การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์วงจรรวมด้วยภาษา C++

นายรุ่งฤทธิ์ เจริญศุภกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3747-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED CIRCUIT ANALYSIS PROGRAM USING C++

Mr.Roongrit Charoensupkul

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3747-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์วงจรรวมด้วยภาษา C++
โดย	นายรุ่งฤทธิ์ เจริญศุภกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัยวุฒิ วงษ์โคเมท)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รุ่งฤทธิ์ เจริญศุภกุล : การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์วงจรรวมด้วยภาษา C++. (DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED CIRCUIT ANALYSIS PROGRAM USING C++) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.เอกชัย ลีลารัศมี, 81 หน้า. ISBN 974-17-3747-5.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมจำลองการทำงานวงจรไฟฟ้าบนไมโครซอฟต์วินโดวส์ โดยเน้นให้สามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรรวมได้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีการติดต่อกับผู้ใช้ในแบบกราฟิกโดยรับอินพุตจากผู้ใช้เป็นรูปผังวงจรไฟฟ้าและสามารถจำลองการทำงานวงจรไฟฟ้าได้ 4 แบบคือการจำลองเพื่อหาจุดทำงานสงบของวงจร จุดทำงานสงบแบบกวาด ผลตอบสนองเชิงเวลา และผลตอบสนองเชิงความถี่แบบกวาด อุปกรณ์หลักที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์วงจรรวมได้แก่ทรานซิสเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะมีทรานซิสเตอร์อยู่สองชนิดคือทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าชนิดมอสและทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ได้นำเอาแนวคิดเชิงวัตถุมาใช้ในการออกแบบโปรแกรม และได้พัฒนาเพื่อให้สามารถเพิ่มอุปกรณ์ตัวใหม่ได้โดยง่าย โดยที่อุปกรณ์ตัวใหม่ที่เพิ่มเข้าไปจะไม่กระทบกับกระเทือนต่ออุปกรณ์เดิมที่มีอยู่แล้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	รุ่งฤทธิ์ เจริญศุภกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2546		

4370657221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : CIRCUIT ANALYSIS PROGRAM / ELECTRONIC CIRCUIT SIMULATOR / INTEGRATED CIRCUIT

ROONGRIT CHAROENSUPKUL : DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED CIRCUIT ANALYSIS PROGRAM USING C++. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D., 81 pp. ISBN 974-17-3747-5.

This thesis presents a development of a circuit simulation program on Microsoft Windows platform. This program is specially designed to analyze the characteristics of circuits. The program has a graphical user interface that receives an input from a user in a form of a schematic diagram. The program is also able to perform 4 types of simulation; i.e. bias analysis, dc sweep analysis, time domain analysis and AC sweep analysis. In this thesis, the most important components used in analyzing the circuit are transistors of the following two types i.e. MOS field effect transistor and bipolar junction transistor. This program is designed based on applying an object-oriented concept. So the developer can easily add new electronic components into the program without affecting existing one.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature รังฤทธิ์ เสริญสกล

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณกานต์ ทวีศักดิ์ น้องไพโรจน์ น้องโอมรินทร์ สำหรับความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำในการวิเคราะห์วงจร รวมถึงช่วยวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่ใช้ทดสอบโปรแกรม และขอขอบคุณน้องสราวุธ น้องกวิน น้องระวิวร น้องภัทธีรา ที่คอยให้ความช่วยเหลืออยู่ตลอด

ขอขอบคุณน้องชลลดา สำหรับกำลังใจอันเต็มเปี่ยมตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณมารดา และพี่สาว ที่สนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฑ

บทที่ 1 1

บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย 3

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย 3

บทที่ 2 4

ทฤษฎีพื้นฐาน 4

2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 4

2.1.1 ตัวแปรของวงจร 4

2.1.2 การสร้างสมการเมทริกซ์ของวงจรด้วยวิธีโมดิฟายด์โนดัล 4

2.2 ทฤษฎีด้านวิธีเชิงตัวเลข 6

2.2.1 การแก้สมการวงจรไฟฟ้า 6

2.2.2 การแก้สมการเมทริกซ์ด้วยวิธีแยกตัวประกอบแอล-ยู 6

2.2.2.1 การแยกส่วน 6

2.2.2.2 การแทนที่ 7

2.2.3 ขั้นตอนวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Algorithm) [5] 8

