ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242212

การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในโหมดกระแสที่ทำงานในช่วงอิมตัว สำหรับใช้งานในการเรียนการสอนด้านการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ : กรณีศึกษากับ CC-CDTA

นายภมร ศิลาพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชาไฟฟ้าศึกษา ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในโหมดกระแสที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวสำหรับใช้งานในการเรียนการสอนด้านการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ : กรณีศึกษากับ CC-CDTA

โดย นายภมร ศิลาพันธ์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้าศึกษา

_____คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงษ์)

18 พฤษภาคม 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน)

_____กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กานดา พูนลาภทวี)

_____กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์)

_____กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ พรหมมี)

_____กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ อ่างแก้ว)

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242212

การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในโหมดกระแสที่ทำงานในช่วงอิ่มตัว สำหรับใช้งานในการเรียนการสอนด้านการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ : กรณีศึกษากับ CC-CDTA

นายภมร ศิลาพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาไฟฟ้าศึกษา ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ	:	นายภมร ศิลาพันธ์
ชื่อวิทยานิพนธ์	:	การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในโหมดกระแสที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวสำหรับใช้งานในการเรียนการสอนด้านการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ : กรณีศึกษากับ CC-CDTA
สาขาวิชา	:	ไฟฟ้าศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	:	รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี ศิริปรัชญานันท์
ปีการศึกษา	:	2553

242212

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สังเคราะห์และออกแบบวงจรแอนะลอกโหมดกระแสที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวโดยใช้ CC-CDTA (2) สังเคราะห์และออกแบบวงจรประยุกต์ใช้งานวงจรแอนะลอกโหมดกระแสที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวโดยใช้ CC-CDTA และ (3) สร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอน เรื่อง วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแสที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวและการประยุกต์ใช้งาน

วงจรแอนะลอกที่ออกแบบโดยอาศัยหลักการทำงานในช่วงอิ่มตัวของ CC-CDTA เป็นแกนหลัก ในงานวิจัยนี้คือ วงจรชมิตต์ทริกเกอร์โหมดกระแส ที่สามารถควบคุมขนาดและกระแสขีดเริ่มด้านสูงและต่ำได้ด้วยกระแสไบแอสและเป็นอิสระจากกันและเป็นอิสระจากอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ หรือผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยง่าย อีกทั้งได้นำเอาวงจรชมิตต์ทริกเกอร์นี้ไปประยุกต์ออกแบบวงจรต่างๆ เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมโหมดกระแส วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมโหมดกระแส วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์โหมดกระแส และวงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์โหมดกระแส เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ได้มีการพัฒนาขึ้น

ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์และวงจรประยุกต์ใช้งานที่ได้มีการสังเคราะห์และออกแบบขึ้นด้วยโปรแกรม PSpice และการทดลองจริง ให้สมรรถนะออกมาตามที่คาดหวัง คือ สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งโครงสร้างของแต่ละวงจรที่ไม่ซับซ้อน จึงเหมาะสมกับการนำวงจรไปพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นวงจรรวม วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกาและแบบตามเข็มนาฬิกามีอัตราการบริโภคกำลังไฟฟ้า 191μW และ 235μW ตามลำดับ ที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ±1.5V

242212

เพื่อเป็นการนำองค์ความรู้ที่ได้จากการสังเคราะห์และออกแบบวงจรแอนะลอกโหมดกระแส โดยอาศัยหลักการทำงานในช่วงอิ่มตัวของ CC-CDTA จึงนำชุดการสอนที่สร้างขึ้นไปถ่ายทอดให้กับกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 ที่ผ่านลงทะเบียนวิชาการวิเคราะห์และออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จำนวน 37 คน ด้วยการเลือกแบบเจาะจง ก่อนเรียนในแต่ละเรื่องให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบทดสอบก่อนเรียน เมื่อกลุ่มตัวอย่างเรียนจบในแต่ละเรื่องแล้วจึงทำแบบทดสอบหลังเรียน และเมื่อจบทุกเรื่องแล้วให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ หลังจากนั้นนำคะแนนที่ได้มาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพชุดการสอน E_1/E_2

ผลการวิจัยพบว่า ชุดการสอนที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 81.622/80.180 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ 80/80 ที่กำหนดและจากผลการประเมินเพื่อหาคุณภาพของชุดการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ พบว่าชุดการสอนที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.033) ส่วนความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนโดยใช้ชุดการสอนอยู่ในระดับเห็นด้วยมาก (ค่าเฉลี่ย 4.152)

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 303 หน้า)

คำสำคัญ : วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมได้ด้วยกระแส ช่วงการทำงานอิ่มตัว โหมดกระแส ชุดการสอน

_____อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Phamorn Silapan

Thesis Title : Synthesis and Application of Current-mode Electronic Element in Saturation-mode for the Teaching and Learning of Electronic Circuit Design: Case Study for CC-CDTA

Major Field : Electrical Education

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Thesis Advisor : Associate Professor Dr. Montree Siripruchyanun

Academic Year : 2010

242212

Abstract

The purposes of this research are (1) to synthesize and design analog circuits using current controlled current differencing transconductance amplifier in saturation-mode (CC-CDTA) (2) to synthesize and design the application examples of the circuit using CC-CDTA in saturation-mode and (3) to construct and find the efficiency of an instructional package on the topic of current controlled current differencing transconductance amplifier in saturation-mode and its applications.

The proposed circuit is based on CC-CDTA in saturation-mode which is the Schmitt trigger. The hysteresis and amplitude of the output current of the Schmitt trigger can be adjusted independently/electronically by input bias currents, it is more desirable for applying in an automatic control via a microprocessor. In addition, the output signals are independent of the thermal voltage (V_T). The applications as a relaxation oscillator, triangular/square wave generator, pulse width modulation and monostable multivibrator are given here to display the usefulnesses of the presented Schmitt trigger.

The performances of proposed circuits and its applications are examined through PSpice simulations and the experimental results. The results show that they are good agreement with the expectations that the hysteresis and amplitude of the output current can be independently/electronically tuned. Moreover, the circuit descriptions are very simple. With mentioned features, they are very suitable to realize in a monolithic chip. The maximum power consumptions of CCW (counterclockwise) and CW (clockwise) Schmitt triggers are approximately 191μW and 235μW, respectively, at ±1.5V supply voltages.

242212

An instructional package is used to transfer new knowledge to concerning person. The samples are 37 students of the fourth year bachelor degree registering in electronic circuit analysis and design, department of electrical engineering, faculty of industrial and technology, Rajamangala Isan university Sakonnakhon campus. The experimental plan of this research is "One Group Pretest-Posttest Design". The scores are computed for its efficiency with the formula E1/E2.

The results show that this instructional package had efficiency at 81.622/80.180 which is higher than 80/80. Moreover, the results obtained from experts for suitability are found that the instructional package is in most suitable level (average value is 4.033). For the impressibility offering from the students to the demonstrative set is in much agree level (average value is 4.152).

(Total 303 pages)

Keywords : CC-CDTA, saturation-mode, current-mode, instructional package

Montree Siripruechyanun Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้ข้อมูล ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้เขียน

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี ศิริปรัชญานันท์ ที่ได้ให้แนวคิด ความรู้ทางวิชาการ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตและกำลังใจแก่ผู้เขียนโดยไม่หวังผลตอบแทน ซึ่งเป็นผลให้ผู้วิจัยมีความสามารถในการทำและพัฒนางานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อถ่ายทอดความรู้ความสามารถที่มีอยู่แก่ศิษย์ของผู้วิจัยต่อไป นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท และปริญญาเอกผู้เป็นกำลังใจทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. วินัย ใจกล้า ที่คอยสนับสนุน ส่งเสริม และร่วมแก้ปัญหาด้วยกันเสมอมา ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ภรรยา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ช่วยส่งเสริม สนับสนุน กระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมา

ภมร ศิลาพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมุติฐานการวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	6
1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแส	9
2.2 วงจรชมิตต์ทริกเกอร์	20
2.3 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมเบื้องต้น	24
2.4 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์เบื้องต้น	27
2.5 วงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลตไวเบรเตอร์	31
2.6 ชุดการสอน	36
2.7 ผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
2.8 สรุป	55
บทที่ 3 การสังเคราะห์และออกแบบวงจร	57
3.1 หลักการทำงานของ MO-CCCDTA ที่ทำงานในสภาวะอิ่มตัว	57
3.2 การสังเคราะห์วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ MO-CCCDTA	59
3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ MO-CCCDTA กรณีไม่เป็นอุดมคติ	62
3.4 การประยุกต์ใช้งานของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ MO-CCCDTA	64

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	3.5 สรุป	74
บทที่ 4	ผลการจำลองและทดลองการทำงาน	75
	4.1 ผลการจำลองและทดลองการทำงานของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ MO-CCCDTA	76
	4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรประยุกต์ใช้งาน	95
	4.3 สรุป	103
บทที่ 5	การสร้างและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอน	105
	5.1 กำหนดกลุ่มประชากรและเลือกลุ่มตัวอย่าง	105
	5.2 กำหนดหัวเรื่องและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม	106
	5.3 สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	106
	5.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล	115
	5.5 วิเคราะห์ข้อมูล	116
	5.6 ผลการวิจัย	119
	5.7 สรุป	124
บทที่ 6	สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	127
	6.1 สรุปผลการวิจัย	127
	6.2 อภิปรายผลการวิจัย	129
	6.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	130
บรรณานุกรม		133
ภาคผนวก ก	การวิเคราะห์หาขนาดของสัญญาณเอาต์พุต คาบเวลาและความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมโหมดกระแส การวิเคราะห์หาขนาดของสัญญาณเอาต์พุต คาบเวลาและความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมโหมดกระแส การวิเคราะห์หาการประมาณค่าอันดับที่สามของค่าดิวตี้ไซเกิ้ลของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์โหมดกระแส การวิเคราะห์หาขนาดของสัญญาณเอาต์พุต คาบเวลาของวงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์โหมดกระแส	139

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ภาคผนวก ข	ค่าพารามิเตอร์ของไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSpice	153
ภาคผนวก ค	การกำหนดความสำคัญของหัวข้อเรื่อง การกำหนดความสำคัญวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม การวิเคราะห์วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมเพื่อออกข้อสอบ การวิเคราะห์สื่อการสอน	155
ภาคผนวก ง	แบบประเมินผลความเหมาะสมชุดการสอน แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน แบบสอบถามอาจารย์ผู้สอน	171
ภาคผนวก จ	รายชื่อผู้เชี่ยวชาญประเมินเครื่องมือการวิจัย หนังสือเรียนเชิญผู้เชี่ยวชาญ	185
ภาคผนวก ฉ	ผลการประเมินดัชนีความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมกับ แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ การวิเคราะห์เพื่อหาคุณภาพของข้อสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	193
ภาคผนวก ช	คะแนนที่ได้จากการทำแบบฝึกหัด คะแนนที่ได้จากการทำแบบทดสอบ การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของชุดการสอน	203
ภาคผนวก ซ	ตัวอย่างคู่มือครู แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	209
ภาคผนวก ฌ	บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	301
ประวัติผู้วิจัย		303

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ข้อจำกัดของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ และวงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTA CCII และ OTRA	55
4-1	คุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยรวมของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ได้จากการวิจัย	86
5-1	ผลการประเมินความเหมาะสมของชุดการสอน	109
5-2	ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับชุดการสอน	112
5-3	สรุปผลการสร้างชุดการสอน	120
5-4	ผลการวิเคราะห์คะแนนแบบฝึกหัด	120
5-5	ผลการหาประสิทธิภาพของชุดการสอน	121
5-6	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจของนักศึกษา	121
ค-1	การประเมินความสำคัญของหัวข้อเรื่อง	156
ค-2	การประเมินความสำคัญของวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม	157
ค-3	การวิเคราะห์วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมเพื่อออกข้อสอบ	159
ค-4	การวิเคราะห์สื่อการสอน เรื่องวงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแสที่ทำงานในช่วงอิ่มตัวและการประยุกต์ใช้งาน	162
ฉ-1	ผลการประเมินดัชนีความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมกับแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์	194
ฉ-2	ผลคะแนนจากการทำแบบทดสอบของกลุ่มทดลอง	196
ฉ-3	การหาค่าความยากง่าย (p) ค่าอำนาจจำแนก (d)	199
ช-1	คะแนนแบบฝึกหัดค่าร้อยละของผู้เรียน	204
ช-2	คะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนและค่าร้อยละ	206

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	CC-CDTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล	10
2-2	โครงสร้างพื้นฐานของ CC-CDTA	11
2-3	โครงสร้างของวงจรผลต่างกระแสที่มีค่าความต้านทานแฝงที่ขาเข้า	12
2-4	วงจรขยายความนำถ่ายโอนอย่างง่าย	16
2-5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขา x ที่เป็นฟังก์ชั่นของแรงดันขา z	18
2-6	วงจรสมบูรณ์ของ CC-CDTA	20
2-7	วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา	21
2-8	วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	23
2-9	วงจรให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเบื้องต้น	24
2-10	รูปคลื่นสัญญาณของวงจรให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเบื้องต้น	25
2-11	แผนผังของวงจรสร้างสัญญาณ PWM	27
2-12	(ก) สัญญาณ PWM ที่ใช้วิธี Natural sampling (ข) สัญญาณ PWM ที่ใช้วิธี Uniform sampling	28
2-13	แผนผังของการกำเนิดสัญญาณ PWM โดยทั่วไปที่ใช้ในระบบสื่อสาร	29
2-14	ตัวอย่างสัญญาณที่จุดต่างๆ ของแผนผังของการกำเนิดสัญญาณ PWM ในภาพที่ 2-13	30
2-15	วงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์	32
2-16	สภาวะการคายประจุของ C ผ่านทรานซิสเตอร์ (ก) การทำงานของวงจรช่วง t_{+1} (ข) การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ C จากเวลา t_{+1} ถึง t_{-2}	33
2-17	วงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดต่อเพิ่มไดโอดที่ขาอีมิตเตอร์ Q_2	36
2-18	วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ OTA	43
2-19	วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ OTRA	44
2-20	วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII	46
2-21	วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTRA	48
2-22	วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTA	49
2-23	วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII	50
2-24	วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ใช้ OTA	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-25	วงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTA	53
2-26	วงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTRA	54
3-1	การต่อ MO-CCCDTA ให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัว	57
3-2	โครงสร้างของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์	60
3-3	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	61
3-4	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา	62
3-5	วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมโหมดกระแส	65
3-6	วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมโหมดกระแส	68
3-7	วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์โหมดกระแส	70
3-8	วงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์โหมดกระแส	73
4-1	โครงสร้างภายในของ MO-CCCDTA ที่ใช้ทดสอบการทำงาน	75
4-2	การเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา เมื่อมีการแปลงแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุต (ก) 100kHz (ข) 20MHz	76
4-3	การเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา เมื่อมีการแปลงแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุต (ก) 100kHz (ข) 20kHz	77
4-4	ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกาและแบบตามเข็มนาฬิกา	78
4-5	สัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} ของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	78
4-6	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทางไฟตรงเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} ของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	79
4-7	สัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B3} ของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-8	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทางไฟตรงเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B3}ของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	80
4-9	สัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	81
4-10	อัตราการคลาดเคลื่อนของขนาดสัญญาณเอาต์พุต เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก $0°C$ ถึง $100°C$ ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนนาฬิกาและแบบตามเข็มนาฬิกา	82
4-11	อัตราการคลาดเคลื่อนของกระแสขีดเริ่มด้านสูงและต่ำ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก $0°C$ ถึง $100°C$ ของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	83
4-12	ขนาดของกระแสขีดเริ่มด้านสูงและต่ำ เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B3} จาก $0\mu A$ ถึง $100\mu A$ ของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	84
4-13	ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} จาก $0\mu A$ ถึง $2mA$ ของ (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (ข) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	85
4-14	โครงสร้างของ MO-CCCDTA ที่สร้างจาก AD844 และ LM13600	87
4-15	วงจรชมิตต์ทริกเกอร์โหมดกระแสที่สร้างจาก AD844 และ LM13600	87
4-16	ผลการทดลองวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกาเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} (ก) $I_{B2}=103\mu A$ (ข) $I_{B2}=305\mu A$	88
4-17	ผลการทดลองวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกาเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} (ก) $I_{B2}=100\mu A$ (ข) $I_{B2}=308\mu A$	89
4-18	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} (ก) $I_{B2}=104\mu A$ (ข) $I_{B2}=302\mu A$	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-19	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} (ก) $I_{B2}=104\mu A$ (ข) $I_{B2}=302\mu A$	91
4-20	ผลการทดลองวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกาเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B3} (ก) $I_{B3}=40\mu A$ (ข) $I_{B3}=190\mu A$	92
4-21	ผลการทดลองวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกาเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B3} (ก) $I_{B3}=40\mu A$ (ข) $I_{B3}=190\mu A$	93
4-22	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B3} (ก) $I_{B3}=40\mu A$ (ข) $I_{B3}=180\mu A$	94
4-23	กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B3} (ก) $I_{B3}=40\mu A$ (ข) $I_{B3}=180\mu A$	95
4-24	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมโหมดกระแสในสภาวะเริ่มต้น	96
4-25	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมโหมดกระแส เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2}	96
4-26	ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B1} จาก $0\mu A$ ถึง $50\mu A$ ที่ตัวเก็บประจุค่าต่างๆ	96
4-27	สัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมในสภาวะเริ่มต้น	97
4-28	สัญญาณสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2} โดยกำหนดให้ข้ามการกำเนิดสัญญาณช่วงเริ่มต้น	98
4-29	สัญญาณสามเหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B5} โดยกำหนดให้ข้ามการกำเนิดสัญญาณช่วงเริ่มต้น	98
4-30	ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B6} จาก $1\mu A$ ถึง $100\mu A$ ที่ตัวเก็บประจุค่าต่างๆ	98
4-31	สัญญาณอินพุตเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตของ (ก) โดเมนของเวลา (ข) โดเมนของความถี่	99
4-32	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ เมื่อเปลี่ยนค่ากระแส I_{B2}	100
4-33	ค่าดิวตี้ไซเกิ้ล เมื่อเปลี่ยนแปลง i_i จาก $-30\mu A$ ถึง $30\mu A$	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-34	สัญญาณเอาต์พุตที่จุดต่างของวงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า T (ก) $3.85\mu s$ (ข) $197.5\mu s$	101
4-35	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า I_{B1}	102
4-36	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า I_{B2}	102
4-37	ความกว้างของสัญญาณพัลส์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า I_{B1} จาก $10\mu A$ ถึง $100\mu A$	103
5-1	กระบวนการดำเนินการวิจัย	107
5-2	การทดลองใช้ชุดการสอนกับกลุ่มทดลอง	114
5-3	การใช้ชุดการสอนกับกลุ่มตัวอย่าง	115
ก-1	วงจรกำเนิดสัญญาณเหลี่ยมโหมดกระแส	140
ก-2	วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมโหมดกระแส	142
ก-3	วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์โหมดกระแส	144
ก-4	วงจรโมโนสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์โหมดกระแส	150