โปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นแบบท่อน

นาย ธเนศ สุวงศ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

ISBN 974-566-641-6

013525

I15823908

A Transient Analysis Program for Piecewise Linear Electronic Circuits

Mr. Thanet Suvongse

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1986

ISBN 974-566-641-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นแบบท่อน
โดย	นาย ธเนศ สุวงศ์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. สรชัย พิศาลบุตร)
รักษาการในตำแหน่งรองคณบดีฝ่ายวิชาการ
ปฏิบัติราชการแทนรักษาการในตำแหน่งคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไคทม อารียา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยัน ติษยาธิคม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นแบบท่อน
ชื่อนิสิต	นาย ธเนศ สุวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2528

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึง การพัฒนาโปรแกรมต้นแบบบนไมโครคอมพิวเตอร์ สำหรับคำนวณทรานเซียนต์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นแบบท่อนทั่วไป วงจรดังกล่าวอาจจะประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ แหล่งกำเนิดแรงดัน แหล่งกำเนิดกระแส ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ออปแอมป์ และสวิตช์ โปรแกรมนี้เขียนขึ้นด้วยภาษาเบสิก ผู้ใช้สามารถป้อนรายละเอียดของวงจรได้ง่ายโดยใช้ภาษาที่โปรแกรมกำหนดขึ้น โปรแกรมนี้ผ่านการทดสอบได้อย่างน่าพอใจกับวงจรประเภทต่างๆ ได้แก่ วงจรขยาย วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นต้น

วิธีเชิงเลขต่างๆ ที่เป็นส่วนสำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่ วิธีโมดิฟายด์โนดัล สำหรับสร้างสมการวงจรอย่างมีระบบ วิธีแยกตัวประกอบแอล-ยู สำหรับแก้สมการเมตริก วิธีประมาณอนุพันธ์เวลาของตัวแปรสถานะของวงจร และเทคนิคสำหรับปรับขนาดขั้นเวลาโดยอัตโนมัติ

ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นที่ถูกประมาณด้วยวงจรสมมูลเชิงเส้นแบบท่อน อุปกรณ์เหล่านี้ แต่ละตัวจะมีการทำงานได้หลายภาวะ แต่ละภาวะการทำงานจะตรงกับวงจรสมมูลเชิงเส้นซึ่งแตกต่างกันไป เทคนิคต่างๆ ที่ใช้กับอุปกรณ์เหล่านี้ถูกพัฒนาขึ้นใหม่เองทั้งสิ้น และสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์เชิงเส้นแบบท่อนชนิดอื่นๆ เช่น ไทรีสเตอร์ ยูนิจังชันทรานซิสเตอร์ ซีเนอร์ไดโอด เป็นต้น

ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปที่ผู้ใช้ทั่วไปสามารถใช้ศึกษา และออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งชนิดเชิงเส้น และชนิดเชิงเส้นแบบท่อน

Thesis Title	A Transient Analysis Program for Piecewise Linear Electronic Circuits
Name	Mr. Thanet Suvongse
Thesis Advisor	Assoc. Professor Ekachai Leelarasmee, Ph.D.
Department	Electrical Engineering
Academic Year	1985

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSTRACT

This thesis describes the development of a prototype microcomputer program for computing the transient response of arbitrary piecewise linear electronic circuits. Such a circuit may consists of the following devices : resistors, capacitors, inductors, voltage sources, current sources, diodes, transistors, operational amplifiers, and switches. This program is written by using Applesoft Basic. The user can easily enter the description of a circuit by using an input language provided by the program. This program has been satisfactorily tested with many types of circuits such as : Amplifier, Schmitt trigger, Oscillator, and Power electronic circuits.

The numerical methods which constitute the main body of this thesis are : Modified Nodal Approach for systematically formulating the circuit equations, LU factorization for solving matrix equations, approximation of time derivative of state variable of a circuit and technique for adjusting the size of timestep automatically.

Diode, transistor and operational amplifier are nonlinear devices that are approximated by piecewise linear equivalent circuits. Each of these devices has many modes of operation. Each mode of operation corresponds to each linear equivalent circuit that is different from one another. All techniques, to cope with them, have been originally developed and can be extended to other piecewise linear devices such as thyristor, unijunction transistor, Zener diode.

The results of this research have indicated a good possibility of developing a software package that can be used by general users to analyse and to design both linear and piecewise linear electronic circuits.

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการวิจัยนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี ที่ได้กรุณาให้แนวความคิด พร้อมทั้งให้คำปรึกษา และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนให้การสนับสนุนจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ จนทำให้การวิจัยนี้ได้รับผลสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการพิมพ์และจัดรูปเล่มจนเป็นที่เรียบร้อย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง
กิตติกรรมประกาศ ..... ช
สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1. บทนำ 1
   1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
   1.2 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง 2
   1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย 3
   1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย 3
   1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 3
   1.6 เนื้อหาโดยย่อของวิทยานิพนธ์ 4
2. การวิเคราะห์วงจรต้านทานเชิงเส้น 6
   2.1 การจำแนกประเภทวงจร 6
   2.2 การสร้างสมการวงจรด้วยวิธีโมดิฟายด์โนดัล 7
   2.3 ตราประจำอุปกรณ์ 9
   2.4 การแก้สมการเมตริกด้วยวิธีแยกตัวประกอบแอล-ยู 10
3. การวิเคราะห์วงจรพลวัตเชิงเส้น 12
   3.1 บทนำ 12
   3.2 ตราประจำอุปกรณ์แบบอนุพันธ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ... 12
   3.3 การแก้สมการของวงจรพลวัตด้วยวิธีเชิงเลข 14
   3.4 ตราประจำอุปกรณ์แบบพีชคณิตของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ... 17
4. การวิเคราะห์วงจรพลวัตเชิงเส้นแบบท่อน 20
   4.1 ลักษณะสมบัติเชิงเส้นแบบท่อน 20
   4.2 ตราประจำอุปกรณ์ของไดโอด 22
   4.3 ตราประจำอุปกรณ์ของออปแอมป์ 23
      4.3.1 ตราประจำอุปกรณ์ของออปแอมป์ในภาวะไวงาน 23
      4.3.2 ตราประจำอุปกรณ์ของออปแอมป์ในภาวะอิ่มตัว 24

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
	4.4 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์	27
	4.4.1 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ในภาวะไวงาน	27
	4.4.2 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ในภาวะย้อนกลับ	28
	4.4.3 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ในภาวะอิ่มตัว	29
	4.4.4 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ภาวะไม่นำกระแส	30
	4.4.5 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์เมื่อใช้ตัวแปรแบบบูล	32
	4.5 ตราประจำอุปกรณ์ของสวิตช์	33
	4.6 การสร้างและแก้สมการวงจรเชิงเส้นแบบท่อน	34
	4.7 การตรวจสอบภาวะการทำงานของอุปกรณ์เชิงเส้นแบบท่อน	35
	4.7.1 ไดโอด	36
	4.7.2 ออปแอมป์	37
	4.7.3 ทรานซิสเตอร์	38
	4.7.4 สวิตช์	39
5.	การปรับขนาดขั้นเวลาอัตโนมัติ	40
	5.1 ประโยชน์ของการใช้ขนาดขั้นเวลาที่เปลี่ยนได้อย่างเหมาะสม	40
	5.2 ความหมายของ LTE (Local Truncation Error)	42
	5.3 การเลือกขนาดขั้นเวลาโดยใช้ LTE	43
	5.4 LTE ของอุปกรณ์พลวัต	44
6.	โปรแกรมต้นแบบสำหรับวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นแบบท่อน	49
	6.1 บทนำ	49
	6.2 โครงสร้างโปรแกรมและโมดการทำงานของ "TAPE"	50
	6.3 ข้อมูลทางเทคนิคและการใช้งานในโมด INPUT	51
	6.4 คำสั่ง EDIT	53
	6.4.1 ตัวต้านทาน	55
	6.4.2 ตัวเหนี่ยวนำ	56
	6.4.3 ตัวเก็บประจุ	57
	6.4.4 สวิตช์	58
	6.4.5 ทรานซิสเตอร์	59
	6.4.6 ค่าพารามิเตอร์ประจำเบอร์ทรานซิสเตอร์	61

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่

6.4.7 ออปแอมป์ 62
6.4.8 ค่าพารามิเตอร์ประจำเบอร์ออปแอมป์..... 63
6.4.9 ไดโอด 64
6.4.10 ค่าพารามิเตอร์ของไดโอด 65
6.4.11 แหล่งกำเนิดแรงดัน 66
6.4.12 แหล่งกำเนิดกระแส 67
6.5 คำสั่ง SIM SAVE CHANGE DISPLAY และ QUIT 68
6.6 ข้อมูลทางเทคนิคและการใช้งานในโมด SIM 70
6.6.1 โปรแกรมส่วนวิเคราะห์วงจร 70
6.6.2 คำสั่งในส่วนเอาต์พุท 75
7. การทดสอบโปรแกรม 76
7.1 วงจรกรองผ่านต่ำ (low pass filter) และวงจรกรองกรองผ่านสูง (high pass filter)..... 76
7.2 วงจรกรองผ่านต่ำที่มีการเปลี่ยนค่าคงตัวทางเวลา (time constant) อย่างทันที 82
7.3 วงจรขยายสัญญาณต่าง 84
7.4 วงจรขยายที่ใช้ออปแอมป์ 86
7.5 วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ 90
7.6 วงจรออสซิลเลเตอร์ 92
7.7 วงจรขยายไฟตรง 94
7.8 วงจรเอกะเสถียร 96
8. บทสรุป 98
8.1 สรุปผลการวิจัย 98
8.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย 99
เอกสารอ้างอิง 100
ประวัติ..... 101

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ตัวอย่างวงจรที่สามารถวิเคราะห์ได้	2
2.1	ตัวอย่างของวงจรต้านทาน	6
2.2	ตัวอย่างของวงจรพลวัต	7
2.3	ตัวอย่างวงจรที่ไม่สามารถใช้วิธี Node Analysis สร้างสมการโดยตรงได้	8
2.4	ตารางสมการเมตริกของวงจรในรูปที่ 2.3	9
2.5	ตราประจำอุปกรณ์	9
	(ก) แหล่งกำเนิดแรงดัน	9
	(ข) แหล่งกำเนิดกระแส	10
	(ค) ความต้านทาน	10
2.6	โครงสร้างเมตริกแบบ	11
	(ก) Lower Triangular	11
	(ข) Upper Triangular	11
3.1	ตัวอย่างของวงจรพลวัตเชิงเส้น	12
3.2	ตราประจำอุปกรณ์แบบอนุพันธ์ของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ	13
3.3	สมการของวงจรพลวัตเชิงเส้นในรูปที่ 3.1	14
3.4	ตัวอย่างของวงจรพลวัตที่มีจำนวนตัวแปรสถานะน้อยกว่าจำนวนตัวแปรที่มีอนุพันธ์ในสมการวงจร	15
3.5	ตัวอย่างของสมการเมตริกของวงจร RLC ที่ได้จากการประมาณอนุพันธ์	16
3.6	การแก้สมการอนุพันธ์-พีชคณิตที่เวลา t=0 ถึง t=T โดยวิธีคณิตศาสตร์เชิงเลข	17
3.7	ตัวเหนี่ยวนำที่ผ่านการประมาณอนุพันธ์	18
	(ก) วงจรสมมูล	18
	(ข) ตราประจำอุปกรณ์แบบพีชคณิต	18