2.2.4 วิธีของออยเลอร์ 9

บทที่ 3 11

การทำงานของทรานซิสเตอร์ 11

3.1 ทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1 แหล่งจ่ายกระแสเดรน 12
3.1.1.1 Conductance 15
3.1.1.2 Transconductance 16
3.1.1.3 Bulk transconductance 16
3.1.2 ตัวเก็บประจุที่เกต 17
3.1.2.1 ตัวเก็บประจุระหว่างเกต-บัล์ค (C_{gb}) 18
3.1.2.2 ตัวเก็บประจุระหว่างเกต-ซอร์ส (C_{gs}) 18
3.1.2.3 ตัวเก็บประจุระหว่างเกต-เดรน (C_{gd}) 18
3.1.3 ไดโอด 19
3.1.3.1 การคำนวณค่ากระแสอิ่มตัวประสิทธิผล 19
3.1.3.2 การคำนวณกระแสที่ไหลผ่านไดโอด 20
3.1.3.3 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุของไดโอด 22
3.1.4 ทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบพี 24
3.2 ทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ 25
3.2.1 ไดโอด 27
3.2.2 แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยกระแส 28
3.2.3 ทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อแบบ PNP 29
3.3 สรุปท้ายบท 30
บทที่ 4 31
การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-oriented programming) 31
4.1 คลาส 31
4.2 แนวคิดเชิงวัตถุ 32
4.2.1 การสืบทอด (Inheritance) 32
4.2.2 การพ้องรูป (Polymorphism) 34
4.2.3 การหุ้มห่อ (Encapsulation) 35
4.3 สรุปท้ายบท 37
บทที่ 5 38
การพัฒนาโปรแกรมในส่วนของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 38
5.1 ตราประจำอุปกรณ์ 38

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1 การสร้างตราประจำอุปกรณ์ 38
5.2 โครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า 39
5.2.1 ตัวต้านทาน 40
5.2.2 ตัวเก็บประจุ 41
5.2.3 แหล่งจ่ายกระแส 44
5.2.4 แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน 45
5.2.5 ไดโอด 46
5.3 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 49
5.3.1 ตัวเก็บประจุในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 49
5.3.2 ไดโอดในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 49
5.3.3 ทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 50
5.4 สรุปท้ายบท 54
บทที่ 6 55
การออกแบบโปรแกรม 55
6.1 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ 55
6.1.1 การแสดงผลอุปกรณ์ไฟฟ้า 55
6.1.2 คลาส Component 56
6.2 ส่วนที่ทำการวิเคราะห์ 57
6.2.1 คลาส CircuitEquation 57
6.2.2 คลาส SimulatorDC 58
6.2.3 คลาส SimulatorTR 59
6.2.4 คลาส SimulatorDCSweep 60
6.2.5 คลาส SimulatorAC 62
6.2.6 คลาส Simulator 63
6.2.7 คลาส Model 63
6.2.8 การสร้างวัตถุจากคลาส Model 65
6.3 สรุปท้ายบท 67
บทที่ 7 68
การทดสอบ และสรุปผล 68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.1 ผลการทดสอบ 68
7.1.1 วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier) 68
7.1.2 วงจรทดสอบตัวเก็บประจุที่เกต 71
7.1.3 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม 76
7.2 สรุป 77
7.3 ข้อเสนอแนะ 79
รายการอ้างอิง 80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 81

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวงจรที่ไม่สามารถใช้วิธี Node Analysis สร้างสมการโดยตรงได้ 5
รูปที่ 2.2 รูปแบบของเมทริกซ์ L และ U 7
รูปที่ 2.3 การคำนวณหา x ใหม่จากค่ากำหนดเริ่มต้น x_0 ในขั้นตอนวิธีของนิวตัน-ราฟสัน 8
รูปที่ 2.4 ลักษณะการลู่เข้าสู่ผลลัพธ์โดยขั้นตอนวิธีของนิวตัน-ราฟสัน 9
รูปที่ 2.5 วิธีของออยเลอร์ 10
รูปที่ 3.1 สัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 11
รูปที่ 3.2 โครงสร้างภายในของทรานซิสเตอร์มอสแบบเอ็น 12
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบเอ็น 12
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของกระแสเดรน 15
รูปที่ 3.5 ตัวเก็บประจุในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 17
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของรอยต่อในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 22
รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของไดโอดภายในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 24
รูปที่ 3.8 โครงสร้างภายในของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบพี 25
รูปที่ 3.9 สัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ 25
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ 26
รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อแบบ NPN 26
รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลไดโอดในทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ 28
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลที่ใช้ในการคำนวณของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อแบบ NPN 29
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อแบบ PNP 30
รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลที่ใช้ในการคำนวณของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อแบบ PNP 30
รูปที่ 4.1 สัญลักษณ์ของคลาส 31
รูปที่ 4.2 คลาส Shape 32
รูปที่ 4.3 สัญลักษณ์แทนการสืบทอด 33
รูปที่ 4.4 ลำดับชั้นของคลาส Shape 33
รูปที่ 4.5 หลักการการพ้องรูป 35
รูปที่ 4.6 คลาส Matrix 36
รูปที่ 4.7 สัญลักษณ์แสดงระดับขั้นของการหุ้มห่อ 36
รูปที่ 5.1 อุปกรณ์แยกเดี่ยว 38
รูปที่ 5.2 รูปแบบทั่วไปของอุปกรณ์ไฟฟ้า 39

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.3 คลาส Model 40
รูปที่ 5.4 สัญลักษณ์ตัวต้านทาน 40
รูปที่ 5.5 คลาส ModelResistor 40
รูปที่ 5.6 คลาส ModelResistorAC 41
รูปที่ 5.7 สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุ 41
รูปที่ 5.8 คลาส ModelCapacitor 42
รูปที่ 5.9 คลาส ModelCapacitorTR 42
รูปที่ 5.10 คลาส ModelCapacitorAC 43
รูปที่ 5.11 สัญลักษณ์แหล่งจ่ายกระแส 44
รูปที่ 5.12 คลาส ModelCurrent 44
รูปที่ 5.13 สัญลักษณ์แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน 45
รูปที่ 5.14 คลาส ModelCurrentCtrlVoltage 45
รูปที่ 5.15 สัญลักษณ์ไดโอด 46
รูปที่ 5.16 วงจรสมมูลของไดโอด 46
รูปที่ 5.17 คลาส ModelDiode 47
รูปที่ 5.18 การเกิดการล้นของข้อมูล 48
รูปที่ 5.19 การเปลี่ยนจากการอ้างอิงด้วยแรงดันเป็นอ้างอิงด้วยกระแส 48
รูปที่ 5.20 คลาส ModelCapacitor0Mos 49
รูปที่ 5.21 คลาส ModelDiodeMos 50
รูปที่ 5.22 คลาส ModelMos 51
รูปที่ 5.23 คลาส ModelMos01 51
รูปที่ 5.24 ลักษณะของค่ากระแสเดรน 52
รูปที่ 5.25 ลักษณะของการวนซ้ำในการคำนวณเชิงเส้นของกระแสเดรน 53
รูปที่ 5.26 การกำหนดแรงดันในทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 53
รูปที่ 6.1 โครงสร้างของโปรแกรมวิเคราะห์วงจรรวม 55
รูปที่ 6.2 รูปร่างทั่วไปของอุปกรณ์ไฟฟ้า 55
รูปที่ 6.3 แผนภาพคลาสของอุปกรณ์ตัวต้านทาน 56
รูปที่ 6.4 คลาส CircuitEquation 57
รูปที่ 6.5 คลาส SimulatorDC 58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.6 ขั้นตอนการหาจุดทำงานสงบ 59
รูปที่ 6.7 ขั้นตอนการหาผลตอบสนองเชิงเวลา 60
รูปที่ 6.8 คลาส SimulatorTR 61
รูปที่ 6.9 คลาส SimulatorDCSweep 61
รูปที่ 6.10 ขั้นตอนการหาจุดทำงานสงบแบบกวาด 62
รูปที่ 6.11 ขั้นตอนการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ 63
รูปที่ 6.12 คลาส SimulatorAC 64
รูปที่ 6.13 โครงสร้างคลาส Simulator 64
รูปที่ 6.14 ตัวอย่างโครงสร้างคลาส Model 65
รูปที่ 6.15 การติดต่อระหว่างคลาส Component และ Simulator ในการสร้างวัตถุจากคลาส Model 66
รูปที่ 7.1 วงจรขยายผลต่าง 68
รูปที่ 7.2 ค่าแรงดันขาออก 70
รูปที่ 7.3 ค่าความผิดพลาด 70
รูปที่ 7.4 วงจรทดสอบตัวเก็บประจุที่โนดเกต 71
รูปที่ 7.5 ค่าตัวเก็บประจุที่เกต 72
รูปที่ 7.6 ค่าตัวเก็บประจุที่เกตเปรียบเทียบกับค่าระดับ 2 ในโปรแกรม Star-HSpice 73
รูปที่ 7.7 วงจรซอร์สร่วม 74
รูปที่ 7.8 แรงดันขาเข้า 75
รูปที่ 7.9 ค่าแรงดันขาออกเปรียบเทียบกับค่าระดับ 1 ในโปรแกรม Star-HSpice 75
รูปที่ 7.10 ค่าแรงดันขาออกเปรียบเทียบกับค่าระดับ 2 ในโปรแกรม Star-HSpice 76
รูปที่ 7.11 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม 77
รูปที่ 7.12 ค่าแรงดันขาออก 78
รูปที่ 7.13 ค่าความผิดพลาด 78

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบวิธีต่างๆ ในการสร้างสมการวงจร 5
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดมอส 13
ตารางที่ 3.2 ค่าตัวเก็บประจุที่เกต 19
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการทำงานของไดโอด 21
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ 26
ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบเอ็นที่ใช้ในวงจรขยายผลต่าง 69
ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบพีที่ใช้ในวงจรขยายผลต่าง 69
ตารางที่ 7.3 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดมอสแบบเอ็น 71
ตารางที่ 7.4 ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดสองหัวต่อ 76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย