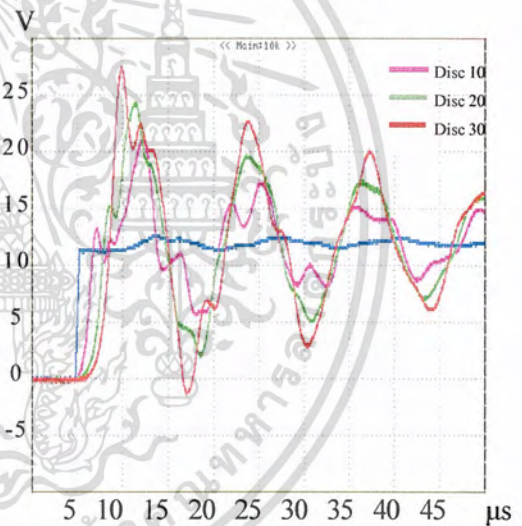
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



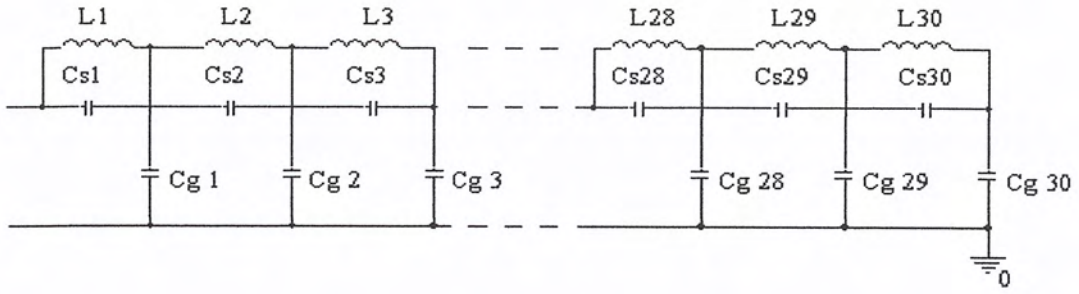
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 500 ns
กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 150 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$ และ $C_s = 3200 \text{ pF}$)



ที่ความชันหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s}$, แรงดัน 12 V

ความถี่ออสซิลเลชัน = 90.91 kHz

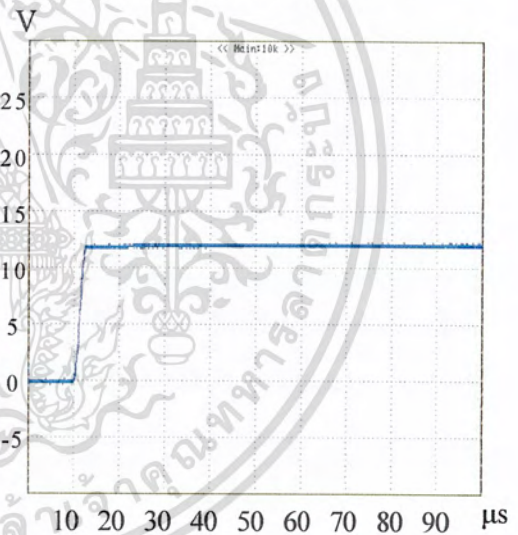
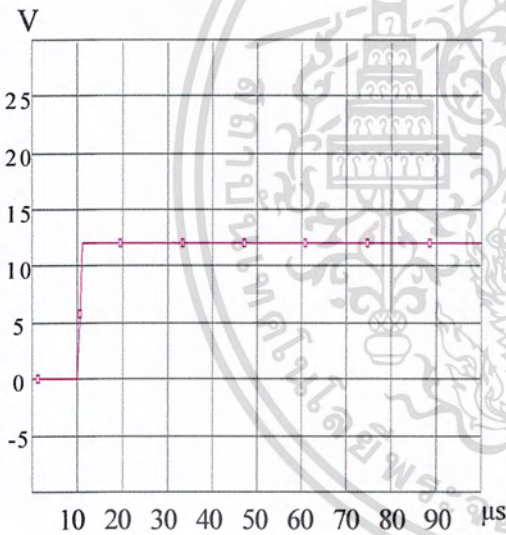
ความถี่ออสซิลเลชัน = 83.33 kHz

ผลจาก Simulation

ผลจากเครื่อง Function Generator

ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย

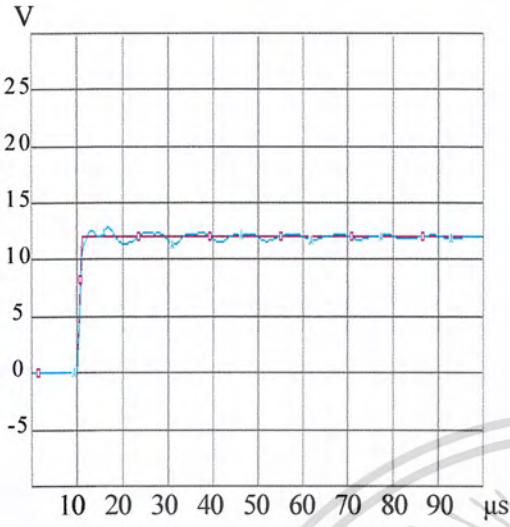
ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

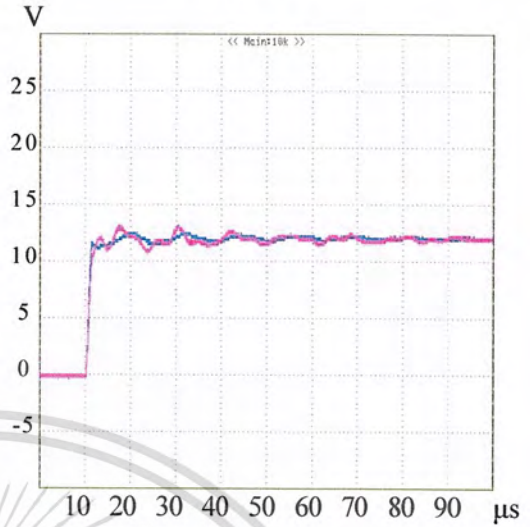
ผล Simulation

Disc ที่ 1

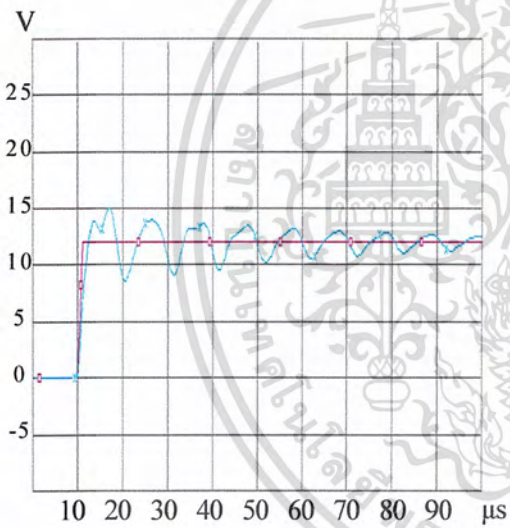


ผล Function Generator

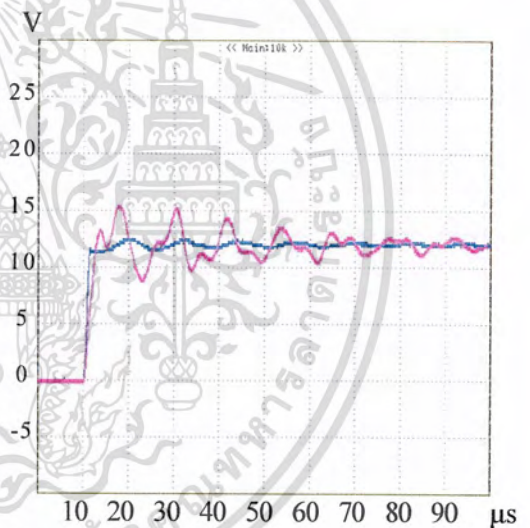
Disc ที่ 1



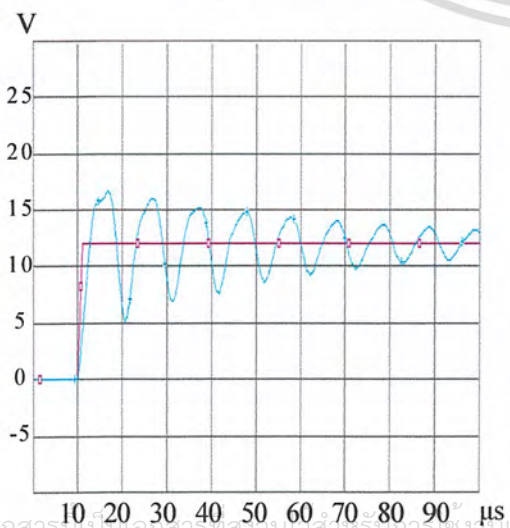
Disc ที่ 5



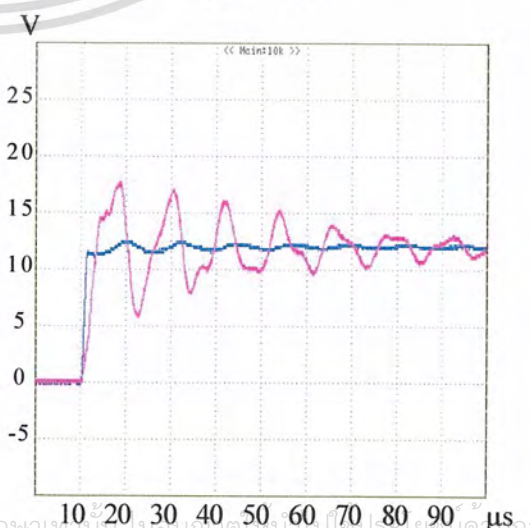
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



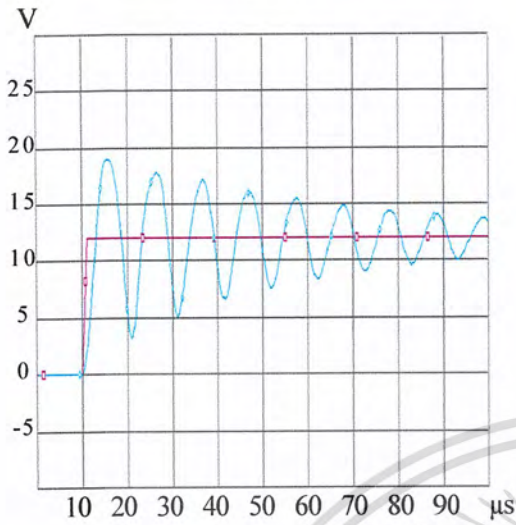
Disc ที่ 10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

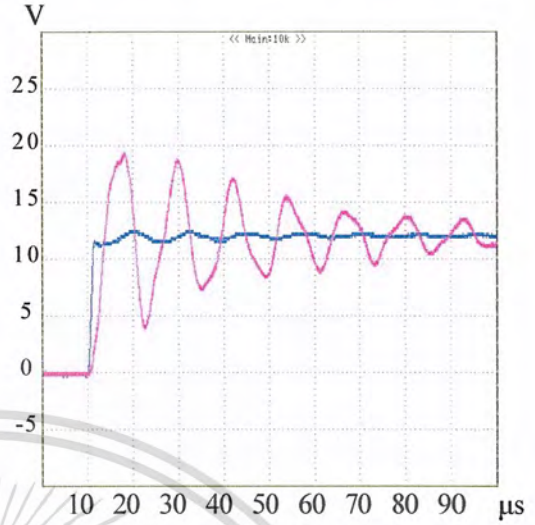
ผล Simulation

Disc ที่ 15

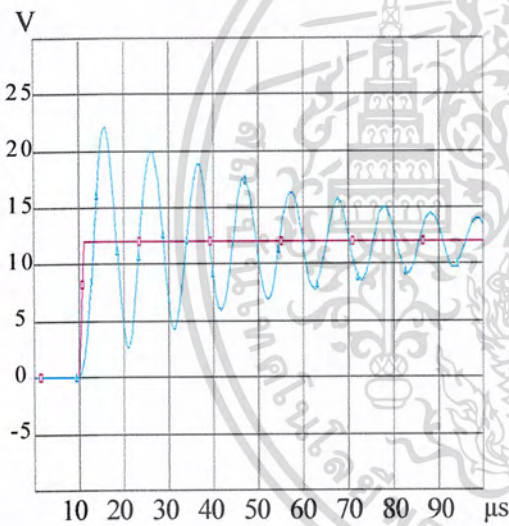


ผล Function Generator

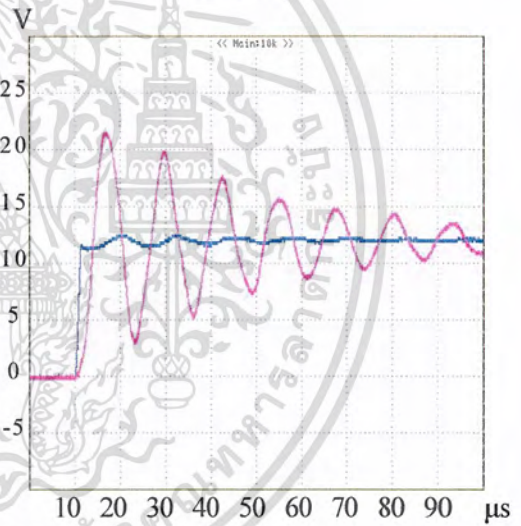
Disc ที่ 15



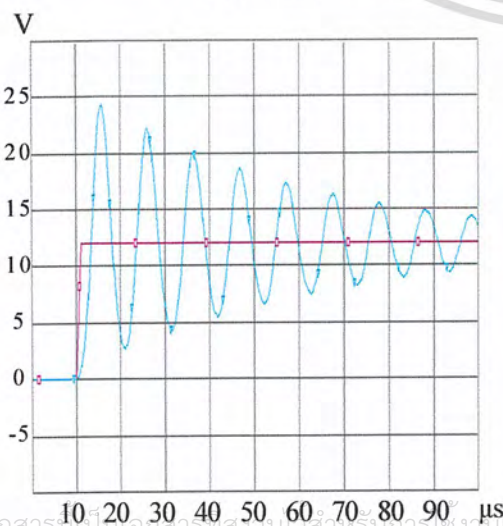
Disc ที่ 20



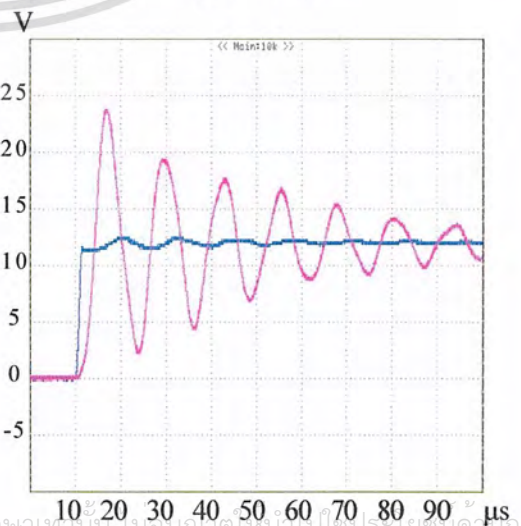
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



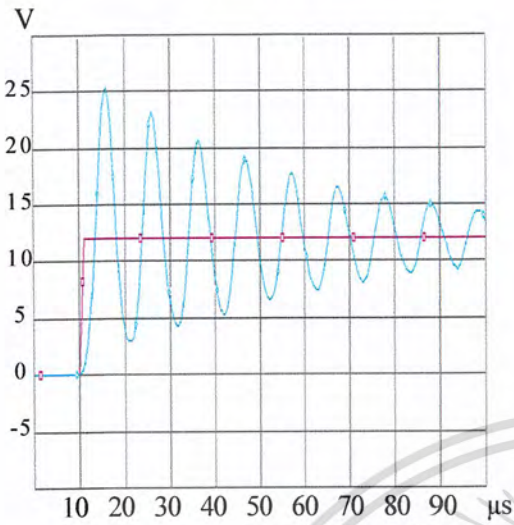
Disc ที่ 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

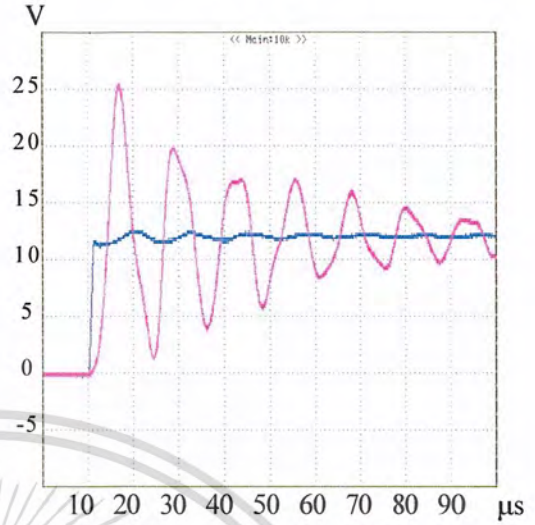
ผล Simulation

Disc ที่ 30

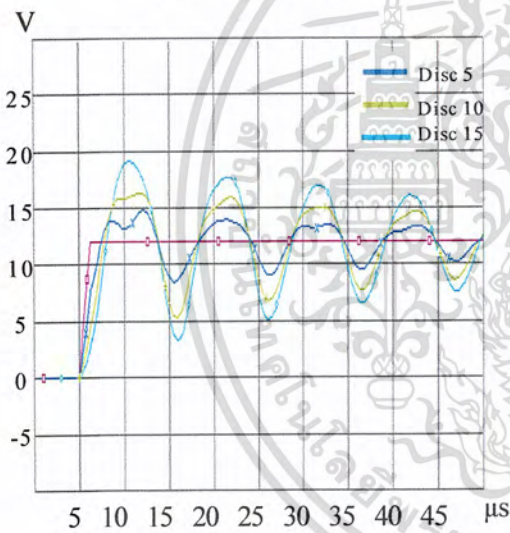


ผล Function Generator

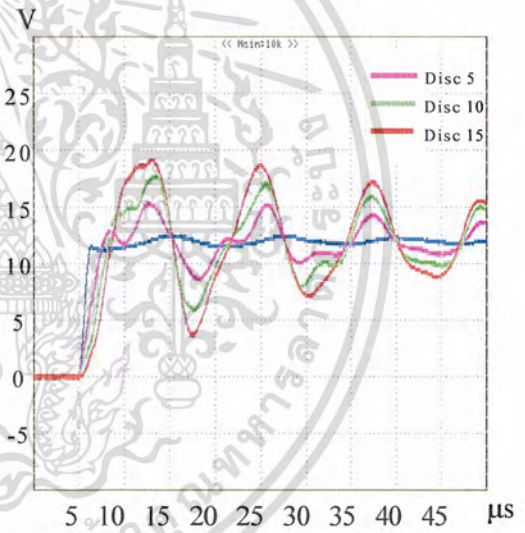
Disc ที่ 30



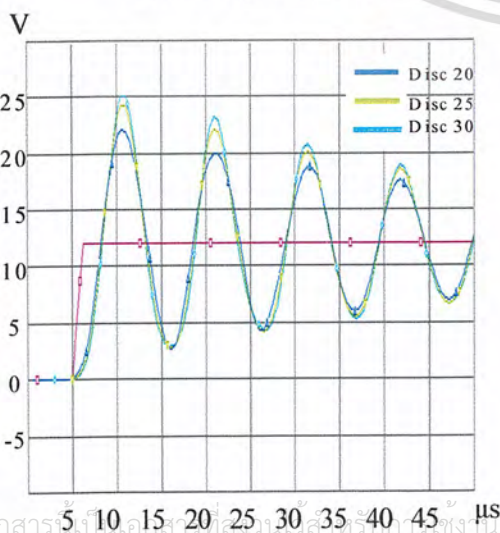
Disc ที่ 5,10 และ 15



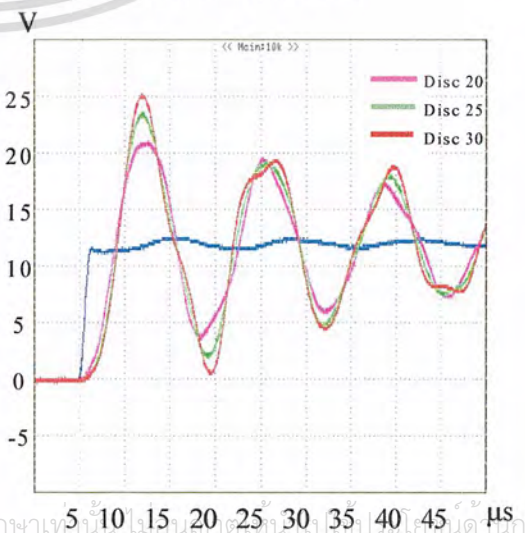
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



Disc ที่ 20,25 และ 30

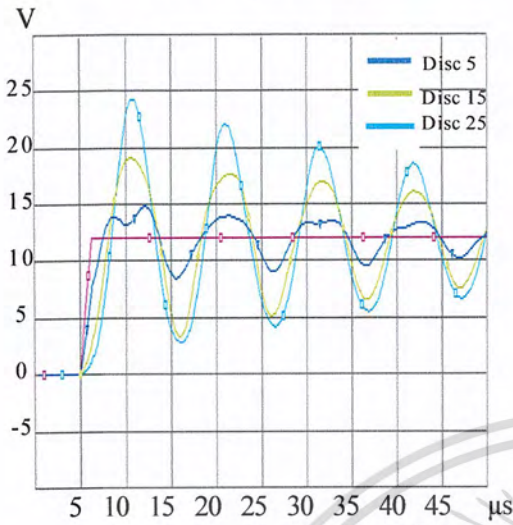


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

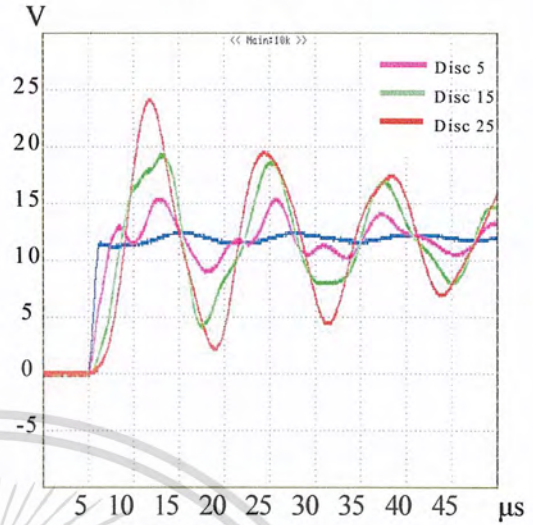
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

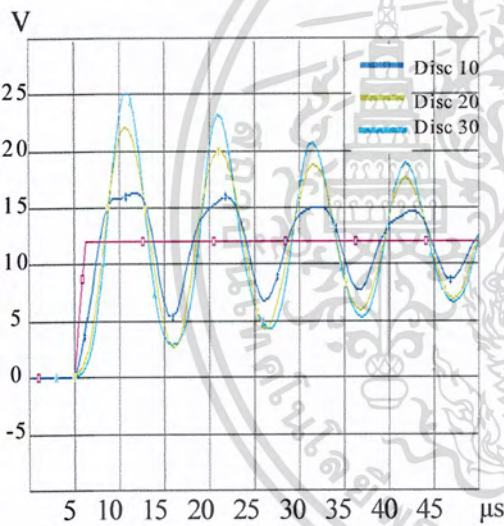


ผล Function Generator

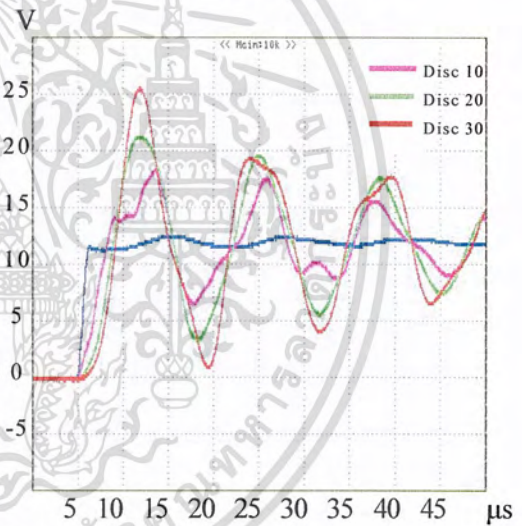
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



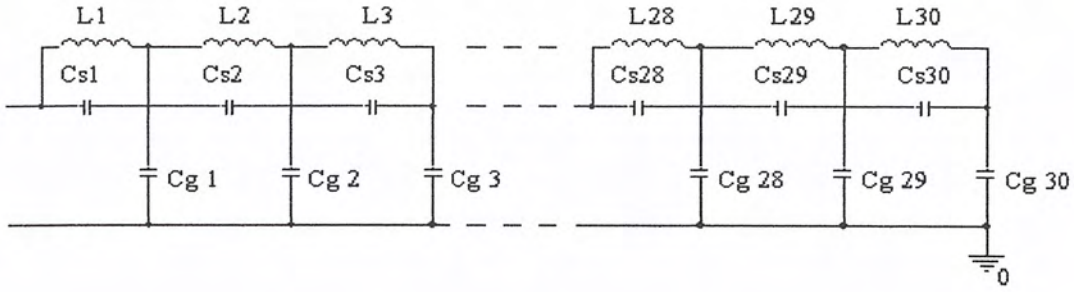
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s
 กรณี L, C_p และ C_s โดย C_s มีค่า 3200 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$ และ $C_s = 3200 \text{ pF}$)



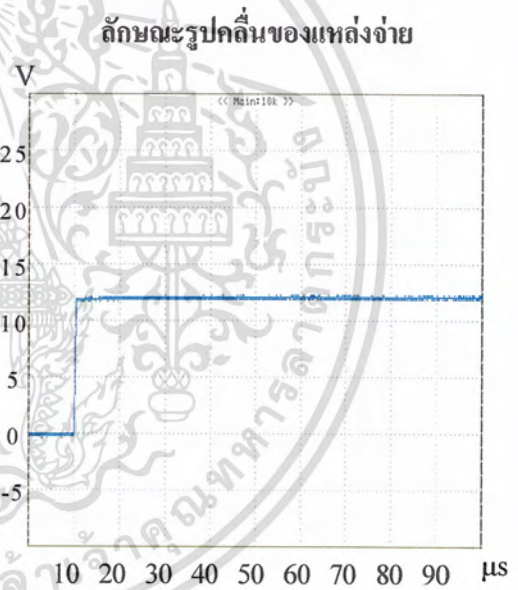
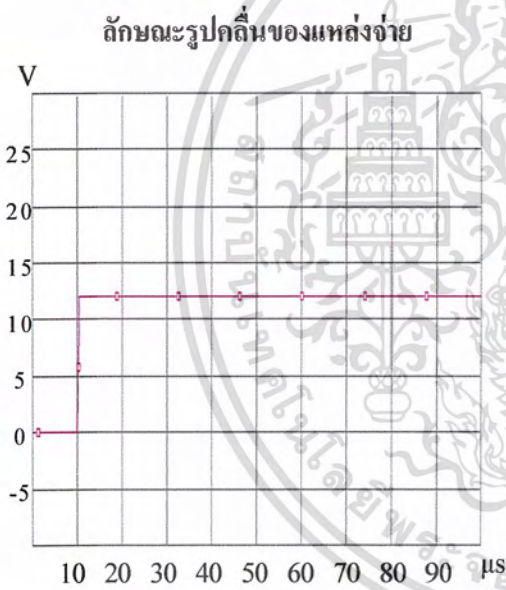
ที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns, แรงดัน 12 V

ความถี่ออสซิลเลชัน = 90.91 kHz

ความถี่ออสซิลเลชัน = 80.00 kHz

ผลจาก Simulation

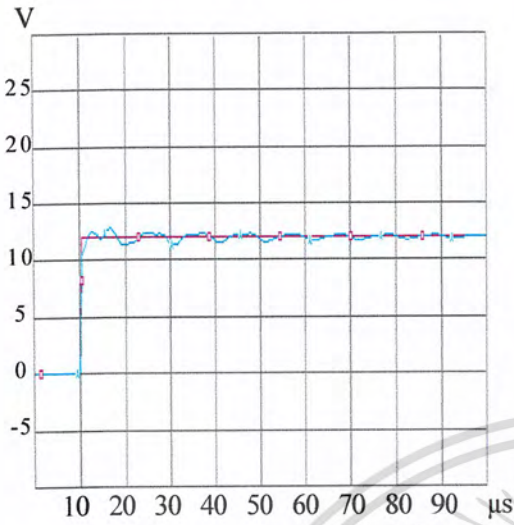
ผลจากเครื่อง Function Generator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

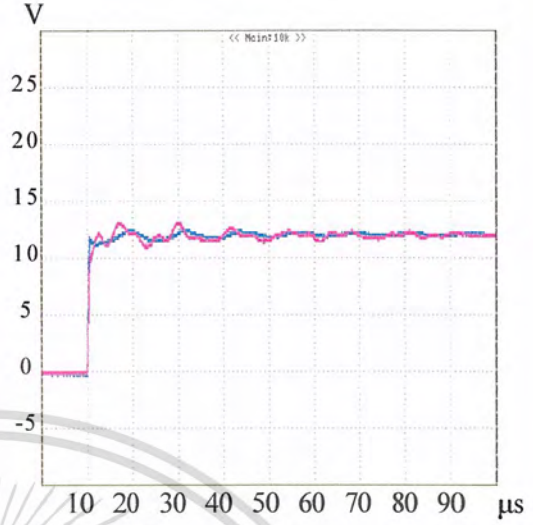
ผล Simulation

Disc ที่ 1

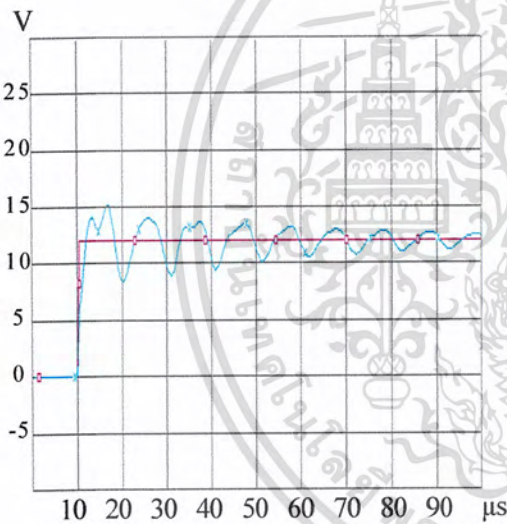


ผล Function Generator

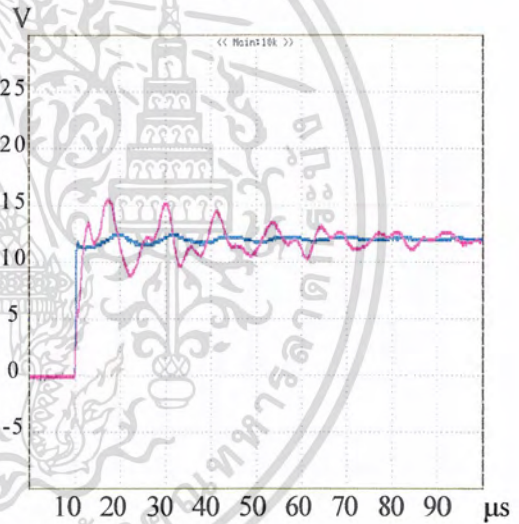
Disc ที่ 1



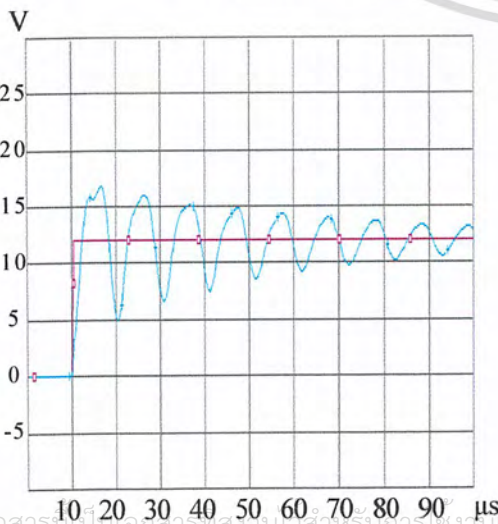
Disc ที่ 5



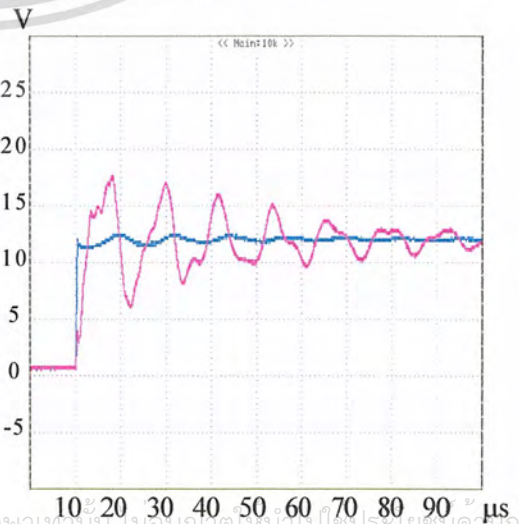
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



Disc ที่ 10

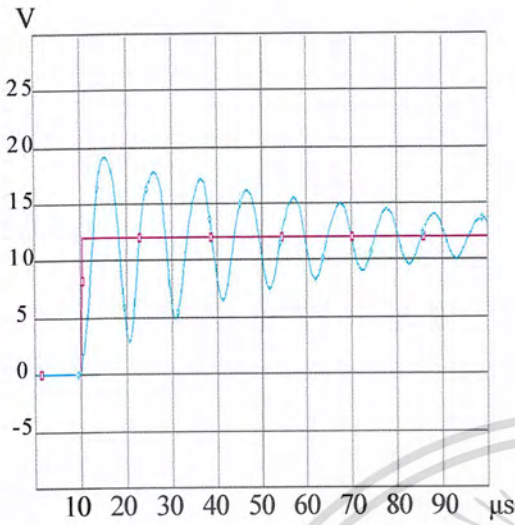


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นการค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

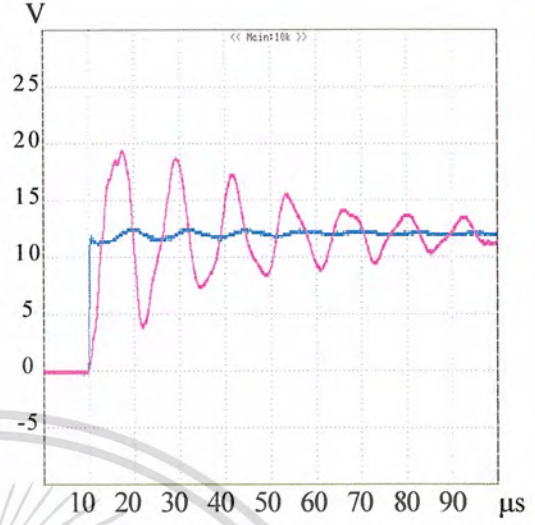
ผล Simulation

Disc ที่ 15

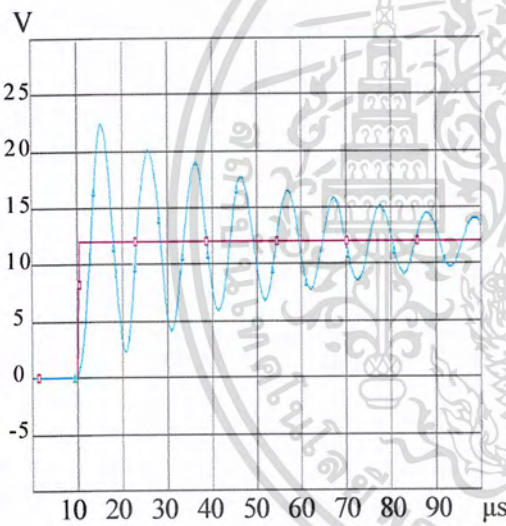


ผล Function Generator

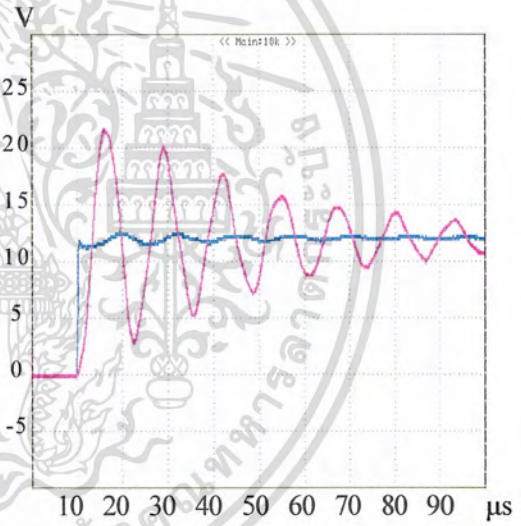
Disc ที่ 15



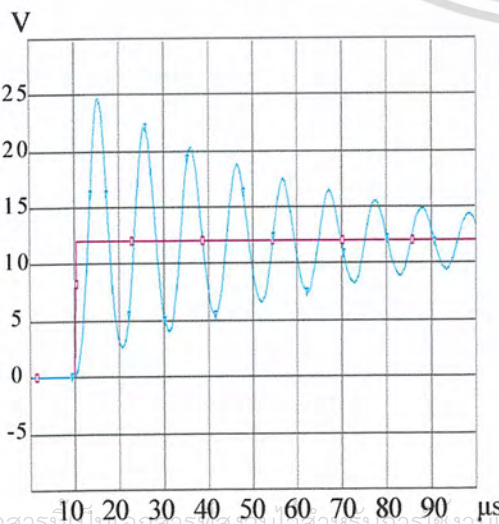
Disc ที่ 20



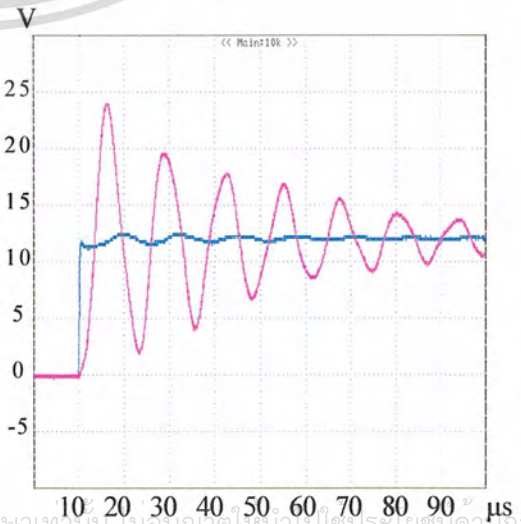
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



Disc ที่ 25

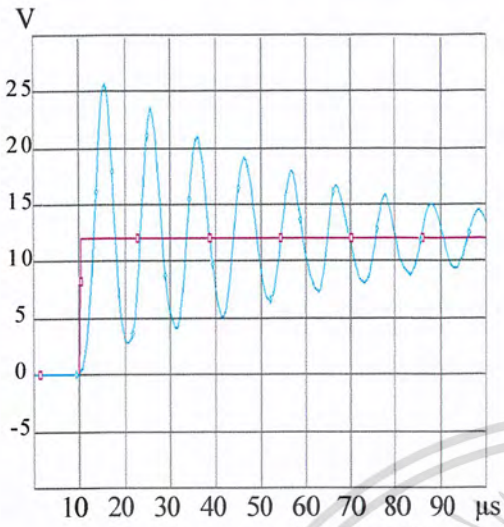


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

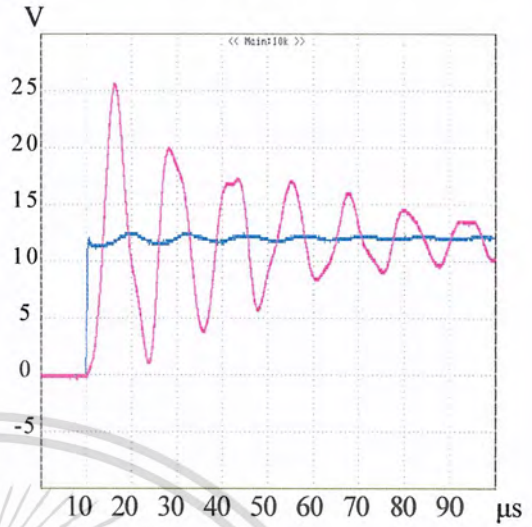
ผล Simulation

Disc ที่ 30

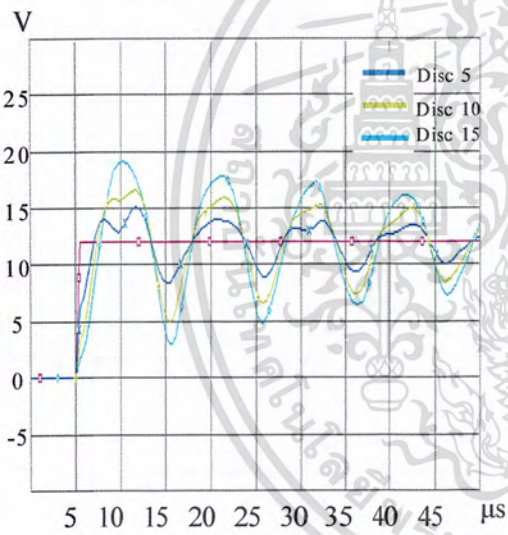


ผล Function Generator

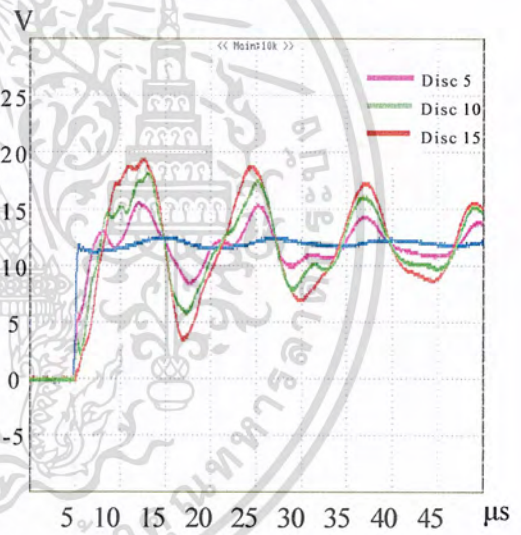
Disc ที่ 30



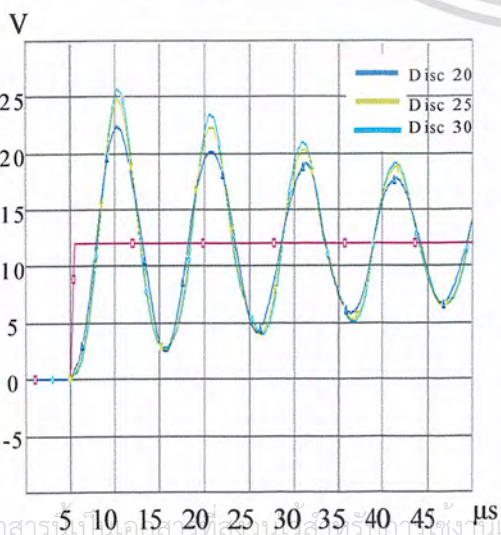
Disc ที่ 5,10 และ 15



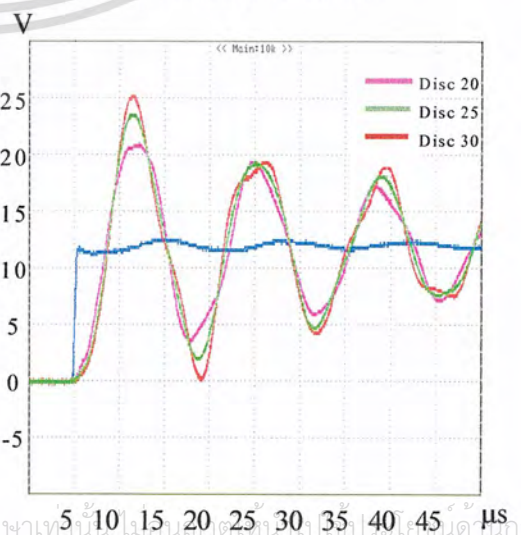
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



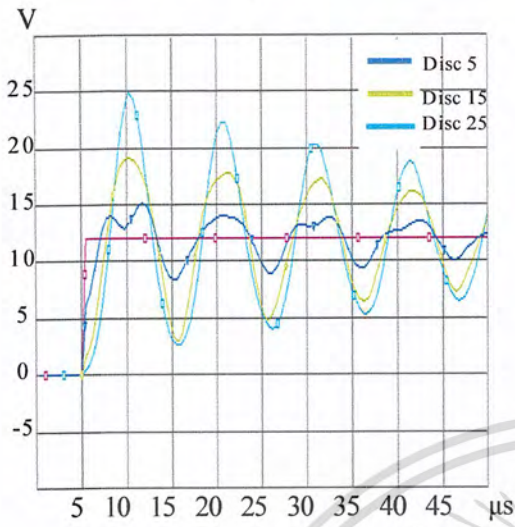
Disc ที่ 20,25 และ 30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

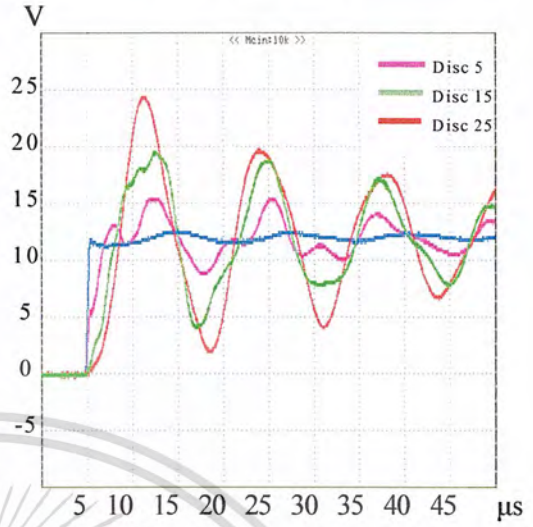
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

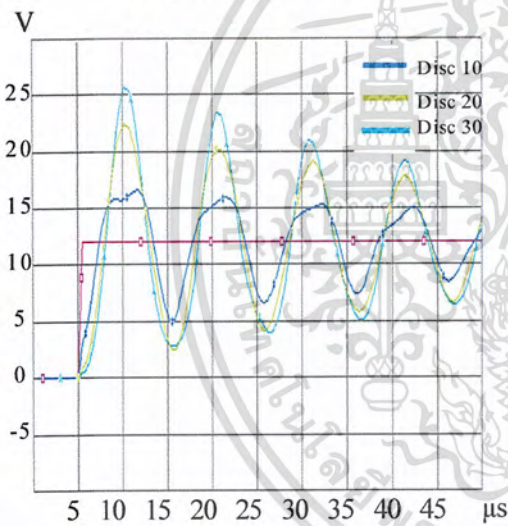


ผล Function Generator

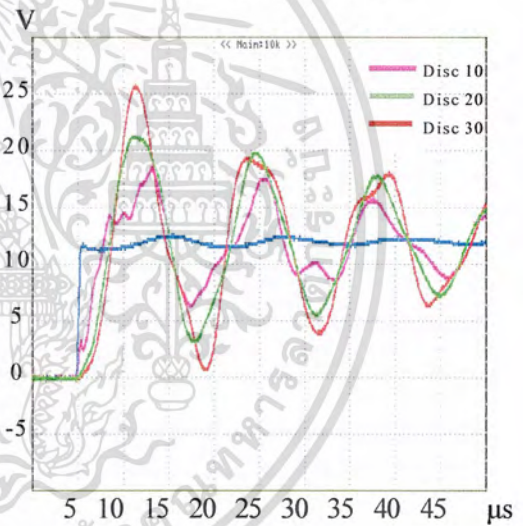
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



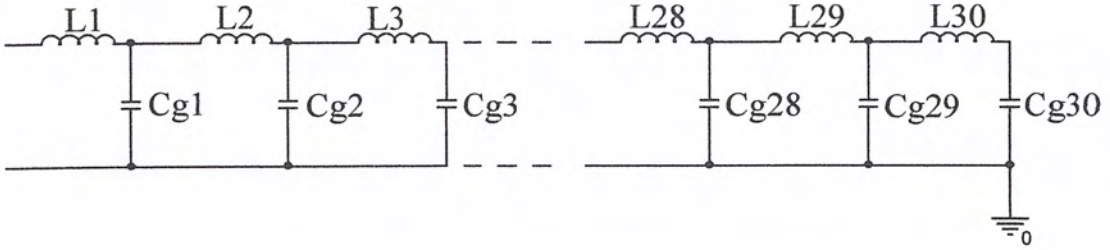
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Function Generator ที่หน้าคลื่น 500 ns
กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 3200 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่าง ผลจาก Simulation กับผลจากวงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge
 ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$)



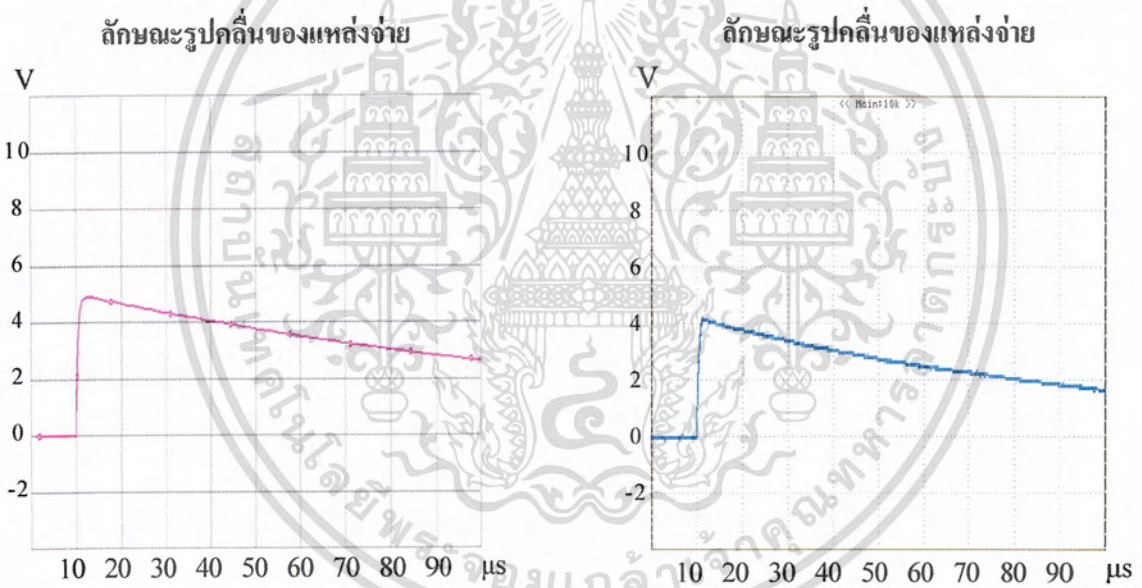
ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μs , แรงดัน 5 V

ความถี่ออสซิลเลชัน = 111.11 kHz

ความถี่ออสซิลเลชัน = 111.76 kHz

ผลจาก Simulation

ผลจาก วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

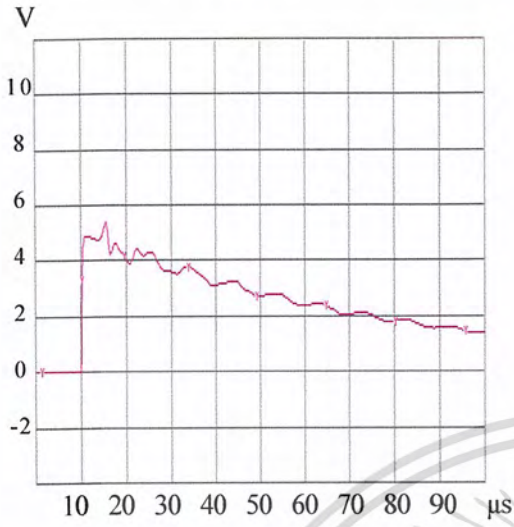


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

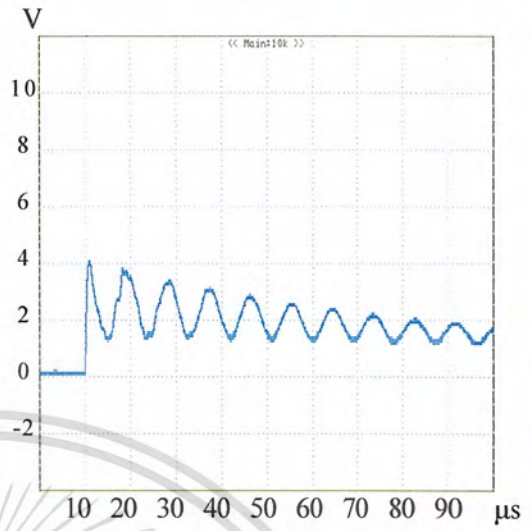
ผล Simulation

ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

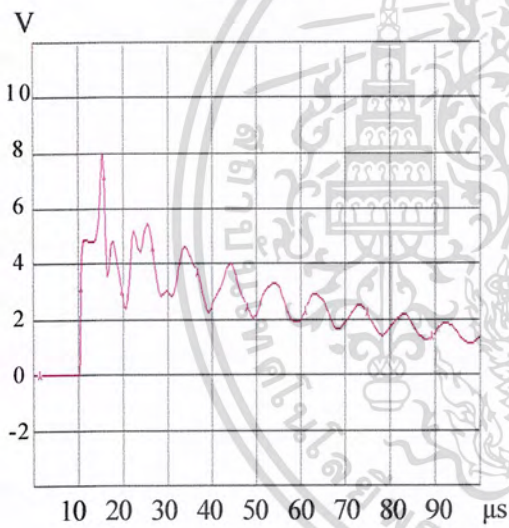
Disc ที่ 1



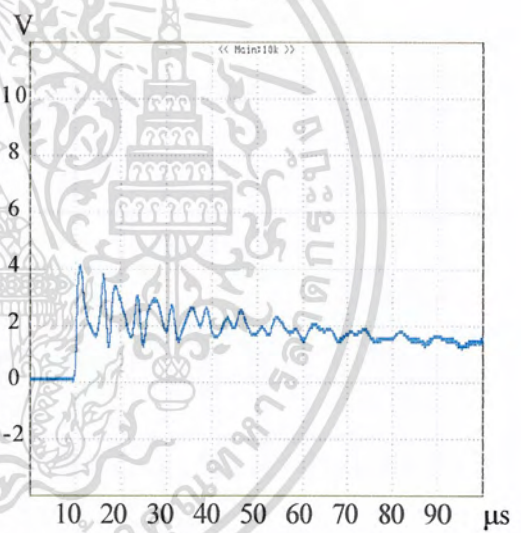
Disc ที่ 1



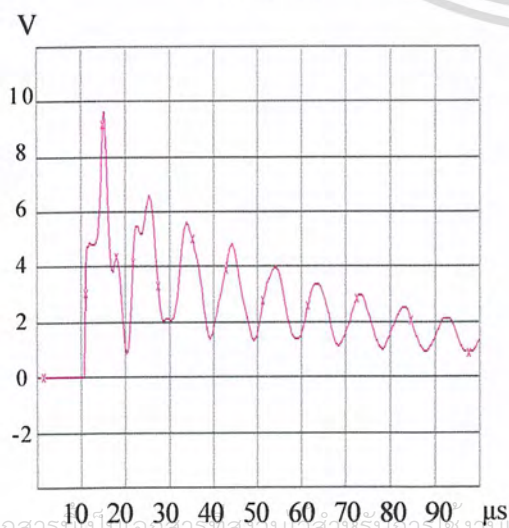
Disc ที่ 5



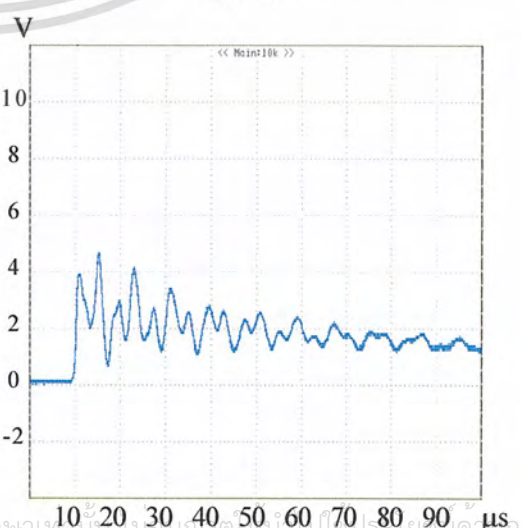
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



Disc ที่ 10

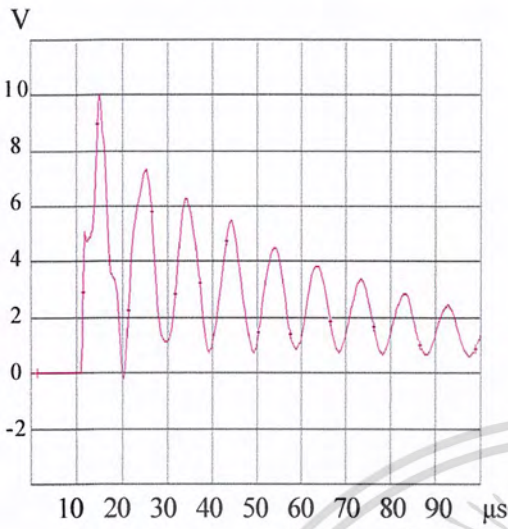


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อคุณผู้จัดทำนำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

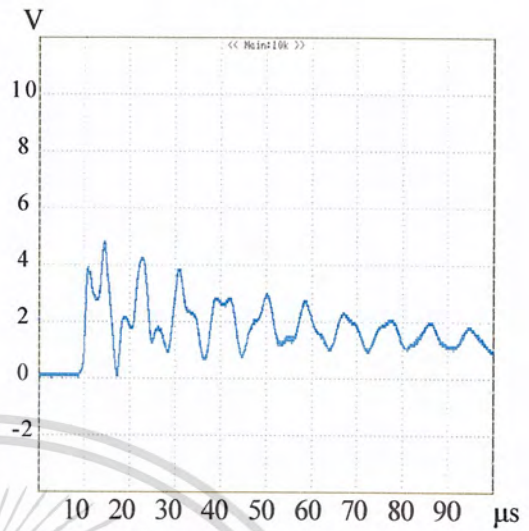
ผล Simulation

Disc ที่ 15

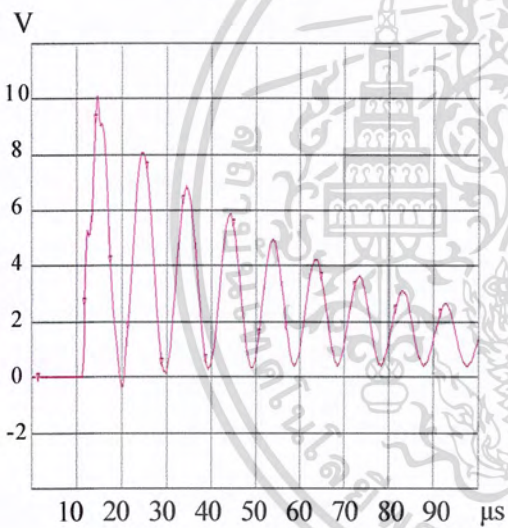


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

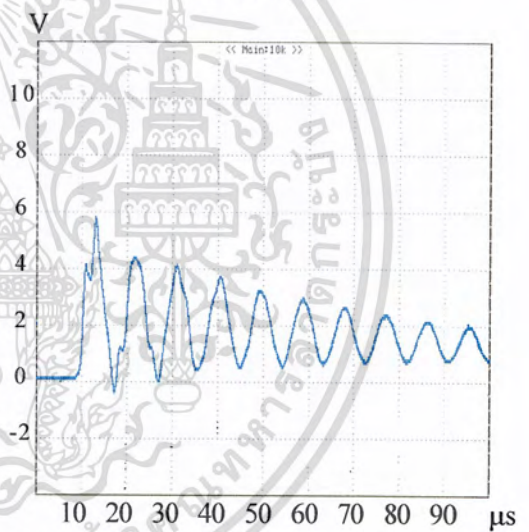
Disc ที่ 15



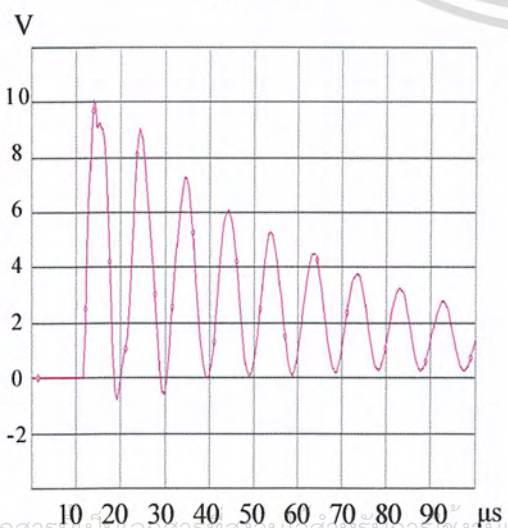
Disc ที่ 20



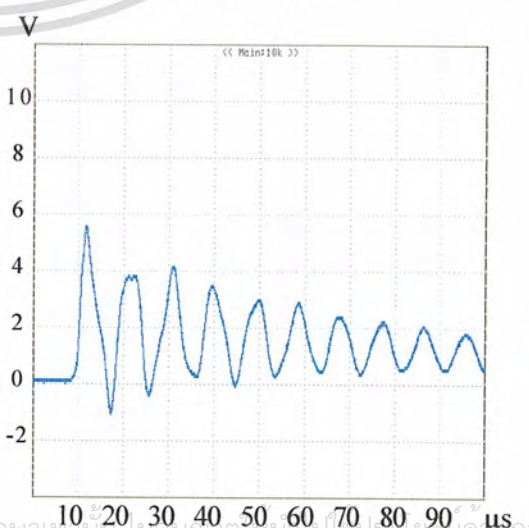
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



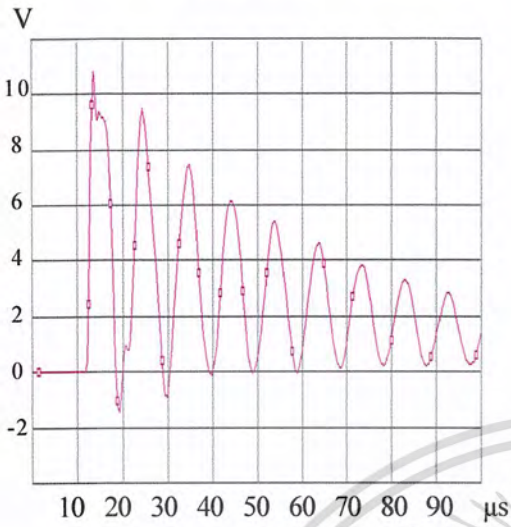
Disc ที่ 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

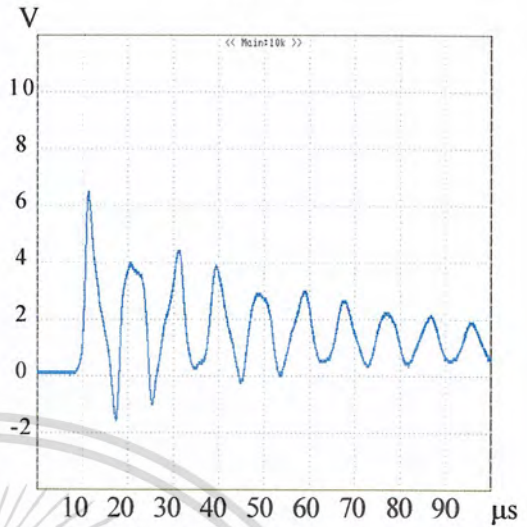
ผล Simulation

Disc ที่ 30

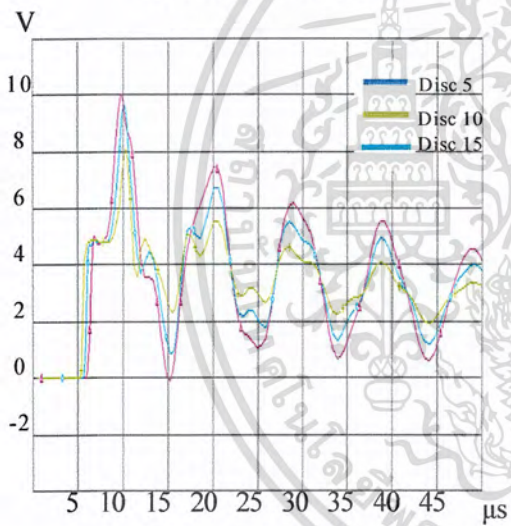


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

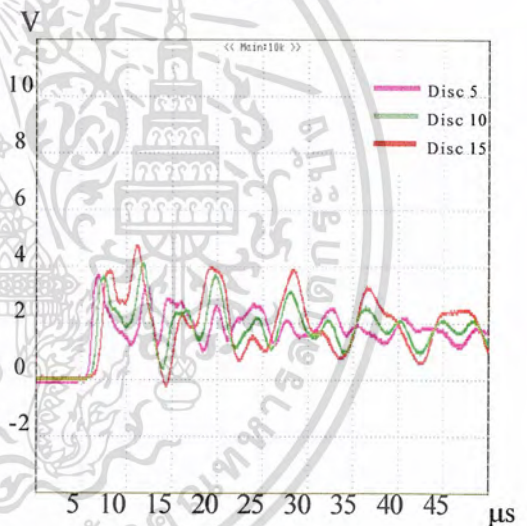
Disc ที่ 30



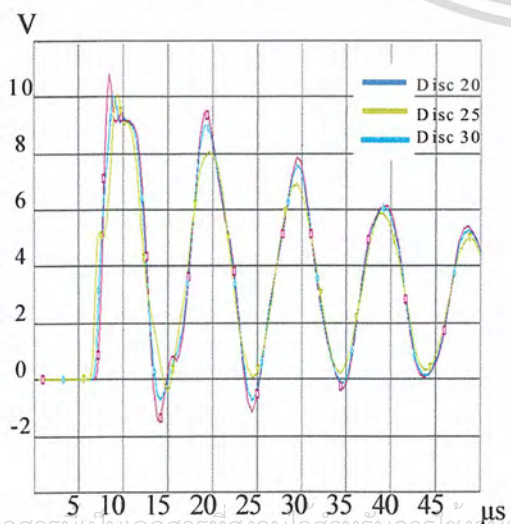
Disc ที่ 5,10 และ 15



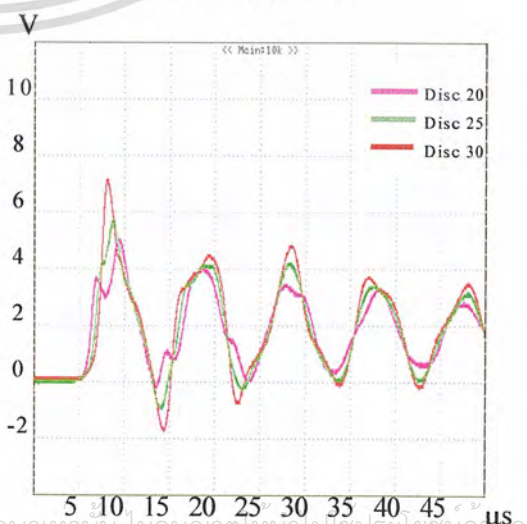
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



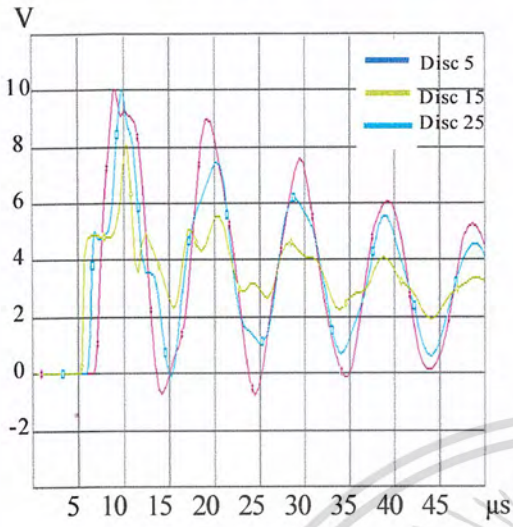
Disc ที่ 20,25 และ 30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

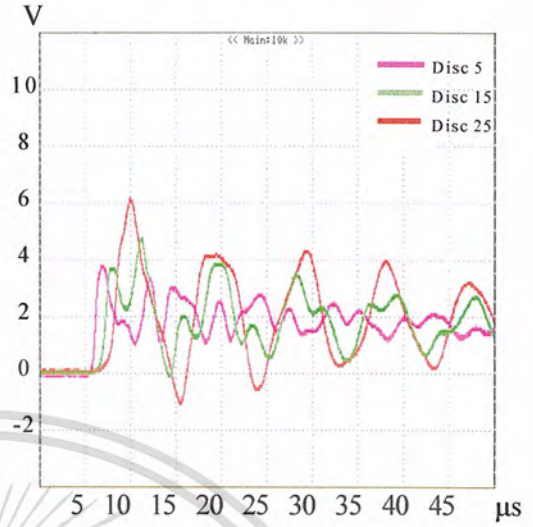
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

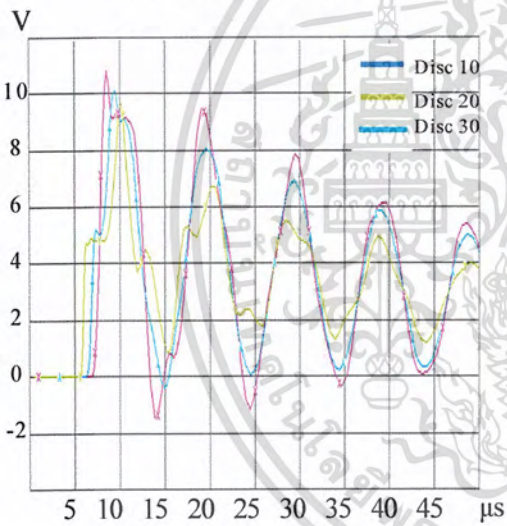


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

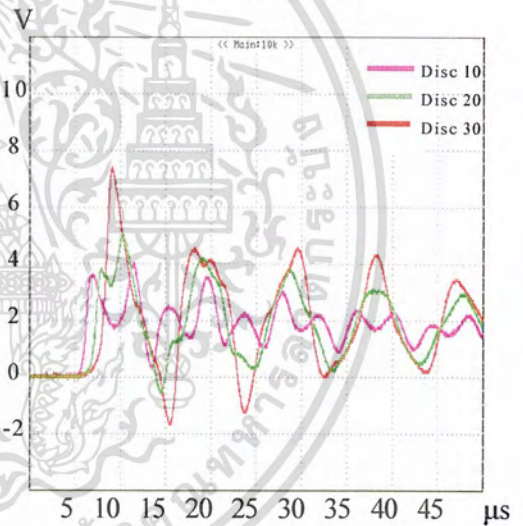
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



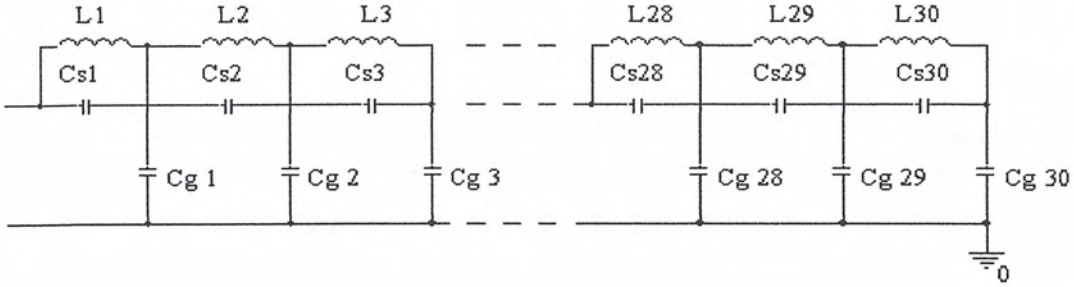
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Steep-Front Surge ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s
กรณีมี L และ C_g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$ และ $C_s = 150 \text{ pF}$)



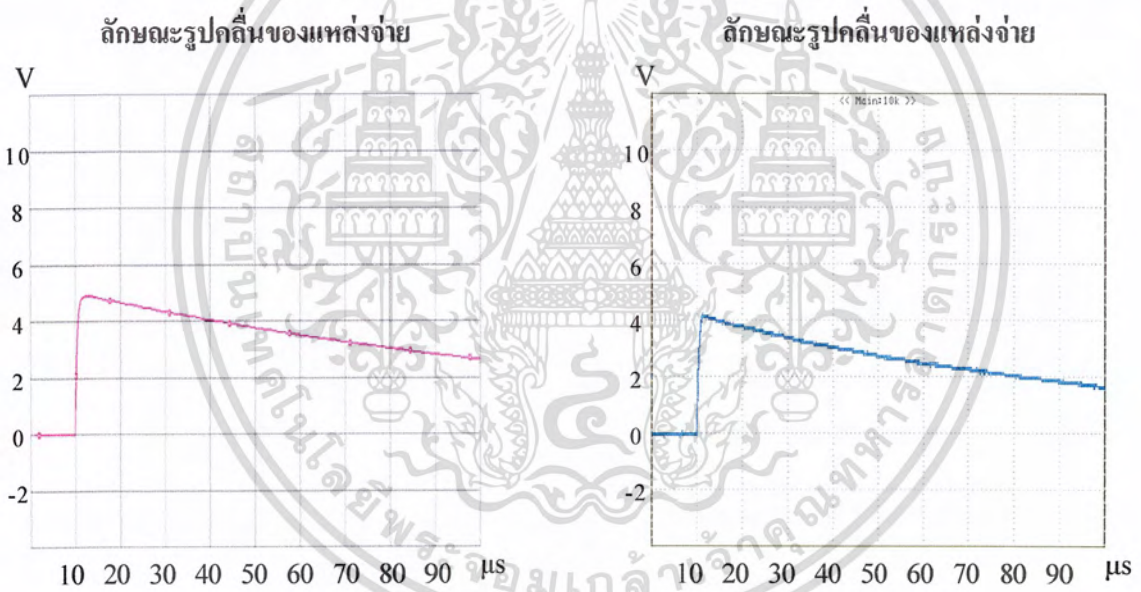
ที่ความชันหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s}$, แรงแดัน 5 V

ความถี่ออสซิลเลชัน = 111.11 kHz

ความถี่ออสซิลเลชัน = 111.11 kHz

ผลจาก Simulation

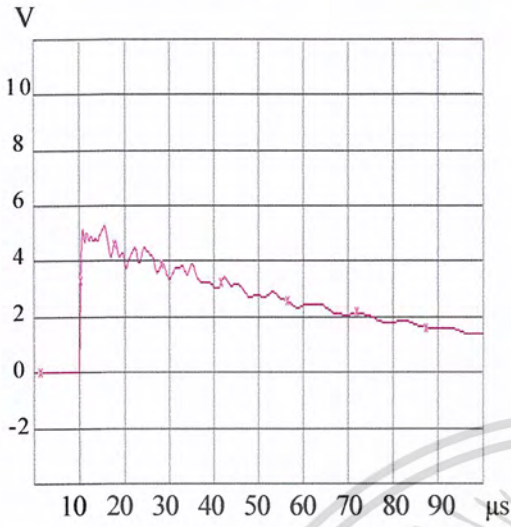
ผลจาก วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

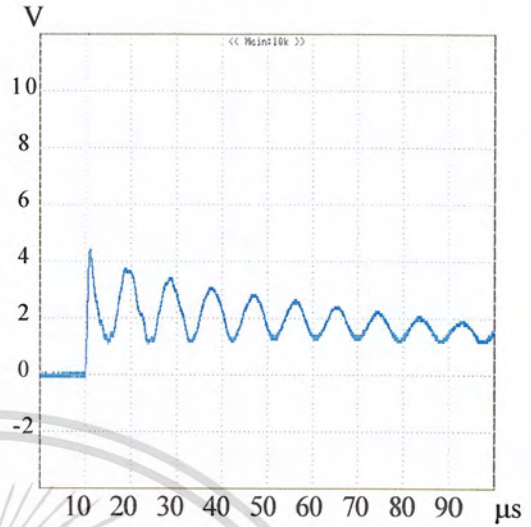
ผล Simulation

Disc ที่ 1

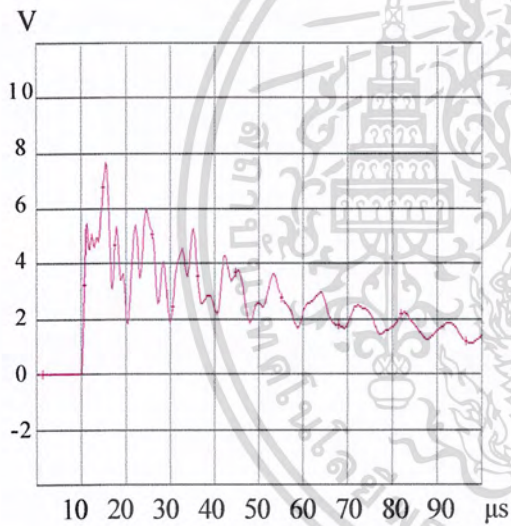


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

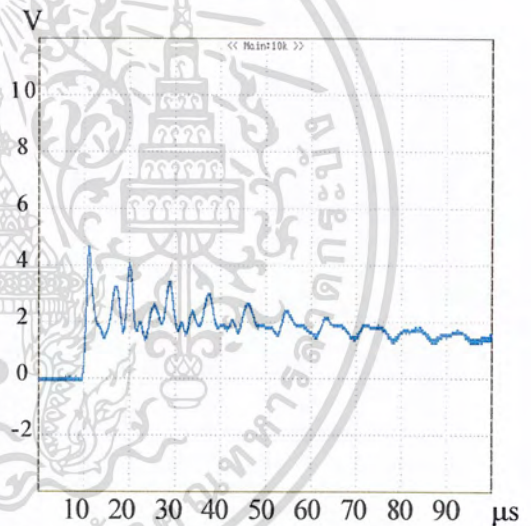
Disc ที่ 1



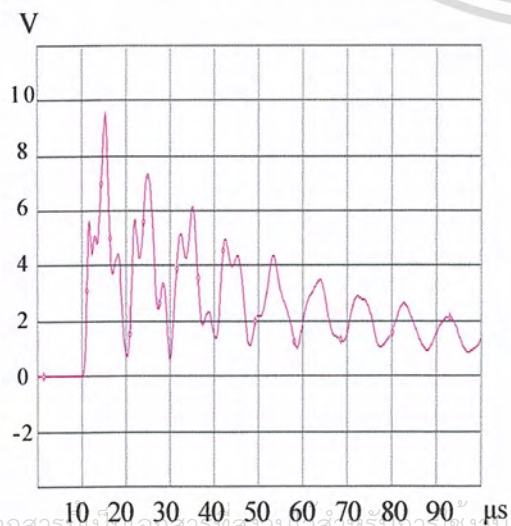
Disc ที่ 5



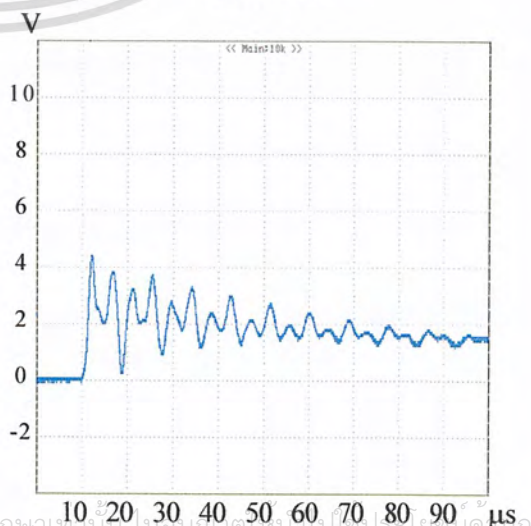
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



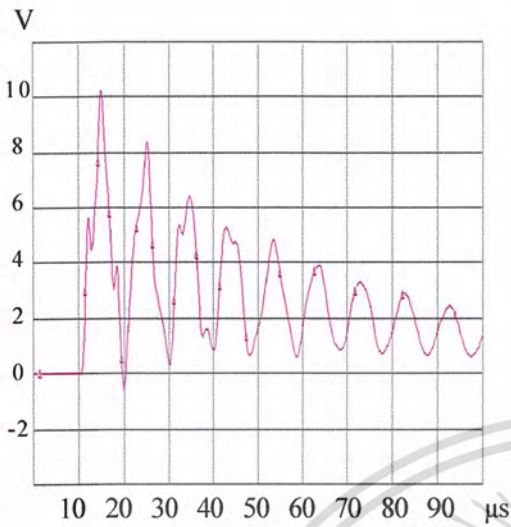
Disc ที่ 10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ดูเดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

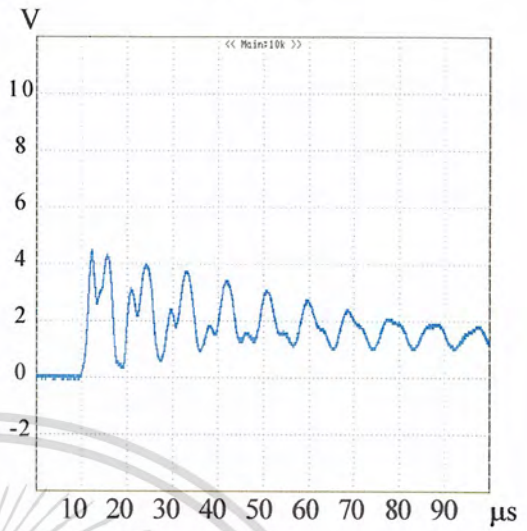
ผล Simulation

Disc ที่ 15

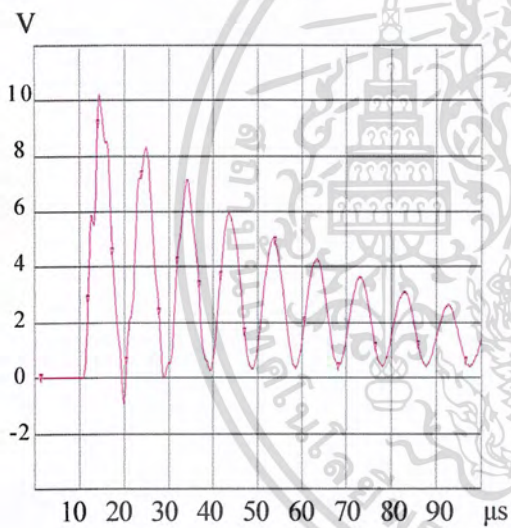


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

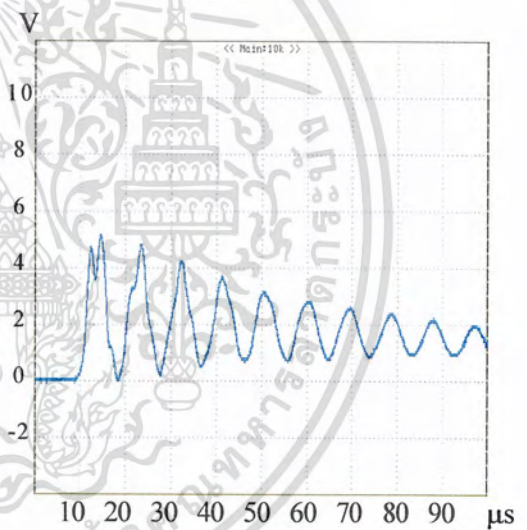
Disc ที่ 15



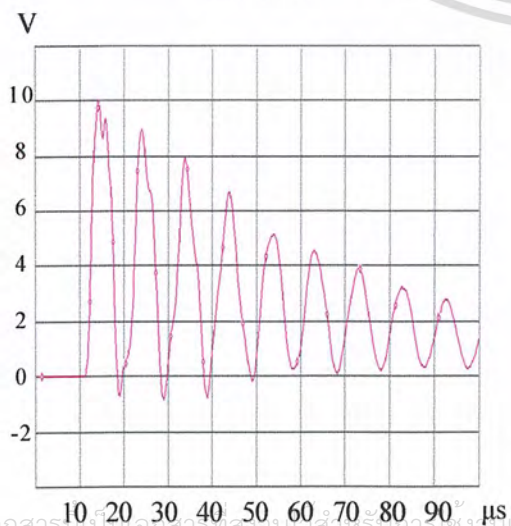
Disc ที่ 20



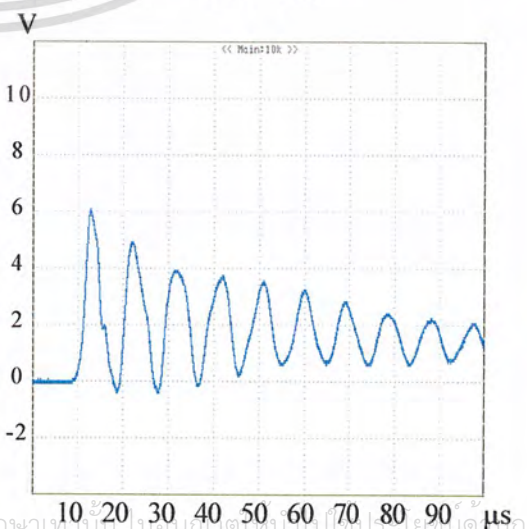
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



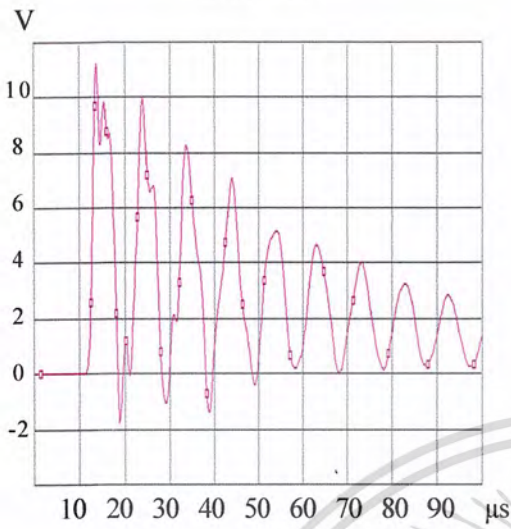
Disc ที่ 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่แต่เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

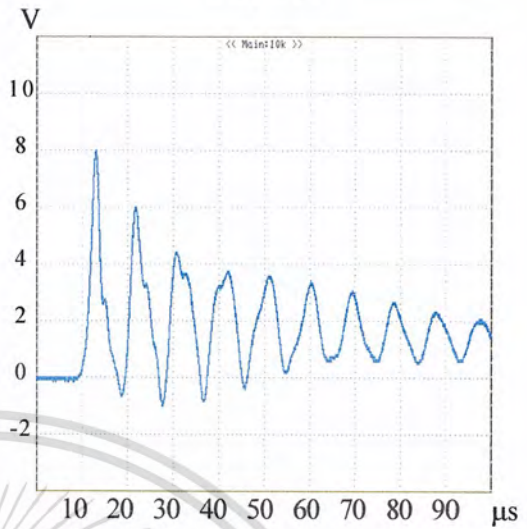
ผล Simulation

Disc ที่ 30

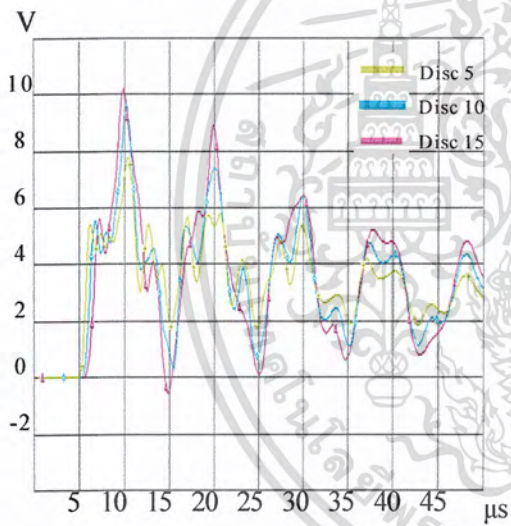


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

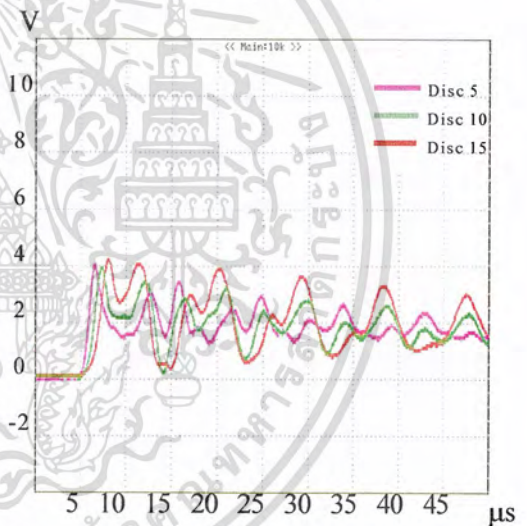
Disc ที่ 30



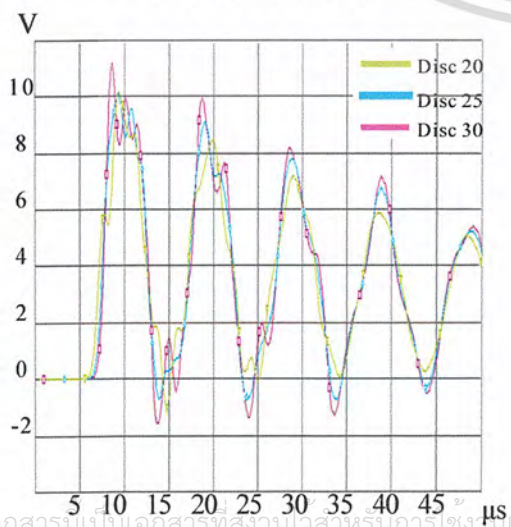
Disc ที่ 5,10 และ 15



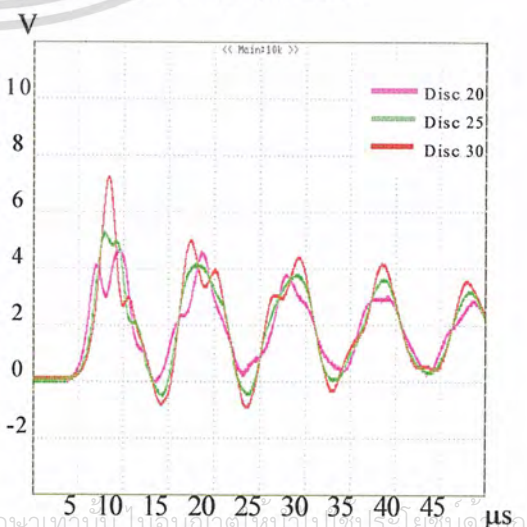
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



Disc ที่ 20,25 และ 30

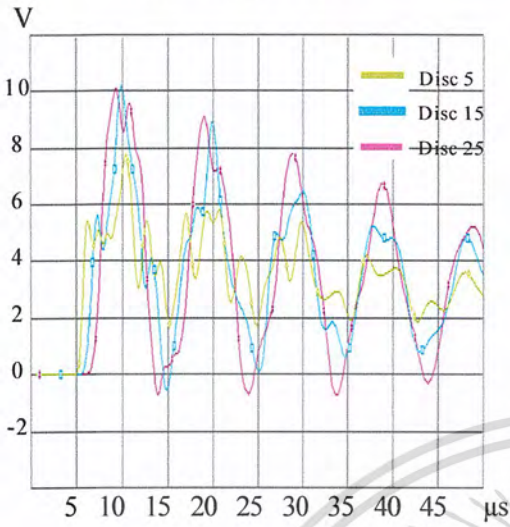


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

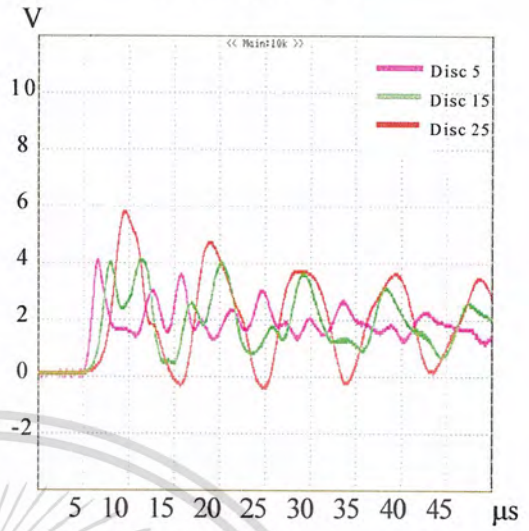
ผล Simulation

Disc ที่ 5,15 และ 25

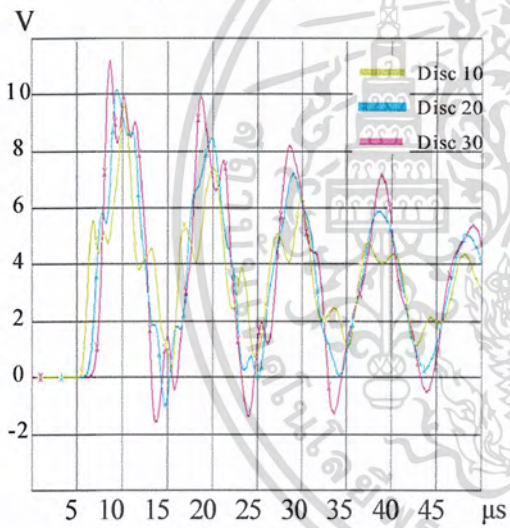


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

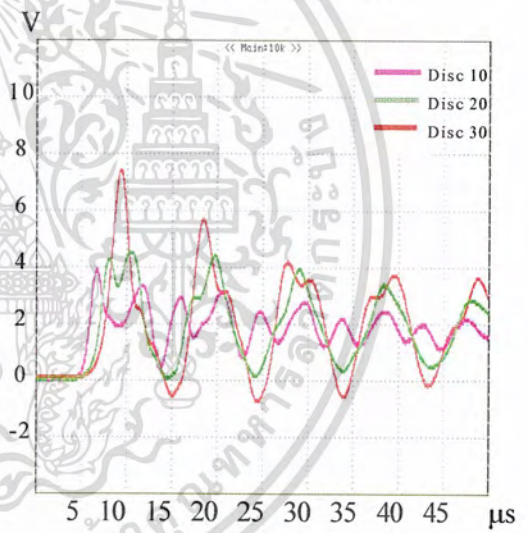
Disc ที่ 5,15 และ 25



Disc ที่ 10,20 และ 30



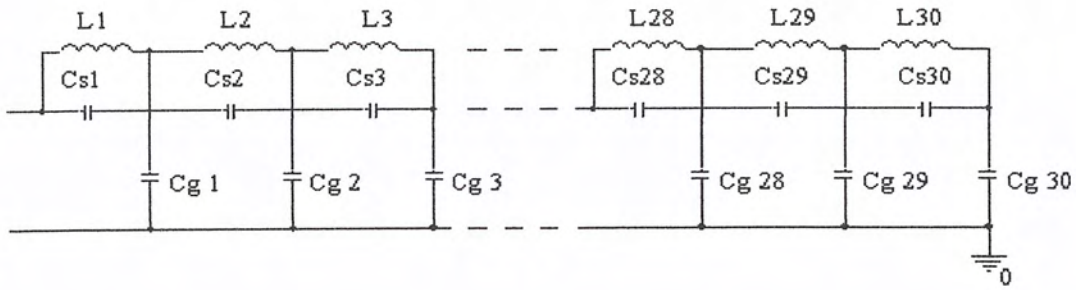
Disc ที่ 10,20 และ 30



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Steep-Front Surge ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s
 กรณี L, C_g และ C_s โดย C_s มีค่า 150 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะวงจร ($L = 102 \mu\text{H}$, $C_g = 60 \text{ pF}$ และ $C_s = 3200 \text{ pF}$)



ที่ความชันหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s}$, แรงแดัน 5 V

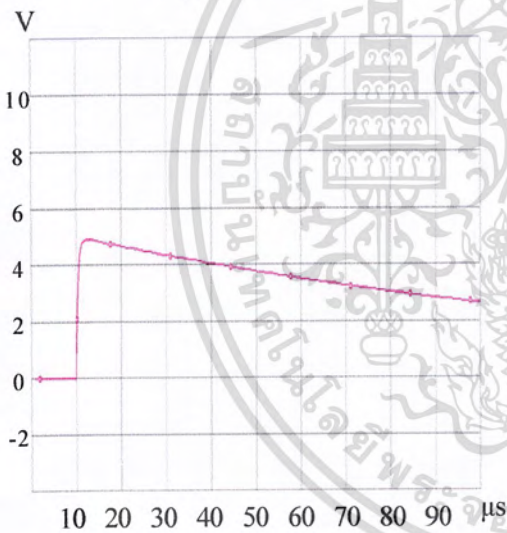
ความถี่ออสซิลเลชัน = 111.11 kHz

ความถี่ออสซิลเลชัน = 95.23 kHz

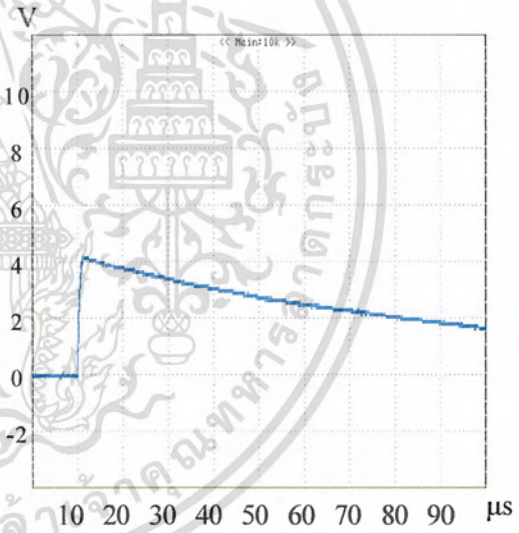
ผลจาก Simulation

ผลจาก วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย



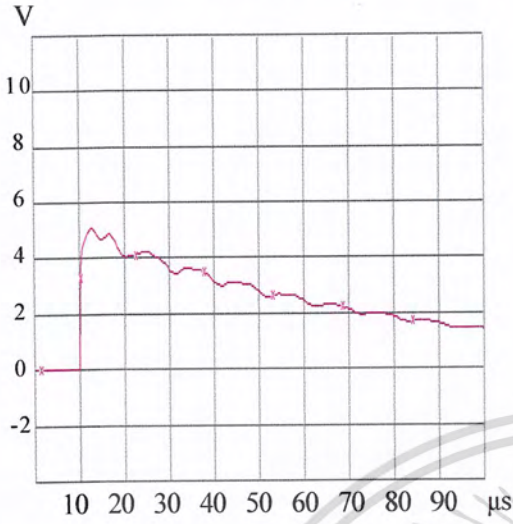
ลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

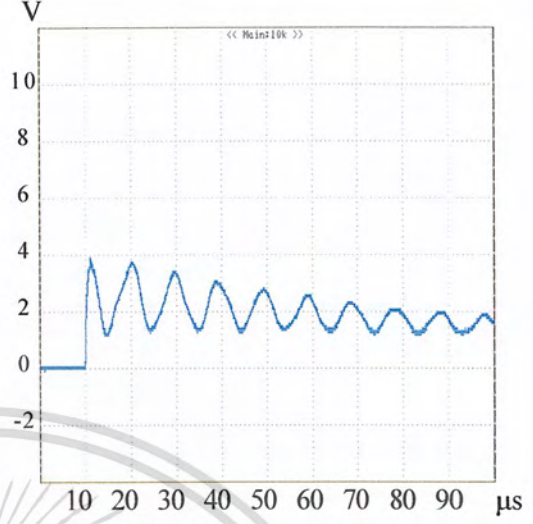
ผล Simulation

Disc ที่ 1

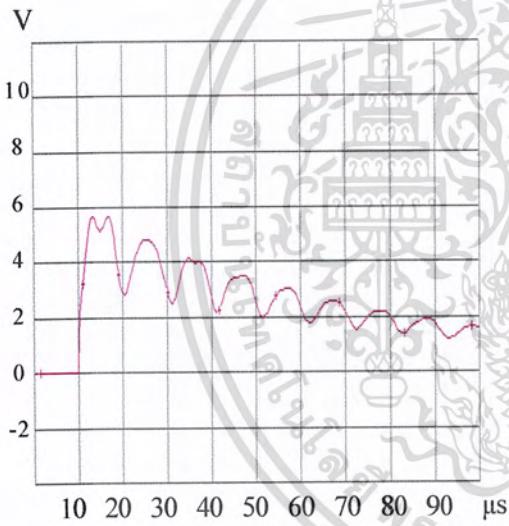


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

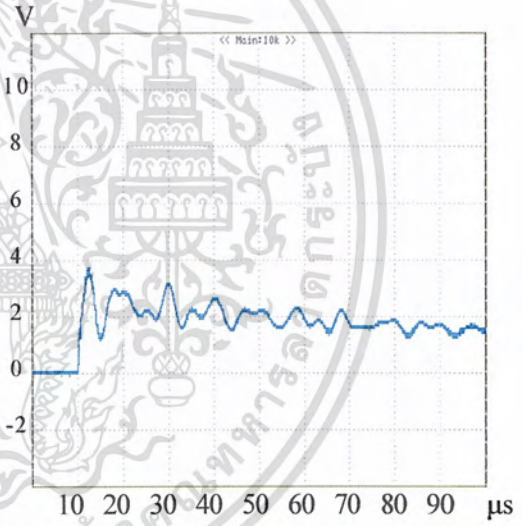
Disc ที่ 1



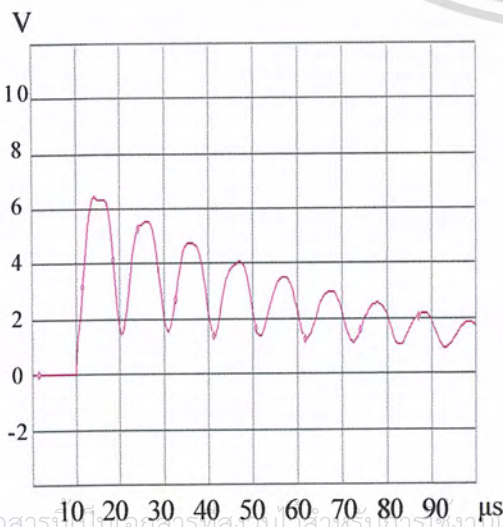
Disc ที่ 5



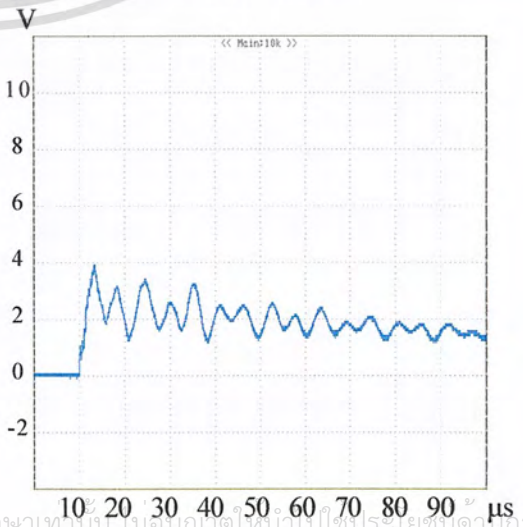
Disc ที่ 5



Disc ที่ 10



Disc ที่ 10

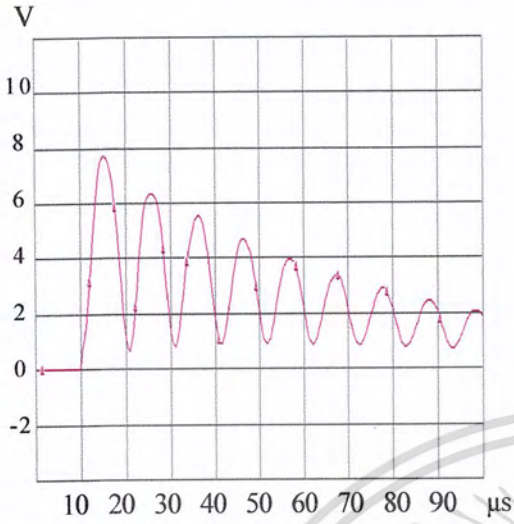


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

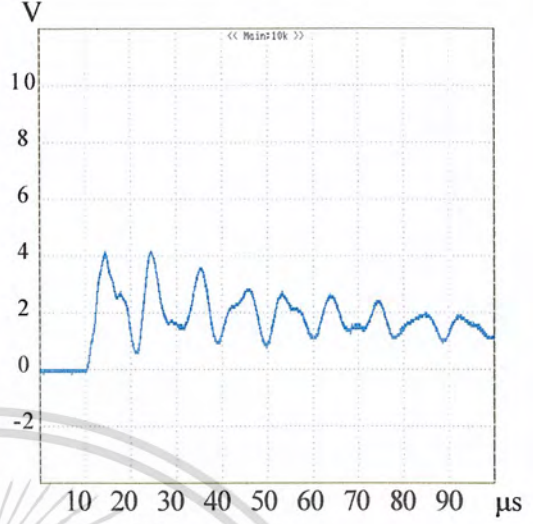
ผล Simulation

Disc ที่ 15

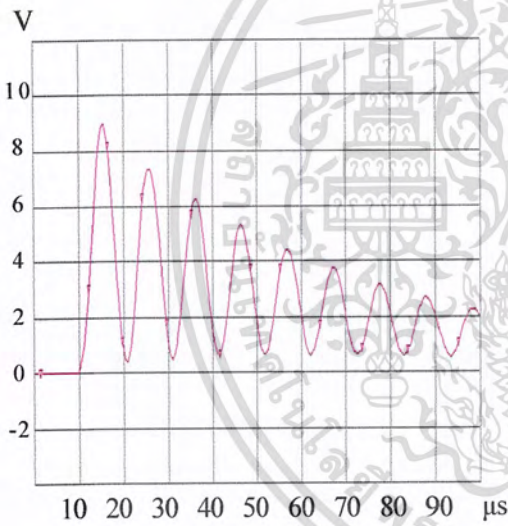


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

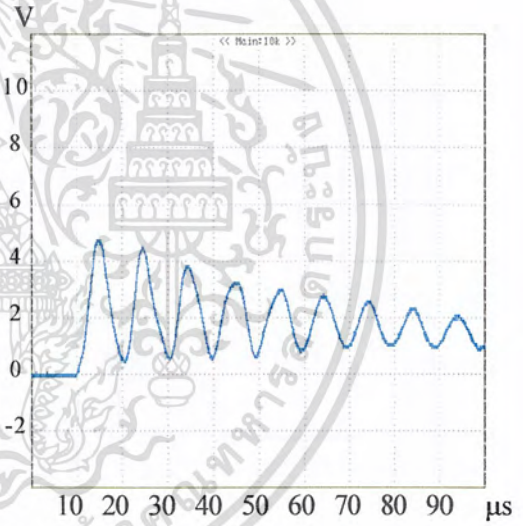
Disc ที่ 15



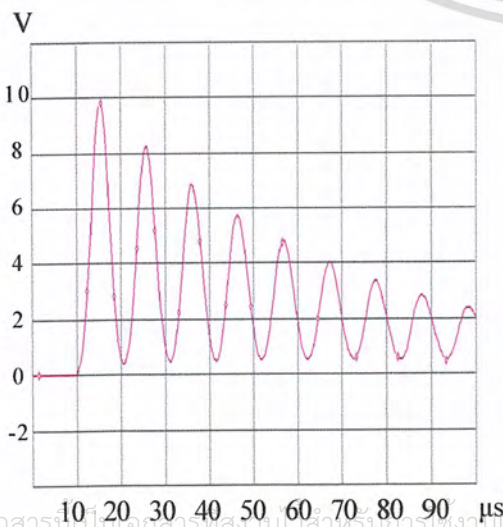
Disc ที่ 20



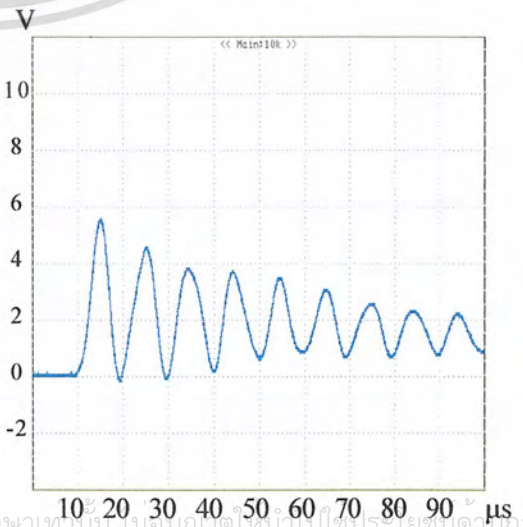
Disc ที่ 20



Disc ที่ 25



Disc ที่ 25

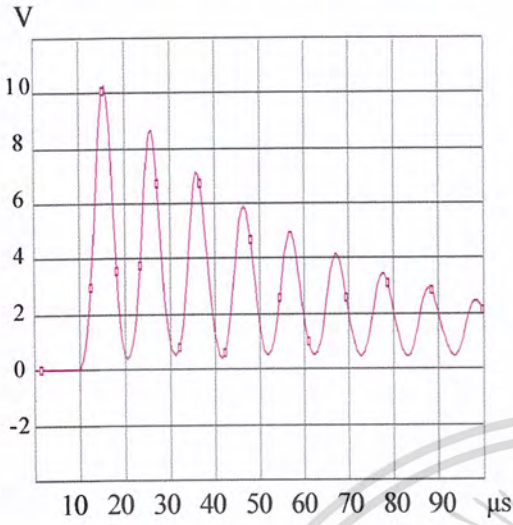


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

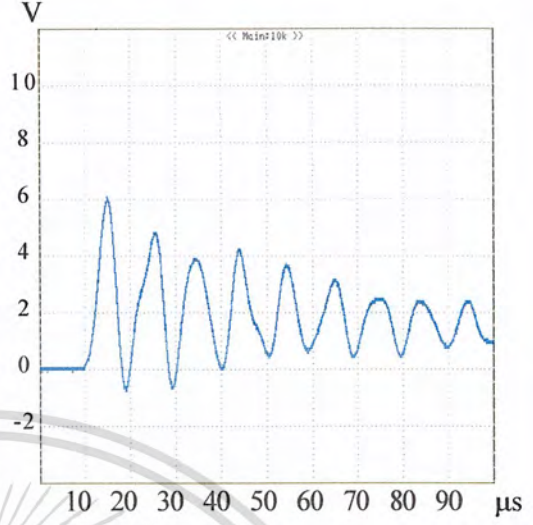
ผล Simulation

Disc ที่ 30

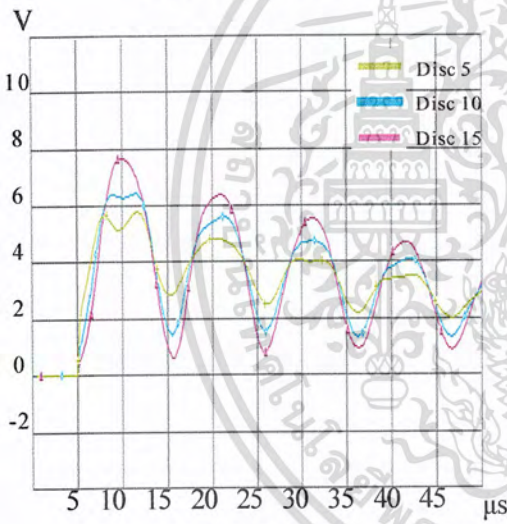


ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge

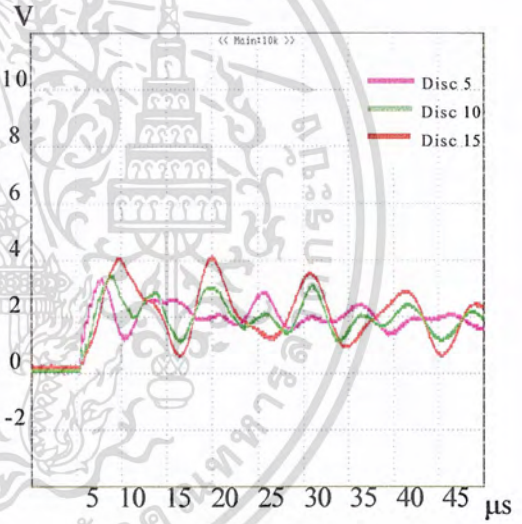
Disc ที่ 30



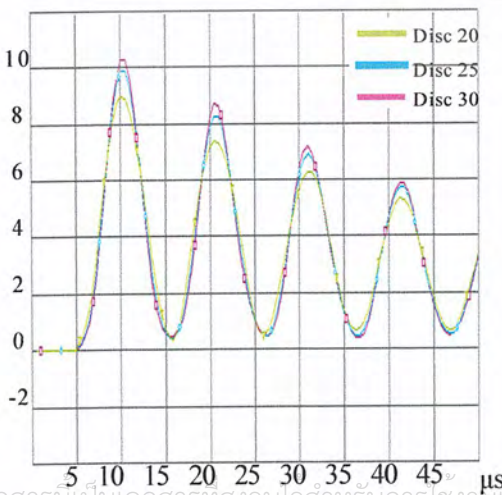
Disc ที่ 5,10 และ 15



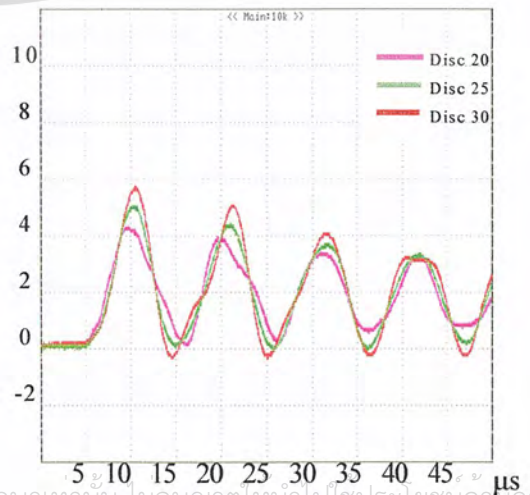
Disc ที่ 5,10 และ 15



Disc ที่ 20,25 และ 30



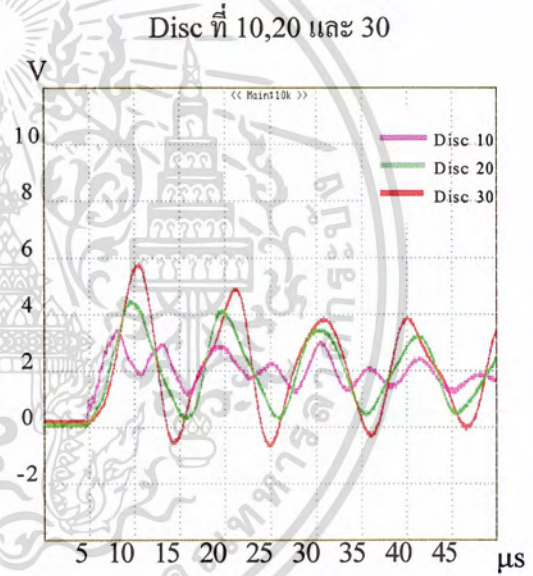
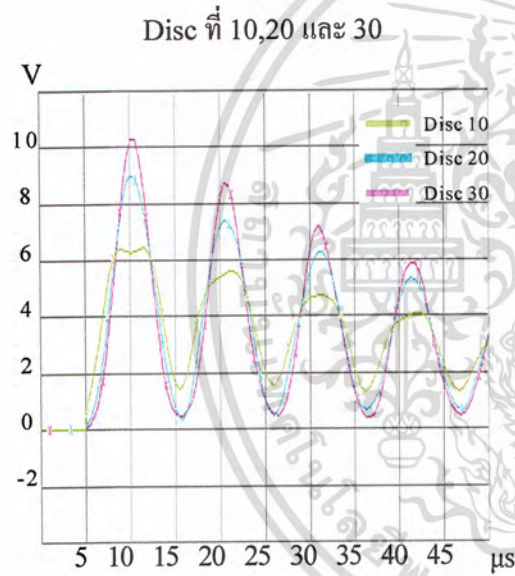
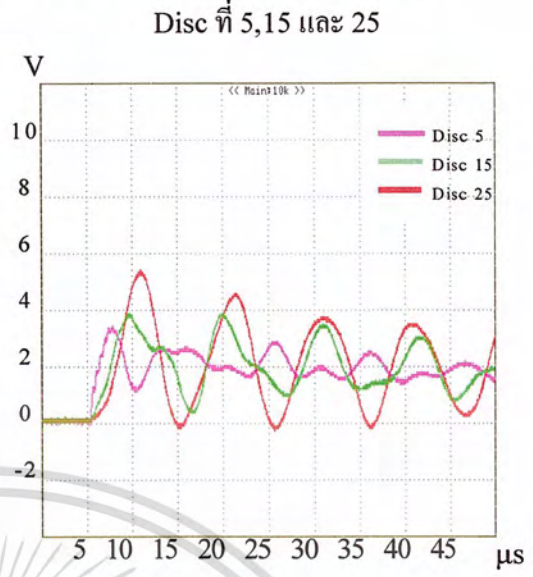
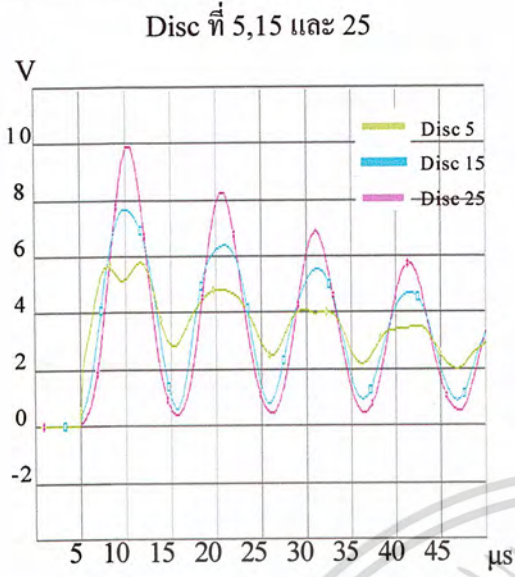
Disc ที่ 20,25 และ 30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผล Simulation

ผล วงจรกำเนิด Steep-Fronted Surge



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับ Steep-Front Surge ที่หน้าคลื่น 1.2 μ s
กรณี L, C_p และ C_s โดย C_s มีค่า 3200 pF

วิเคราะห์แรงดันกระจายบนขดลวด

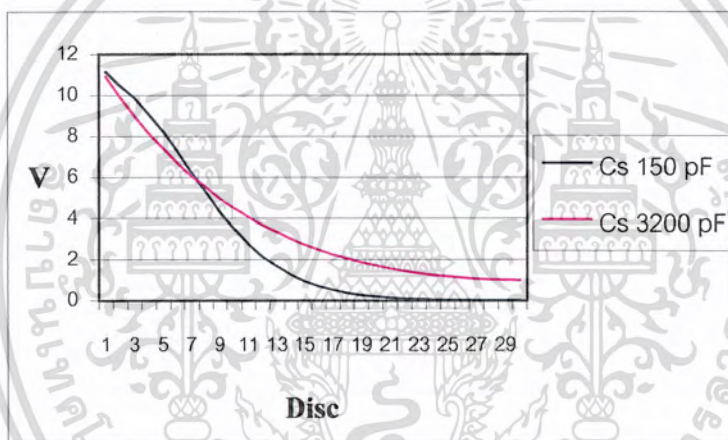
ความชันหน้าคลื่น 1.2 μ s

ผล Simulation

Disc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C_s 150 pF	11	10	9.9	9.1	8.2	7.3	6.2	5.3	4.3	3.5	2.8	2.2	1.7	1.3	1
C_s 3200 pF	11	9.9	9	8.2	7.4	6.7	6.1	5.5	5	4.5	4.1	3.7	3.3	3	2.7

Disc	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C_s 150 pF	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0
C_s 3200 pF	2.5	2.3	2.1	1.9	1.7	1.6	1.5	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1	1	1

จากค่าในตารางนำมา Plot ลงในกราฟการกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ



รูป4.12 การกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ ของผล Simulation

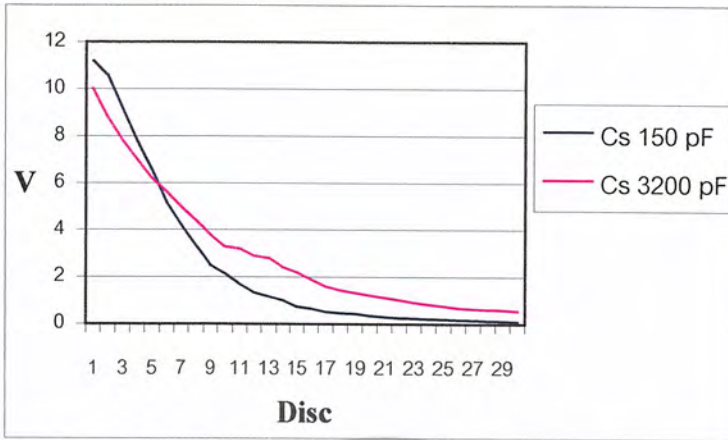
ผลการทดลองของ Function Generator

Disc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C_s 150 pF	11	11	9.1	7.8	6.6	5.1	4.2	3.3	2.5	2.1	1.7	1.3	1.2	1	0.7
C_s 3200 pF	10	8.8	7.8	7	6.2	5.6	5	4.4	3.8	3.3	3.2	2.9	2.8	2.4	2.2

Disc	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C_s 150 pF	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
C_s 3200 pF	1.9	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าในตารางนำมา Plot ลงในกราฟการกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ



รูป4.13 การกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ ของผลการทดลองของ Function Generator

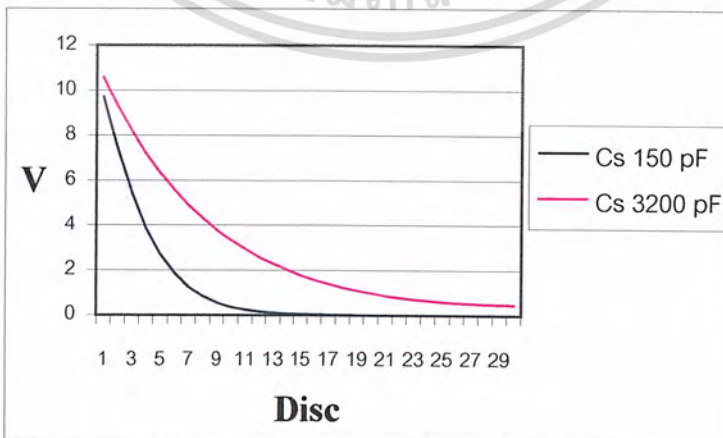
ความชันหน้าคลื่น 500 ns

ผล Simulation

Disc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C _s 150 pF	9.7	7.4	5.4	3.9	2.7	1.9	1.3	0.8	0.6	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0
C _s 3200 pF	11	9.3	8.2	7.2	6.3	5.6	4.9	4.3	3.8	3.3	2.9	2.6	2.3	2	1.8

Disc	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C _s 150 pF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C _s 3200 pF	1.6	1.4	1.2	1.1	1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4

จากค่าในตารางนำมา Plot ลงในกราฟการกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ



รูป4.14 การกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ ของผล Simulation

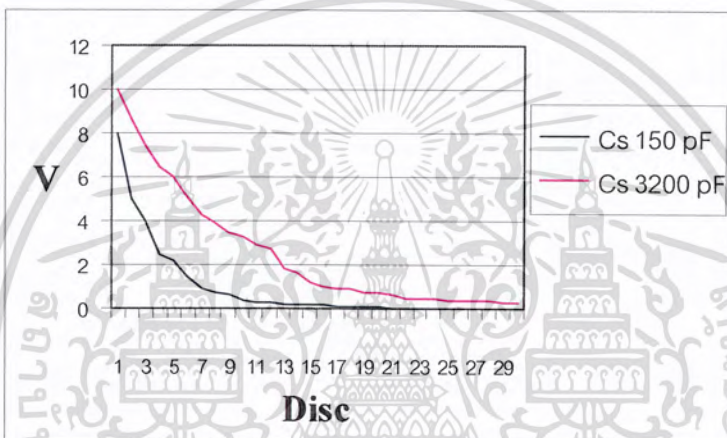
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองของ Function Generator

Disc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C _s 150 pF	8	5	4	2.5	2.2	1.5	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
C _s 3200 pF	10	8.6	7.5	6.5	6	5.1	4.3	3.9	3.5	3.3	2.9	2.7	1.8	1.6	1.2

Disc	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C _s 150 pF	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C _s 3200 pF	1	0.9	0.9	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3

จากค่าในตารางนำมา Plot ลงในกราฟการกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ



รูป4.15 การกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ ของผลการทดลองของ Function Generator

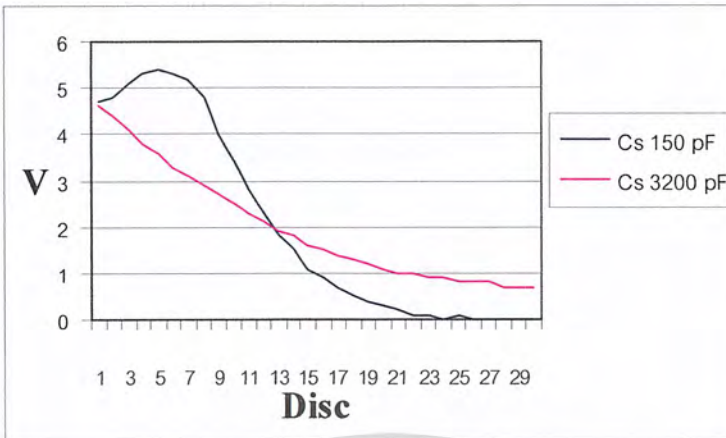
แรงดันอิมพัลส์ ที่หน้าคลื่น 1.2 μs

ผล Simulation

Disc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C _s 150 pF	4.7	4.8	5.1	5.3	5.4	5.3	5.2	4.8	4	3.4	2.8	2.3	1.8	1.5	1.1
C _s 3200 pF	4.6	4.4	4.1	3.8	3.6	3.3	3.1	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1	1.9	1.8	1.6

Disc	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C _s 150 pF	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0
C _s 3200 pF	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7

จากค่าในตารางนำมา Plot ลงในกราฟการกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ



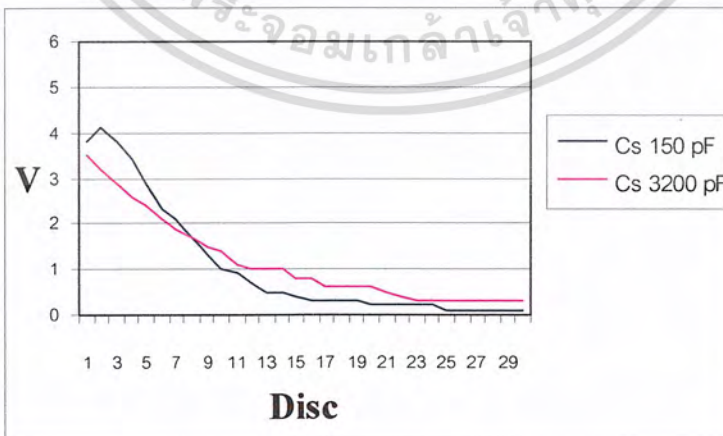
รูป4.16 การกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ ของผล Simulation

ผลการทดลองของวงจร Steep-Fronted Surge

Disc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C_s 150 pF	3.8	4.1	3.8	3.4	2.9	2.3	2.1	1.7	1.3	1	0.9	0.7	0.5	0.5	0.4
C_s 3200 pF	3.5	3.2	2.9	2.6	2.4	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.1	1	1	1	0.8

Disc	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C_s 150 pF	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
C_s 3200 pF	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

จากค่าในตารางนำมา Plot ลงในกราฟการกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ



รูป4.17 การกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆ ของผลการทดลองของวงจร Steep-Fronted Surge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์การกระจายของแรงดันที่ Disc ต่างๆของขดลวด

จากผลการทดลองในการป้อน Steep-Front Surge เข้าในขดลวดหม้อแปลงจะสังเกตได้ว่า เมื่อความชันหน้าคลื่นเปลี่ยนแปลง ความถี่ Oscillate จะเท่ากันตลอด แสดงว่า ความชันหน้าคลื่นไม่มีผลต่อความถี่ Oscillate ส่วนอีกกรณีหนึ่งถ้าช่องว่างระหว่าง Disc เพิ่มขึ้นจะทำให้ C_s มีค่าลดลงและเมื่อ C_s มีค่าน้อยมีผลทำให้ค่าของ α มีค่าสูงกว่าเมื่อ C_s มีค่ามาก โดยค่า α นี้จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของแรงดันในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งค่า α ที่มีค่ามากจะมีผลทำให้การกระจายของแรงดันภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสูง เป็นผลทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติ มีผลทำให้ฉนวนของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าเปลี่ยนสภาพจากฉนวนกลายเป็นเป็นตัวนำ หรือเรียกว่าเกิดการ Breakdown ของฉนวน

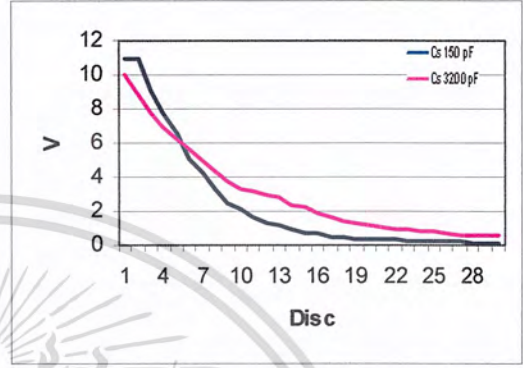
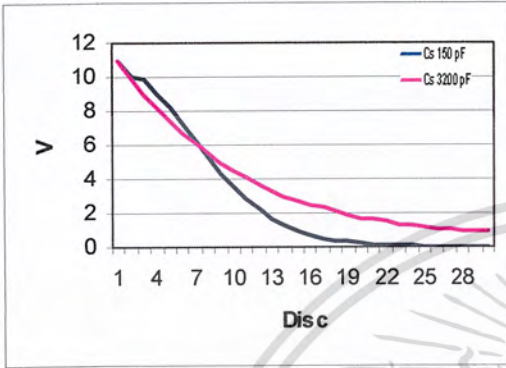


บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

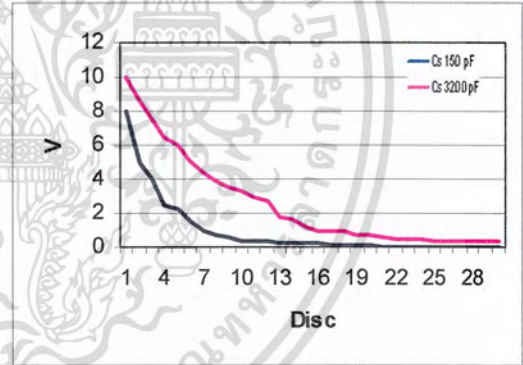
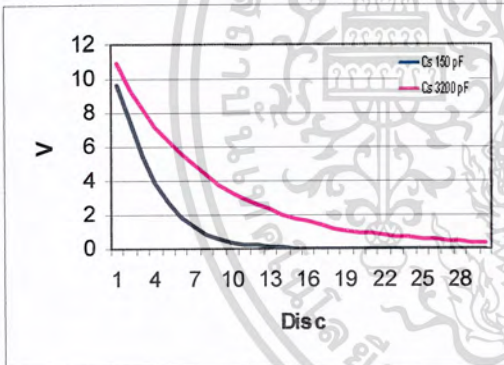
สรุป

จากกราฟการกระจายแรงดันที่ Disc ต่างๆที่ได้จากการทดลอง



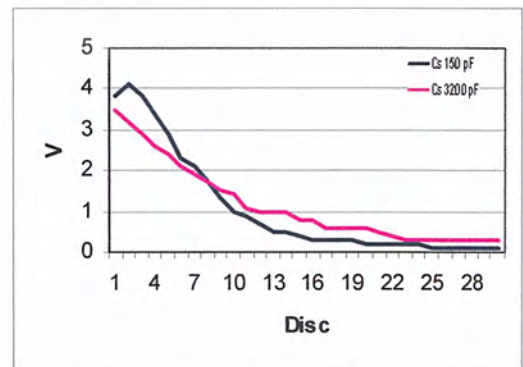
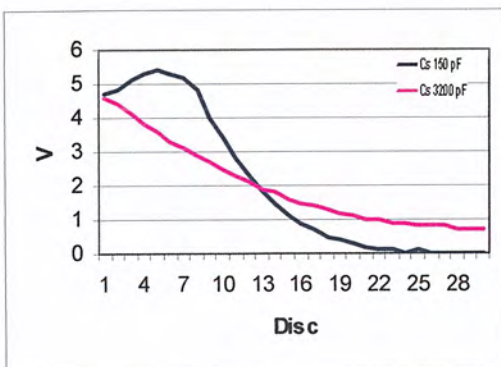
ผลการทดลองของ Simulation ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μs

ผลการทดลองของ Function Generator ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μs



ผลการทดลองของ Simulation ที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns

ผลการทดลองของ Function Generator ที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns



ผลการทดลองของ Simulation ของแรงดันอิมพัลส์ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μs

ผลการทดลองของวงจร Steep-Fronted Surge ของแรงดันอิมพัลส์ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อลดค่า C_s ลงโดยปรับช่องว่างระหว่าง Disc เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าของ α มีค่าสูงกว่าเมื่อ C_s มีค่ามาก โดยค่า α นี้จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของแรงดัน ในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งค่า α ที่มีค่ามากจะมีผลทำให้การกระจายของแรงดันภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสูง เป็นผลทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติ มีผลทำให้ฉนวนของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าเปลี่ยนสภาพจากฉนวนกลายเป็นเป็นตัวนำ หรือเรียกว่าเกิดการ Breakdown ของฉนวน จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ความไม่สม่ำเสมอของแรงดันที่กระจายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของขดลวด เพราะฉะนั้นทำให้ฉนวนของขดลวดอาจไหม้ได้ ดังนั้น จากการศึกษาการกระจายของ Steep-Fronted Surge โดยการ Simulation และการทดลองด้วยชุดจำลอง Steep-Fronted Surge ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลักษณะของกราฟมีความใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้น สามารถนำชุดจำลองนี้ไปศึกษาเพื่อเป็นแนว โน้มในการหาผลกระทบของ Steep-Fronted Surge ต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อที่จะหาแนวทางป้องกันได้

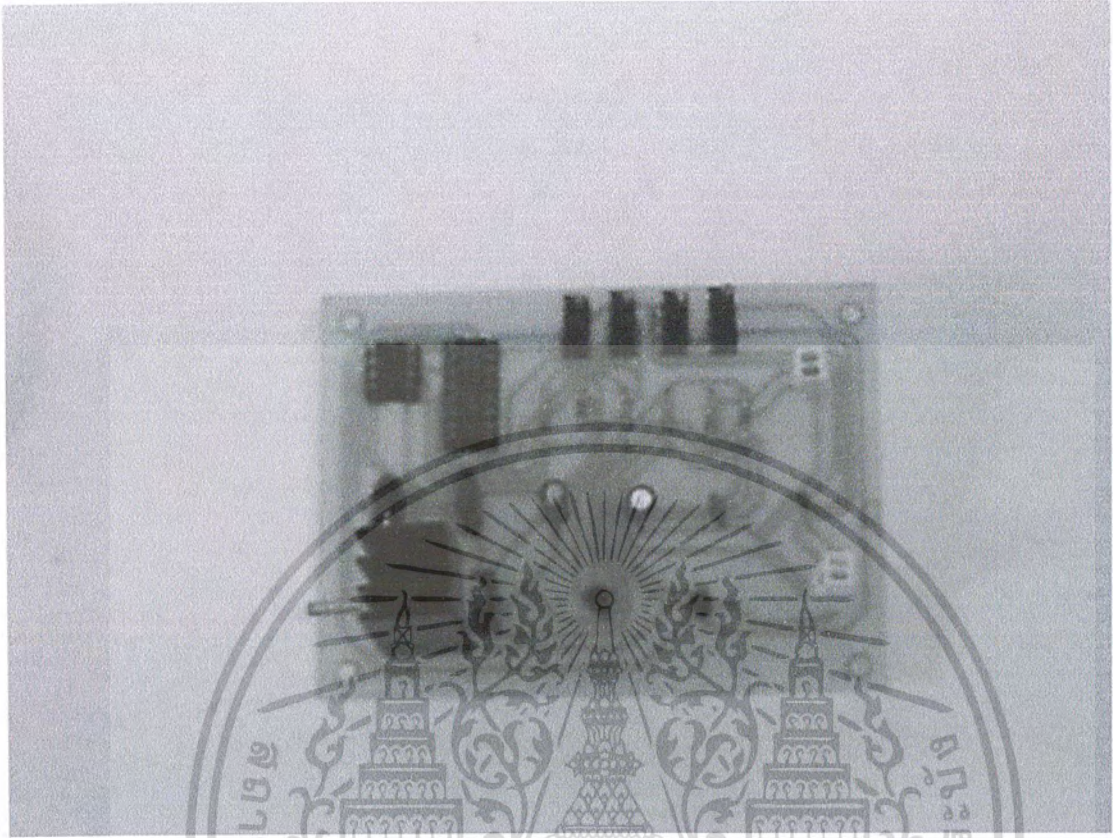
วิจารณ์การทดลอง

วงจร Steep-Fronted Surge ที่สร้างขึ้น สามารถที่จะปรับความชันหน้าคลื่นและหลังคลื่นได้ จากการปรับค่าของ R โดยในระหว่างการทดลองสร้างวงจร Steep-Fronted Surge เราได้ทำการทดลองเลือกใช้ Relay ขนาด 5V เพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของวงจร Discharge generator พบว่าขนาดของ Relay ที่ใช้ มีเวลาในการทรักช้าเกินไป จึงไม่สามารถที่จะทำให้วงจร Discharge generator ทำงานได้ ดังนั้นเราจึงทำการเปลี่ยนจาก Relay มาเป็น Transistor (BC 337) โดยมีเวลาในการทรักได้ดีกว่า Relay ทำให้วงจร Discharge generator ทำงานได้

ในส่วนของแบบจำลองของขดลวดหม้อแปลงนั้น อาจเกิดปัญหาในเรื่องของจำนวนสายที่ใช้ในการต่อ อาจเกิดการสับสนในการต่อ เพราะมีสายเป็นจำนวนมาก หรือสายบางเส้นอาจหลุด ซึ่งทำให้ลักษณะรูปคลื่นที่ได้ มีความผิดเพี้ยน จากสาเหตุเหล่านี้จึงควรมีความระมัดระวังในการต่อสาย

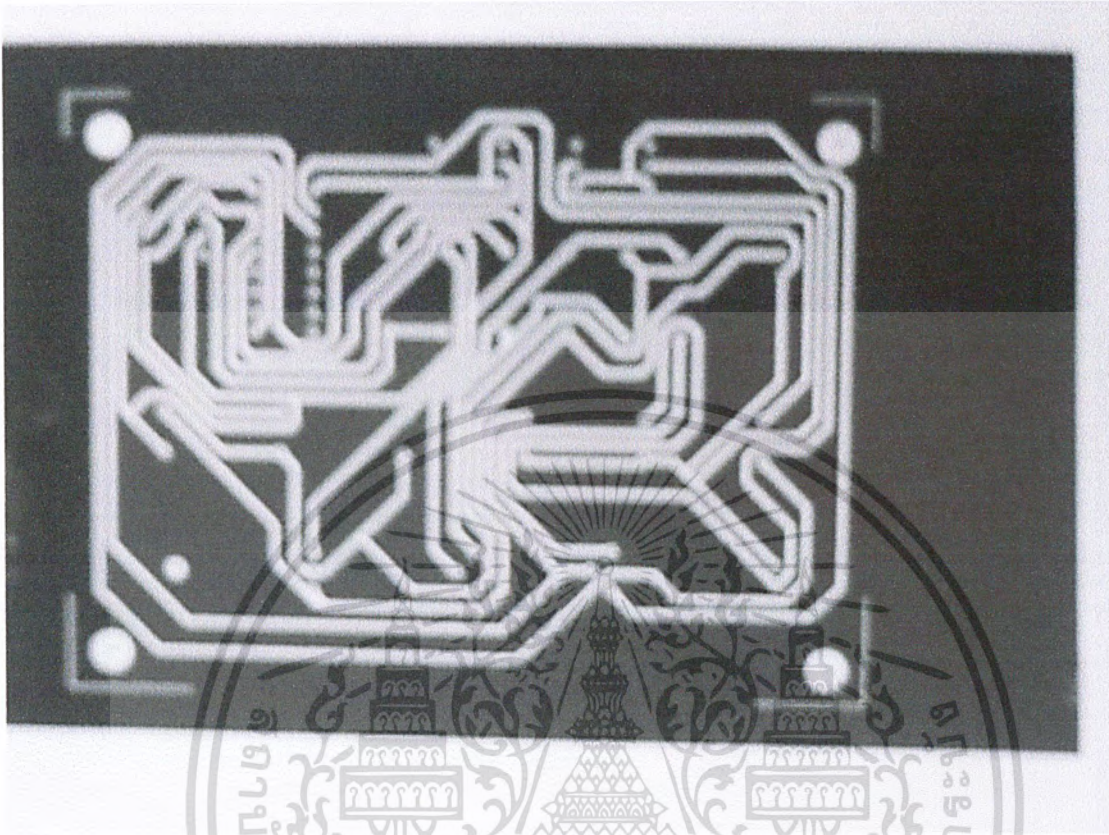


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



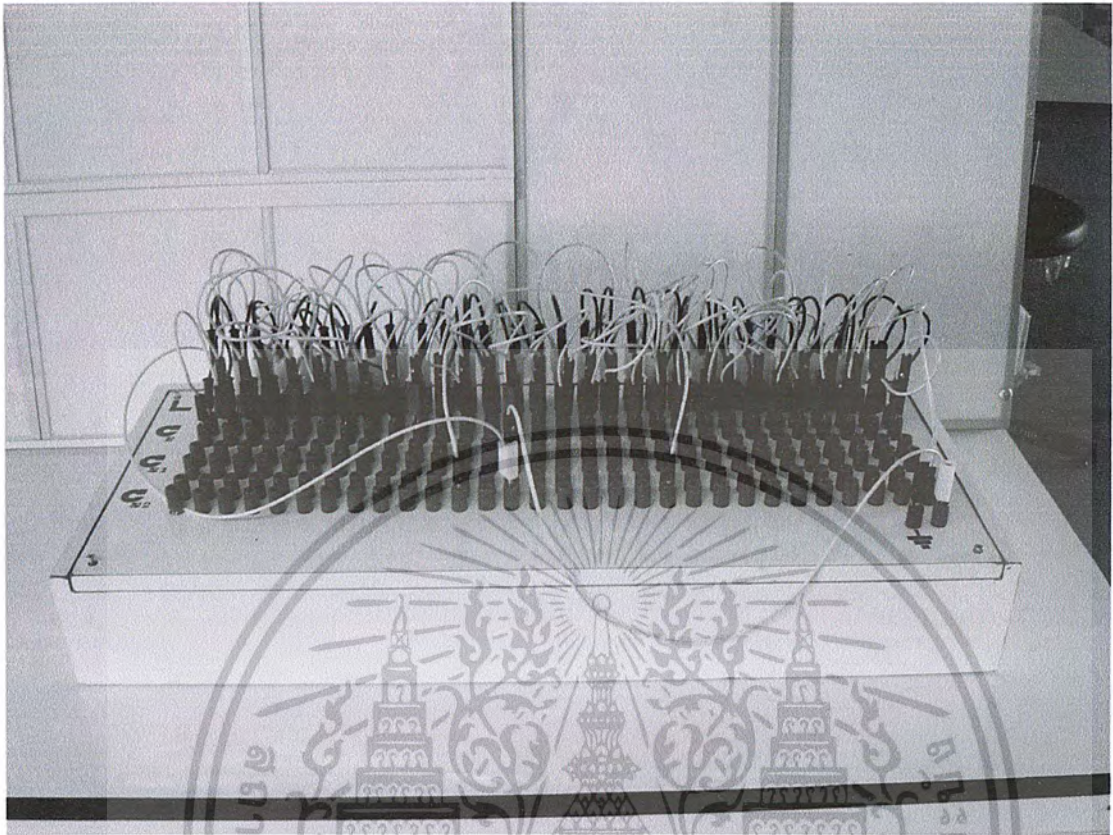
รูป วงจรกำเนิดอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



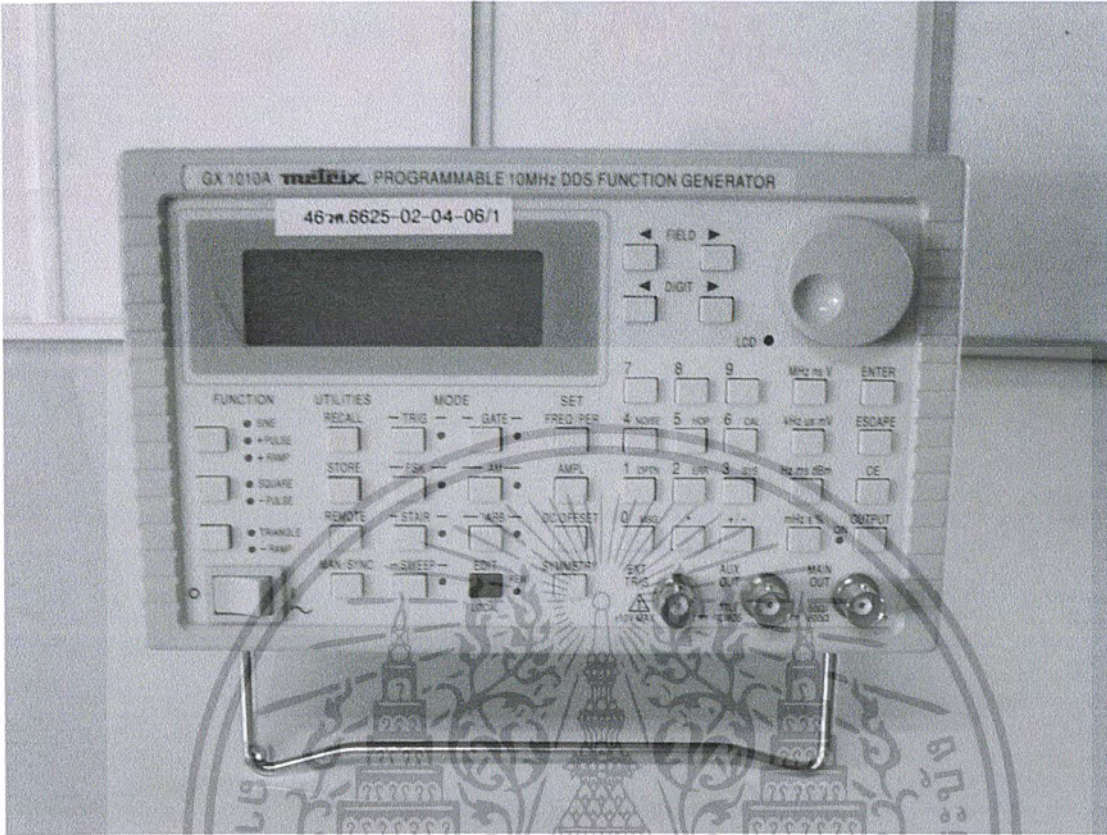
รูป ลายวงจรกำเนตอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



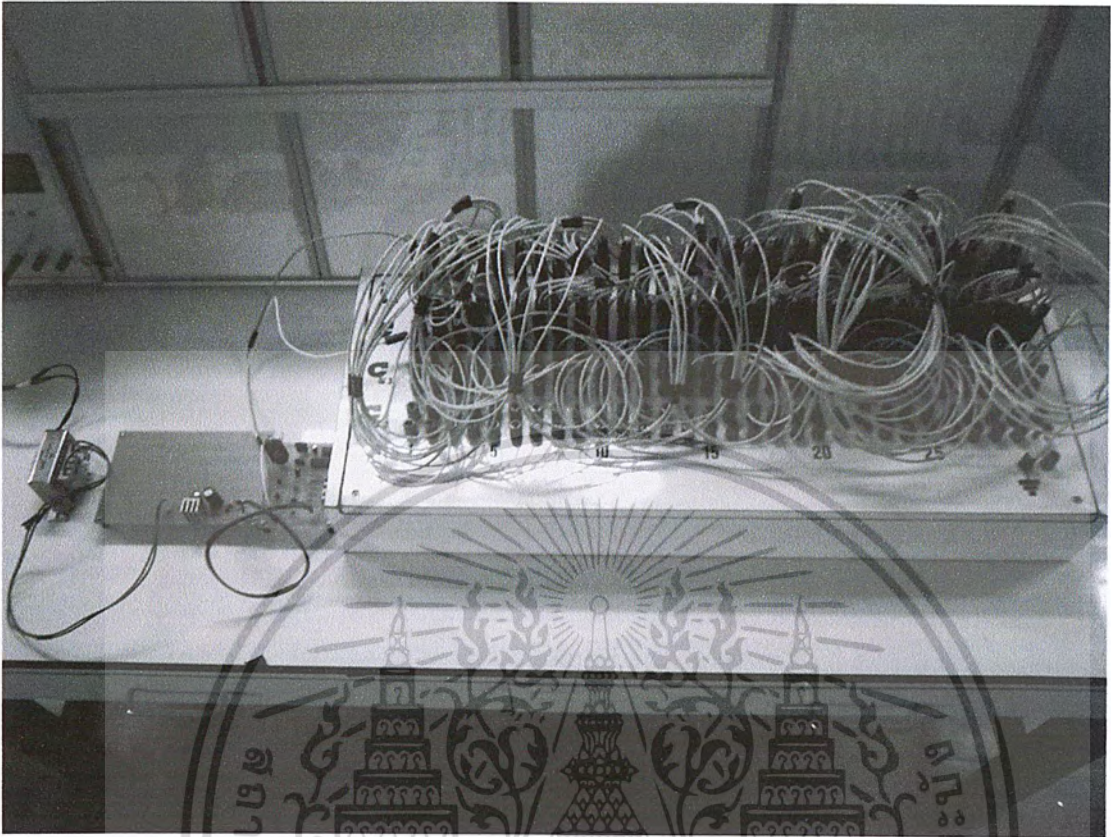
รูป ขดลวดจําลองที่นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป เครื่อง Function Generator ที่นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป วงจรการทดลองการแพร่กระจายของแรงดัน Surge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร ที่ได้ให้โอกาสและคำปรึกษาที่ดี จึงทำให้โครงการนี้สำเร็จ
ขึ้นมาได้ ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และความใกล้ชิดแก่ลูกศิษย์ทุกคน และขอบคุณเพื่อนๆ
สำหรับมิตรภาพและความช่วยเหลือที่ดีๆที่มีให้กัน

ขอขอบคุณพ่อและแม่ที่ให้การสนับสนุนและคอยห่วงใยเรามาตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Allan Greenwood, “*Electrical Transients in Power Systems*”, John Wiley & Son New York(1991)
- [2] K.J. Cornick and T.R. Thompson, “*Steep-Fronted Switch Voltage Transients and Their Distribution in Motor Winding. Part 1 : System Measurements of Steep-Fronted Switching Voltage Transients*”, IEE PROC., Vol. 129,Pt. B, No.2, MARCH 1982, pp. 45
- [3] K.J. Cornick and T.R. Thompson, “*Steep-Fronted Switch Voltage Transients and Their Distribution in Motor Winding. Part 1 : Distridution of Steep-Fronted Switching Voltage Transients in Motor Windings*”, IEE PROC., Vol. 129,Pt. B, No.2, MARCH 1982, pp. 56
- [4] Tan Yam Ngee, “*Propagation of Partial Discharge Pulses in Transformer Windings*”, Final Year Project Report, UMIST, UK(1995)
- [5] ดร. ตำรวย สังข์สะอาด, “*วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้