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.8 ตัวเก็บประจุที่ผ่านการประมาณอนุพันธ์แล้ว 19
(ก) วงจรสมมูล 19
(ข) ตราประจำอุปกรณ์แบบพีชคณิต 19
4.1 ลักษณะสมบัติของไดโอด 20
(ก) ไม่เชิงเส้น 20
(ข) เชิงเส้นแบบท่อน 20
4.2 ตัวอย่างของวงจรเชิงเส้นแบบท่อน 21
4.3 ลักษณะสมบัติเชิงเส้นแบบท่อนของไดโอด 22
4.4 ไดโอดขณะไม่นำกระแส 22
(ก) วงจรสมมูล 22
(ข) ตราประจำอุปกรณ์ 22
4.5 ไดโอดขณะนำกระแส 23
(ก) วงจรสมมูล 23
(ข) ตราประจำอุปกรณ์ 23
4.6 ตราประจำอุปกรณ์ของไดโอดเมื่อใช้ตัวแปรแบบบูลเข้าช่วย 23
4.7 ลักษณะสมบัติของฟังก์ชั่นโอนย้ายของออปแอมป์ 24
4.8 วงจรสมมูลของออปแอมป์ 24
4.9 ตราประจำอุปกรณ์ของออปแอมป์ในภาวะไวงาน 25
4.10 วงจรสมมูลของออปแอมป์ในภาวะอิ่มตัว 26
(ก) ทางบวก 26
(ข) ทางลบ 26
4.11 ตราประจำอุปกรณ์ของออปแอมป์ในภาวะอิ่มตัวแล้ว 26
4.12 วงจรสมมูลแบบไฮบริด 27
4.13 วงจรสมมูลแบบ Ebers-Moll 28
4.14 ลักษณะสมบัติเชิงเส้นแบบท่อนของไดโอดที่รอยต่อ PN 28
4.15 วงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ในภาวะไวงาน 29
(ก) วงจรสมมูล 29
(ข) วงจรที่ใช้งาน 29
4.16 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ในภาวะไวงาน 29
4.17 วงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ในภาวะไวงานย้อนกลับ 30

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.18 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ในภาวะไวงานย้อนกลับ.....30
4.19 วงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ในภาวะอิ่มตัว.....31
4.20 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ในภาวะอิ่มตัว.....31
4.21 วงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ในภาวะไม่นำกระแส.....32
4.22 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์ในภาวะไม่นำกระแส.....32
4.23 ตราประจำอุปกรณ์ของทรานซิสเตอร์.....33
4.24 ลักษณะสมบัติของสวิตช์.....33
(ก) วงจรสมมูล.....33
(ข) สมบัติการทำงาน.....33
4.25 ตราประจำอุปกรณ์ของสวิตช์แบบสองทาง.....34
4.26 ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นแบบท่อน.....35
4.27 การตรวจภาวะการทำงานของไดโอด.....36
4.28 ลักษณะสมบัติโอนย้ายของออปแอมป์.....37
4.29 ลักษณะสมบัติเชิงเส้นแบบท่อนของรอยต่อ PN.....38
5.1 ตัวอย่างการคำนวณวงจร RC ที่ใช้ h คงที่.....41
5.2 แสดงจุดเวลาในการคำนวณวงจรรูป 5.1(ก) เมื่อให้ h เปลี่ยนแปลงได้.....42
5.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของการคำนวณค่า LTE_{n+1}.....43
5.4 แสดงการปรับขนาดขึ้นเวลากับการปรับค่า V_{n+1}.....47
6.1 โครงสร้างหลักของโปรแกรม 'TAPE'.....50
6.2 แสดงการเก็บข้อมูลของไดโอด.....51
6.3 การแสดงผลบนจอภาพในโมด INPUT.....53
6.4 ข้อมูลบนจอภาพเมื่อเข้าสู่โมด EDIT.....54
6.5 การป้อนข้อมูลของไดโอด.....54
(ก) ไดโอด D1อยู่ในโมดนำกระแส.....54
(ข) การป้อนข้อมูลของไดโอด.....54
6.6 การใส่ข้อมูลของความต้านทาน.....55
(ก) การแสดงผลบนจอภาพ.....55
(ข) การจัดข้อมูลใน array.....55
6.7 การใส่ข้อมูลของตัวเหนี่ยวนำ.....56

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.8 การใส่ข้อมูลของตัวเก็บประจุ.....57
6.9 การใส่ข้อมูลของสวิตช์.....58
6.10 การใส่ข้อมูลของทรานซิสเตอร์.....60
6.11 การใส่พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์.....61
6.12 การใส่ข้อมูลของออปแอมป์.....62
6.13 การใส่พารามิเตอร์ของออปแอมป์.....63
6.14 การใส่ข้อมูลของไดโอด.....64
6.15 การใส่พารามิเตอร์ของไดโอด.....65
6.16 การใส่ข้อมูลของแหล่งกำเนิดแรงดัน.....67
6.17 การจัดข้อมูลของแหล่งกำเนิดกระแส.....67
6.18 เมนูของคำสั่ง CHANGE 68
6.19 ลักษณะการแสดงผลข้อมูลวงจร.....69
6.20 โฟลว์ชาร์ทการทำงานในโมด 'SIM'.....71
6.21 การแสดงผลข้อมูลทางจอภาพเมื่อเข้าโมดวิเคราะห์วงจร.....72
6.22 โครงสร้างการโหลดข้อมูลในเมตริก A.....72
6.23 แสดงการโหลดข้อมูลในเมตริก B.....73
6.24 โครงสร้างการเก็บผลข้อมูลในเมตริก SM.....74
6.25 การแสดงผลข้อมูลทางจอภาพในโมดเอาต์พุท.....74
6.26 การแสดงผลทางจอภาพเมื่อ LIST RESULT และ PRINT RESULT.....75
7.1 วงจรกรอง.....77
(ก) วงจรกรองผ่านต่ำ.....77
(ข) วงจรกรองผ่านสูง.....77
7.2 กราฟผลการวิเคราะห์.....78
(ก) วงจรกรองผ่านต่ำในรูปที่ 7.1(ก).....78
(ข) วงจรกรองผ่านสูงในรูปที่ 7.1(ข).....79
7.3 วงจร RLC.....80
7.4 กราฟผลการวิเคราะห์วงจร RLC ในรูปที่ 7.3.....81
7.5 วงจรกรองผ่านต่ำที่มีการเปลี่ยนค่า time constant ทันที...82
7.6 กราฟผลการทดลองวงจรกรองผ่านต่ำในรูปที่ 7.5.....83
7.7 วงจรขยายสัญญาณต่าง.....84
7.8 ผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณต่างในรูปที่ 7.7.....85
7.9 วงจรขยายออปแอมป์.....86
7.10 กราฟผลการวิเคราะห์วงจรขยายที่ใช้ออปแอมป์ในรูปที่ 7.9...87

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.11 วงจรทดลองผลตอบสนองเชิงเวลาเนื่องจากความถี่หักมุม.....88
7.12 กราฟผลการทดลองวงจรออปแอมป์ในรูปที่ 7.11.....89
7.13 วงจรชมิตต์ทริกเกอร์.....90
7.14 กราฟผลการทดลองวงจรชมิตต์ทริกเกอร์.....91
7.15 วงจรออสซิลเลเตอร์.....92
7.16 กราฟผลตอบสนองเชิงเวลาของวงจรในรูปที่ 7.15.....93
7.17 วงจรขยายไฟตรง.....94
7.18 กราฟผลตอบสนองเชิงเวลาของวงจรในรูปที่ 7.17.....95
7.19 วงจรเอกะเสถียร.....96
7.20 กราฟผลการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 7.19.....97

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย