สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การประยุกต์ใช้โปรแกรมการออกแบบวงจรกับการศึกษาทางวิศวกรรมศาสตร์

Application of Electronic Circuit Analysis Program in Engineering Education

โดย

นาย วันชัย ริ้วรุจา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TK
9847
.3426 ร

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....32247
วัน, เดือน, ปี.....11 มี.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ 1

Abstract 1

1 บทนำ 2

2 ส่วนประกอบการคำนวณอนาลอก 2

2.1 โอเปอร์เรชั่นนอลแอมป์ปีฟลายเออร์และวงจรขยายสัญญาณรวม 3

2.2 วงจรขยายสัญญาณอินทิรเกรติงและโพเทนทิรโอมิเตอร์ 4

2.3 ส่วนประกอบตัวคูณ 6

2.4 ส่วนประกอบตัวหาร 7

3. การพิจารณาตัวอย่างการเลียนแบบ 8

4. สรุป 9

เอกสารอ้างอิง 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย การประยุกต์ใช้โปรแกรมการออกแบบวงจรกับการศึกษาทางวิศวกรรมศาสตร์

Application of Electronic Circuit Analysis Program in Engineering Education

ผู้ดำเนินการวิจัย นายวันชัย ริ้วรุจา (Mr.Vanchai Riewruja)

บทคัดย่อ

ในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในปัจจุบันได้มีการนำเอาเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์มาช่วยทางด้านการเรียนการสอน เพื่อช่วยให้นักศึกษาสามารถเข้าใจถึงคุณสมบัติของระบบต่าง ๆ เช่น วงจรไฟฟ้า วงจรอิเล็คทรอนิกส์ ระบบควบคุม และเครื่องมือวัด การใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์มาช่วยสอนจำเป็นที่จะต้องมีโปรแกรมสำเร็จรูปเฉพาะวิชานั้น ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปจะมีราคาแพง สำหรับในโครงงานนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำเอาโปรแกรมการออกแบบวงจรซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของระบบต่าง ๆ โดยใช้หลักการของอนาลอกคอมพิวเตอร์

Abstract

In recent years microcomputer is important tools for engineering students study aid in subjects such as electric circuits, control systems and instrumentation. The specific software run on microcomputer is high investment. For this reason, this project is to investage application of electronic circuit analysis program for studying these which based on the principle of analogue computer. The element of analogue computer is simulated in to the form of subcircuit programs by electronic circuit analysis program.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

การวิเคราะห์ปัญหาของระบบกลศาสตร์ที่ว่าด้วยการเคลื่อนไหวในสาขาวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะสำหรับปัญหาแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น อนาลอกคอมพิวเตอร์คือเครื่องมือที่เหมาะสม สำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบและใช้ศึกษาผลตอบสนองของระบบทั้งหมด แม้ว่าอนาลอกคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้อย่างได้ผล อย่างไรก็ตามความเที่ยงตรงที่อนาลอกคอมพิวเตอร์สามารถทำได้นั้นมีขีดจำกัด โดยปกติความเที่ยงตรงที่ดีกว่า 1 ใน 1000 ทำได้ยากมากในทางปฏิบัติของอนาลอกคอมพิวเตอร์ ค่าผิดพลาดที่เพิ่มเข้ามาในระหว่างการคำนวณได้แก่ ผลของการอินทิเกรต และผลของการบวก ซึ่งเป็นสาเหตุของการคลาดเคลื่อน สิ่งเหล่านี้เป็นเหตุให้อนาลอกคอมพิวเตอร์ไม่ได้รับความนิยม ในอีกด้านหนึ่งดิจิตอลคอมพิวเตอร์สามารถปฏิบัติกับพฤติการณ์เช่นนั้นได้ถ้ามันเป็นตัวเลียนแบบ [1]

ในการออกแบบและพัฒนาวงจรอิเลคทรอนิคส์ มีโปรแกรมทางดิจิตอลคอมพิวเตอร์อยู่เป็นจำนวนมากที่สามารถเลียนแบบสมรรถนะทางไฟฟ้าของวงจรอิเลคทรอนิคส์ได้อย่างถูกต้อง [2-5] ตัวอย่างเช่น โปรแกรม CAD (Computer-Aided Design) ชื่อ SPICE 2 ซึ่งเป็นโปรแกรมหนึ่งของโปรแกรมเลียนแบบจำนวนมากที่ได้รับความเชื่อถืออย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม SPICE ได้ถูกข้อกำหนดให้ใช้ในขอบเขตการวิเคราะห์และออกแบบวงจรอนาลอก [6-8] ในสมัยก่อนโปรแกรมวิเคราะห์ทางอิเลคทรอนิคส์ ECAP ได้ถูกนำมาใช้เลียนแบบระบบทางฟิสิกส์เป็นผลสำเร็จ [9] แต่ไม่สะดวกสำหรับผู้ใช้งานซึ่งจำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับวิธีการทรานสฟอร์มพฤติการณ์ของระบบ เพื่อให้สอดคล้องกับอิเลคทรอนิคส์เนคเวอร์ค ความจำเป็นอันนี้ทำให้เกิดความไม่สะดวกเป็นการจำกัดเกี่ยวกับการแสดงออกในรูปสูตรของแบบจำลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะพัฒนาให้โปรแกรมเลียนแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาจำนวนมากในสาขาวิศวกรรมสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบ ตัวอย่างเช่น อนาลอกคอมพิวเตอร์ ส่วนประกอบพื้นฐานสำหรับการคำนวณอนาลอก เช่น การอินทิเกรตสามารถเลียนแบบได้โดยใช้วงจรย่อย ดังนั้นการเลียนแบบระบบสามารถใช้เป็นขั้นตอนอนาลอกคอมพิวเตอร์มาตรฐานได้

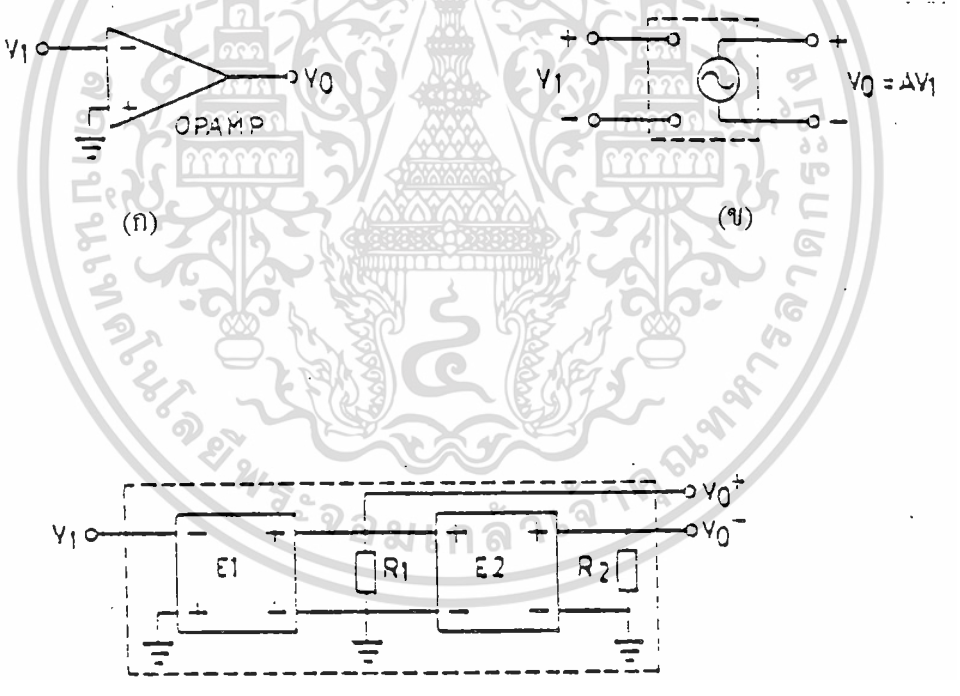
2. ส่วนประกอบการคำนวณอนาลอก

หลักการพื้นฐานอนาลอกคอมพิวเตอร์คือ สิ่งประดิษฐ์อิเลคทรอนิคส์ นั้นคือจะต้องรู้เรื่องเกี่ยวกับปฏิบัติการพื้นฐานของส่วนประกอบต่อไปนี้ การคูณหรือการหารด้วยตัวคงที่ที่มีค่าเป็นบวกหรือลบ การบวกของจำนวนตัวแปรทางคณิตศาสตร์ และการอินทิเกรตตัวแปรด้วยตัวแปรอื่น ส่วนประกอบการคำนวณอนาลอกพื้นฐานปฏิบัติตามข้างบนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และวิธีการเลียนแบบอุปกรณ์เหล่านี้ทำได้โดยใช้ส่วนประกอบวงจรของ SPICE จะพิจารณาในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 โอเปอร์เรชั่นนอลแอมป์ปิฟลายเออร์และวงจรขยายสัญญาณรวม

ออปแอมป์ คือส่วนที่สำคัญของอนาลอกคอมพิวเตอร์ โดยเหตุที่ส่วนประกอบอันนี้ประกอบด้วยอินพุทและอิมพีแดนซ์ป้อนกลับที่เหมาะสม รูปแบบของการสร้างอิเลคทรอนิคส์พื้นฐานสำหรับการบวกและการอินทิเกรตบน SPICE ออปแอมป์ในอุดมคติสามารถเลียนแบบได้โดยแหล่งกำเนิดโวลท์เตจที่ถูกควบคุมด้วยโวลท์เตจ (VCVS) ดังรูปที่ 1(ก) โดยที่ค่าอัตราการขยายคงที่ A ถูกกำหนดให้ค่าสูงมาก ๆ อย่างไรก็ตามค่าอัตราการขยายสามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบ เราเลือกวงจรย่อยออปแอมป์ในอุดมคติเพื่อเลียนแบบแผนผังวงจรในรูปที่ 1(ค) โดยที่อัตราการขยายโวลท์เตจของ VCVS E1 และ E2 ถูกกำหนดให้เป็น 10^6 และ -1 ตามลำดับ และตัวต้านทาน 1 โอมห์ ใช้สำหรับเป็นโหลดอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดโวลท์เตจในอุดมคติ แบบจำลองออปแอมป์ในอุดมคตินี้ได้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในการเลียนแบบส่วนประกอบอนาลอกคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 ออปแอมป์ในอุดมคติ

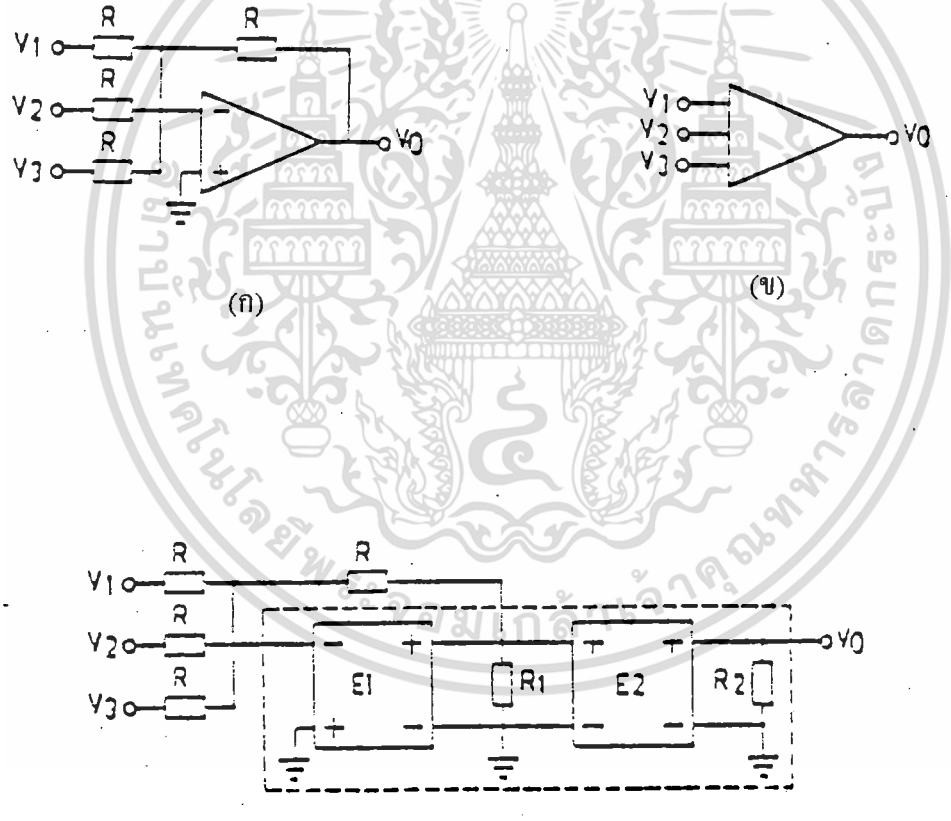
สำหรับผลของการรวมตัวแปรทางพีชคณิตที่มีมากกว่าสองจำนวน การกระทำอาจเป็นผลสำเร็จโดยใช้ออปแอมป์ได้แสดงในรูปที่ 2(ก) โดยที่วงจรนั้นคือมาตรฐานการคำนวณอนาลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญลักษณ์ได้แสดงในรูปที่ 2(ข) แบบจำลอง SPICE สำหรับวงจรขยายสัญญาณรวมได้แสดงในรูปที่ 2 (ค)

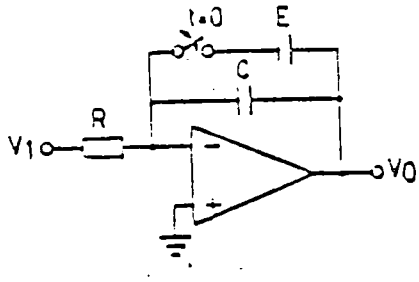
2.2 วงจรขยายสัญญาณอินทิรเกรติงและโพเทนทิรโอมิเตอร์

ในรูปที่ 3(ก) แสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ตามรูปแบบของการอินทิรเกรตทำให้เป็นจริงได้โดยใช้ออปแอมป์ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์สับเปลี่ยนพิเศษดังที่แสดงในรูปใช้สำหรับกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น E โวลท์บนค่าคาปาซีสเตอร์ C สัญญลักษณ์ได้แสดงในรูปที่ 3(ข) และแผนผังการเลียนแบบได้แสดงในรูปที่ 3(ค) ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นถูกรวมเข้าไปด้วย เนื่องด้วยโปรแกรม SPICE มีข้อความที่สามารถระบุค่าโวลท์เตจเริ่มต้นที่ตกคร่อมบนคาปาซิสเตอร์ได้

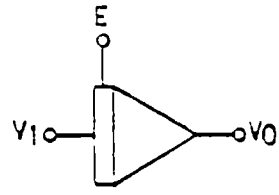


รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณรวม

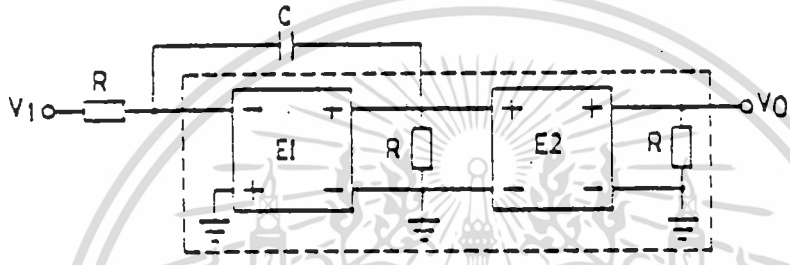
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



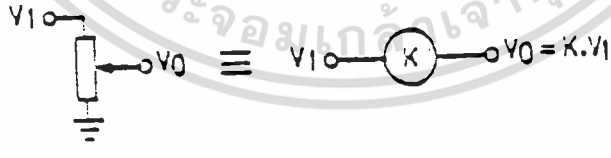
(ข)



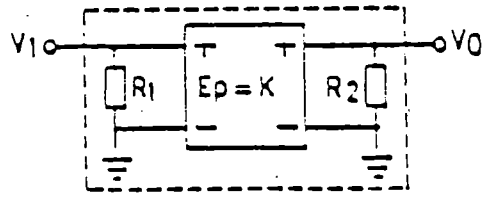
(ค)

รูปที่ 3 วงจรขยายสัญญาณอินทิเกรติง

โพเทนทิรโอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการคูณหรือการหารด้วยค่าคงที่ที่มีค่าเป็นทั้งบวกและลบ เช่น วงจรโวลท์เตจดิไวเดอร์ได้แสดงในรูปที่ 4(ก) และค่า K นี้สามารถกำหนดได้โดย Ep ซึ่งก็คือค่าอัตราการขยายคงที่ของ VCVS



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 โพเทนทิรโอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ส่วนประกอบตัวคูณ

การควบคุมแหล่งกำเนิดบน SPICE สามารถกำหนดฟังก์ชั่นควบคุมแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ในรูปแบบของโพลิโนเมียนของลำดับและขนาดใด ๆ นั้นคือการควบคุมแหล่งกำเนิดสามารถที่จะควบคุมได้หลายแบบหรือโหนดอินพุทและโวลท์เตจเอาท์พุท (หรือกระแส) ถูกรวมเข้าไปด้วยกันของโวลท์เตจอินพุท (หรือกระแส) ที่โหนดควบคุม ตัวอย่างข้อความสำหรับแหล่งกำเนิดโวลท์เตจที่ถูกควบคุมด้วยโวลท์เตจแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

E1 3 0 POLY(2) 1 0 2 0 P0 P1 P2 P3 P4 (1)

โดยที่เทอม POLY(2) คือการระบุให้เป็นแหล่งกำเนิดที่ควบคุมแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น 2 ขนาด โหนด 3 0 คือโหนดเอาท์พุท และโหนด 1 0, 2 0 คือโหนดอินพุท โวลท์เตจเอาท์พุท Vout เป็นความสัมพันธ์กับโวลท์เตจอินพุทที่โหนดควบคุม V_1 และ V_2 คือ

$$V_0 = P0+P1.V_1+P2.V_2+P3.V_1.V_1+P4.V_1.V_2 \quad (2)$$

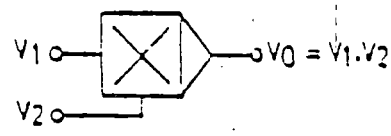
ถ้าเราเลือก P0=P1=P2=P3=0 และ P4=1 ฉะนั้นจะได้ V_0 ดังนี้คือ

$$V_0 = V_1.V_2 \quad (3)$$

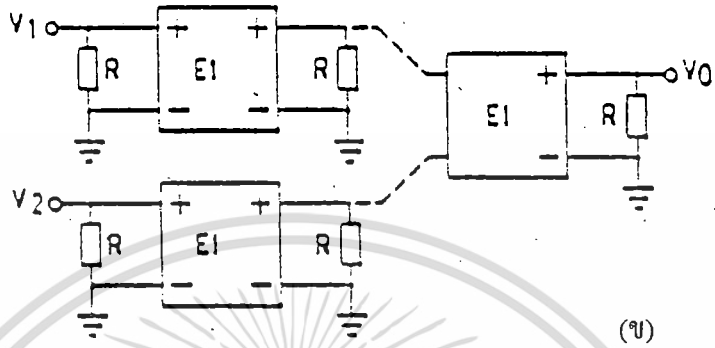
เป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดที่ถูกควบคุมด้วยโวลท์เตจแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นของสมการ (1) สามารถใช้เลียนแบบอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวคูณได้ตามที่ต้องการ เมื่อโวลท์เตจเอาท์พุทเท่ากับ V_1 คูณด้วย V_2 ถูกต้องโดยแท้จริง สัญญาลักษณ์และแผนผังการเลียนแบบของตัวคูณได้แสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5 (ข) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



(ก)

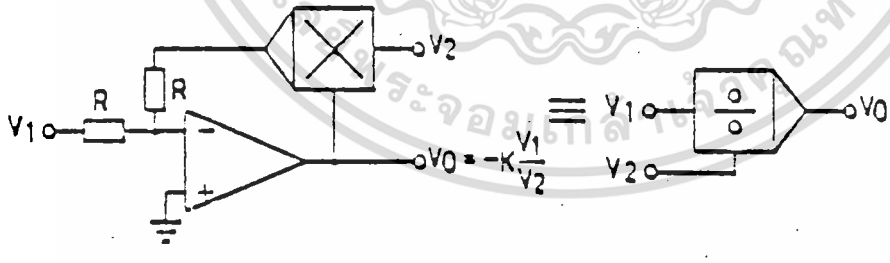


(ข)

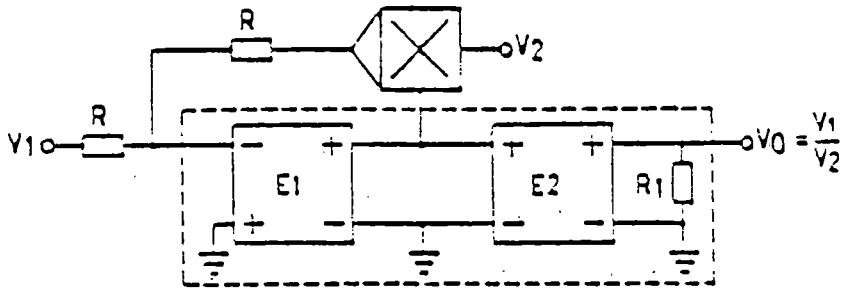
รูปที่ 5 ตัวคูณ

2.4 ส่วนประกอบตัวหาร

ในการคำนวณอนาลอกตัวคูณถูกใช้สำหรับการคูณและการหารดังที่ได้แสดงในรูปที่ 6(ก) ส่วนประกอบตัวหารสามารถทำให้เป็นจริงได้โดยการใส่ส่วนประกอบตัวคูณเข้าไปที่เส้นทางป้อนกลับของออปแอมป์ ฉะนั้นแผนผังการเลียนแบบการทำงานของส่วนประกอบตัวหารสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6(ข) ข้อสังเกตุที่แสดงให้เห็นคือเครื่องหมายของโวลท์เตจเอาท์พุทในรูปที่ 6(ข) มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับกราวน์



(ก)



(ข)

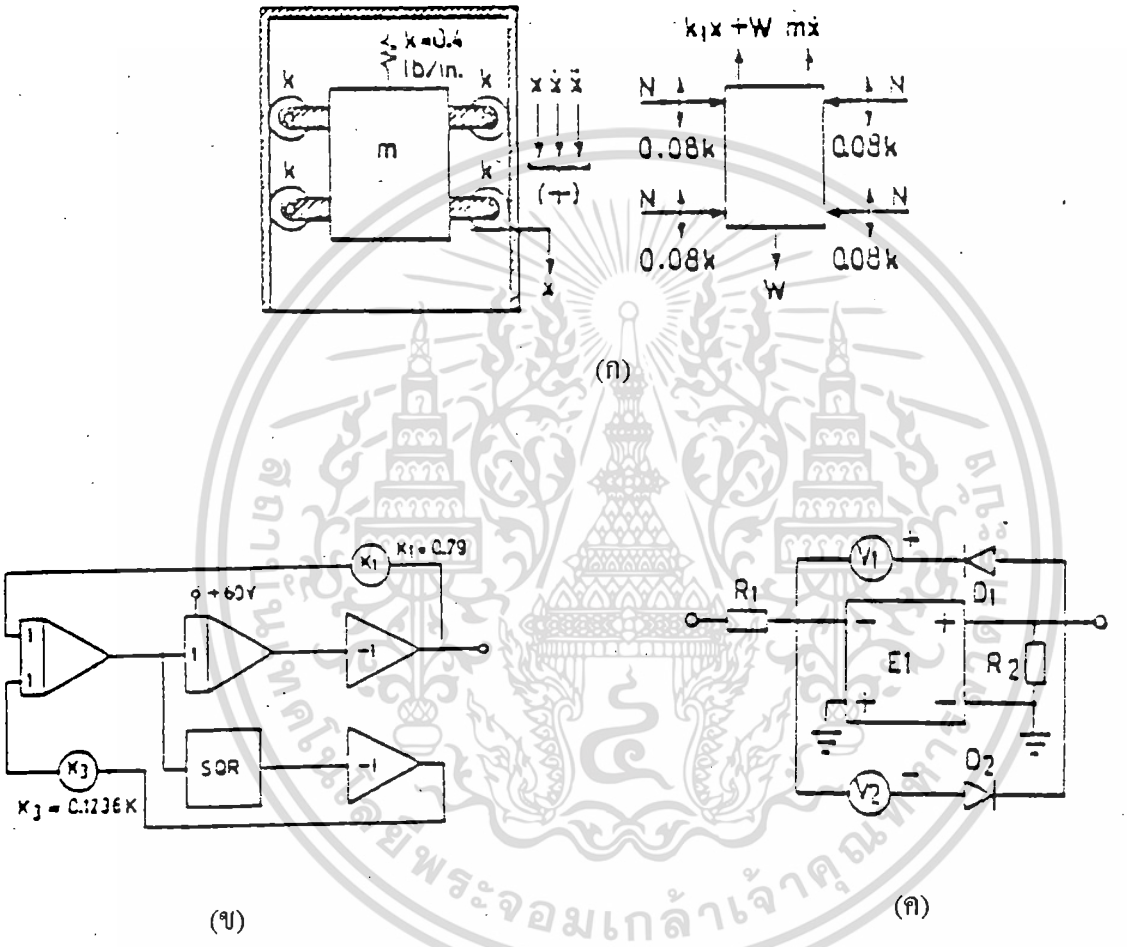
รูปที่ 6 ตัวหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32247

3. การพิจารณาตัวอย่างการเลียนแบบ

ในหัวข้อนี้มี 2 ตัวอย่าง สำหรับใช้แสดงสมรรถนะของโปรแกรมเลียนแบบ ตัวอย่างที่ 1 แสดงให้เห็นการใช้ตัวเลียนแบบอนาลอกคอมพิวเตอร์ในการเลียนแบบปรากฏการณ์ตามหลักทางฟิสิกส์ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง การศึกษาเรื่องนี้คือการหาสาเหตุของเรื่องการเคลื่อนที่ของระบบสปริงและมวล ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 7(ก)

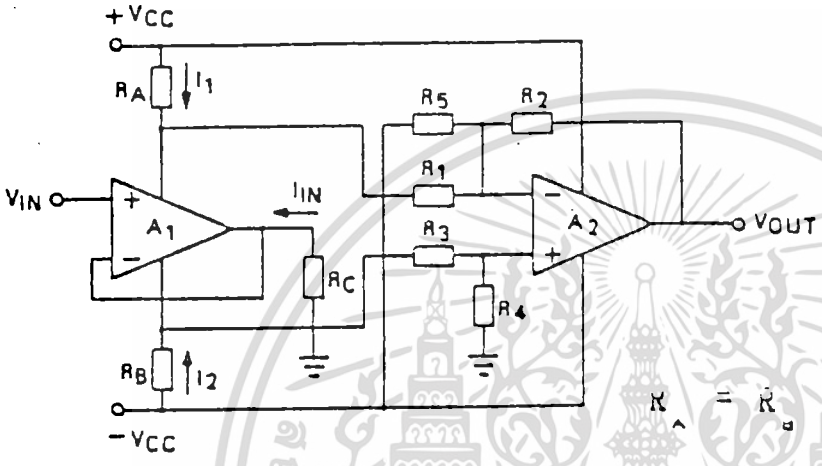


รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของระบบสปริงและมวล

ในขณะที่ซึ่งการเคลื่อนที่ของมวลถูกจำกัดดังที่ได้แสดงในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบสปริงและมวล และสมการโวลท์เตจและค่าคงที่ที่จำเป็นสำหรับใช้เพื่อการเลียนแบบได้อธิบายไว้ให้แล้วในหนังสืออ้างอิง [10] แผนผังการเลียนแบบอนาลอกคอมพิวเตอร์ของระบบได้แสดงในรูปที่ 7(ข) จะเห็นว่านั้นคืออุปกรณ์แบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเรียกว่าวงจร SQR เพื่อจ่ายสัญญาณรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมตามที่ต้องการ ในการเลียนแบบการทำงานนี้ได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอดถูกรวมเข้าไปในวงจรด้วยดังที่ได้แสดงในรูปที่ 7(ค) ซึ่งได้สำหรับความประสงค์นี้ โปรแกรมเลียนแบบ SPICE ได้แสดงในรูปที่ 9 และผลตอบสนองทั้งหมดของระบบที่ได้จากการเลียนแบบสำหรับค่าคงที่ K จำนวน 3 ค่าได้แก่ค่า K = 0.2, 0.5 และ 1 โดยที่ค่า $K_3 = 0.1236(K)$ และ K คือค่าคงที่ของสปริง ได้แสดงในรูปที่ 11 ตัวอย่างที่ 2 แสดงให้เห็นการนำโปรแกรมไปใช้เลียนแบบการทำงานของวงจรเร็กติไฟเออร์แบบเต็มคลื่นที่ใช้ออปแอมป์และตัวต้านทานเท่านั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 8 โปรแกรมเลียนแบบ SPICE ได้แสดงในรูปที่ 10 และในรูปที่ 12 แสดงผลที่ได้จากการเลียนแบบของโปรแกรม



$R_A = R_B = 75$, $R_C = 32$,

$R_1 = R_3 = 22K$, $R_2 = 10K$,

$R_4 = 5.27K$, $R_5 = 11.14K$

รูปที่ 8 วงจรเร็กติไฟเออร์แบบเต็มคลื่น

4. สรุป

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิจัยการประยุกต์ใช้โปรแกรม SPICE ซึ่งเป็นโปรแกรมเลียนแบบการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นเครื่องมือในการเลียนแบบอนาลอกคอมพิวเตอร์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณทาง อนาลอกจะถูกเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม SPICE ในรูปของวงจรย่อย ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจะอยู่ในรูปของศักดาเทียบกับเวลาซึ่งเหมือนกับในอนาลอกคอมพิวเตอร์ ความเร็วในการทำงานของโปรแกรม SPICE ที่นำมาเลียนแบบอนาลอกคอมพิวเตอร์จะมีความเร็วในการทำงานที่สูงกว่าการใช้อนาลอกคอมพิวเตอร์โดยตรง

โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ได้ทดลองนำมาใช้ในวิชาปฏิบัติการของนักศึกษาชั้นปีที่ 2 ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ปรากฏว่าสามารถสร้างความเข้าใจในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบได้ในระดับหนึ่ง แต่จะมีปัญหาในด้านการใช้งานของตัวโปรแกรม เนื่องจากในช่วงที่พัฒนาโปรแกรมได้ใช้โปรแกรม SPICE รุ่นเก่า ซึ่งยังไม่มีเครื่องมือช่วยในการเขียนวงจร ในการเขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรจะต้องพิมพ์วงจรเป็นไฟล์ข้อมูลดังรูปที่ 9 และ 10 ที่เป็นการยุ่งยาก ทำให้นักศึกษาเสียเวลาไปกับในส่วนนี้มาก ในขณะนี้โปรแกรม SPICE ได้ออกรุ่นใหม่ที่มีเครื่องมือช่วยในการเขียนวงจรและสัญญาลักษณ์ไว้ด้วย ถ้านำเอาโปรแกรมวงจรย่อยทั้งหมดที่ได้พัฒนาขึ้นมาเขียนเป็นสัญญาลักษณ์ของอนาลอกคอมพิวเตอร์จะสามารถช่วยให้นักศึกษามีความเข้าใจมากขึ้น เนื่องจากสามารถเห็นการแทนสัญญาลักษณ์ของอนาลอกคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง

เอกสารอ้างอิง

1. H.Z. SCHREIBER, "Digital simulation of analog system for a restricted class of input", IEEE Circuits and System magazine, vol.4, No.4, pp.4-9, 1982.

2. L.W. Nagle, "SPICE 2 : A Computer Program to Simulate Semiconductor circuits", Electronic Research Laboratory, Univ. of California, Berkeley, Rep. ERL-M520, 1975.

3. J.C. Bowers, and S.R. Sedore, "A Computer Program for Circuit and System Analysis", New York: Prentice hall, 1968.

4. F.H. Branin, et.al., "ECAP II-A New Electronic Circuit Analysis Program", IEEE J. Solid-State Circuits, vol.SC-6, pp.146-166, 1971.

5. W.H. Corneter Jr., and F.E. Ballocilli, "Electronic Circuit by System and Computer Analysis" McGraw-hill, 1975.

6. A. Vladimirescu, and S. Liu, "Simulation of MOS Integrated circuit Using SPICE 2", Electronic Research Laboratory, Univ. or California, Berkeley, Memo ERL-MBO/7, 1980.

7. S.E. Susswam-Fort, S. Narasimham, and K. Mayaram, "A Complete MOSFET Computer model for SPICE," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol.MTT-32, pp.471-473, April, 1984.

8. B.D. Nelin, "Analysis of switched-capacitor network using general purpose circuit simulation program", IEEE Trans. Circuits Syst., CAS-30, pp.43-49, 1983.

9. R.W. Jensen, and M.D. Lieberman, "IBM electronic circuit analysis program", New York : Prentice-hall, 1968.

10. M.L. James, G.M. Smith, and J.C. Wolfort, "Analog-Computer Simulation", International Textbook Company, pp.93-99 and pp.192-196, 1967.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
THE SPRING-AND-MASS SYSTEM
.OPT CPTIME=1E5
*SQUARE WAVE GENERATOR
.SUBCKT SQR  1     2
*            INPUT OUTPUT
E1 2 0 3 0 -10E6
R1 1 3 10K
R2 2 0 10K
D1 4 3 D1
D2 3 5 D1
.MODEL D1 D
V1 2 4 DC 50
V2 5 2 DC 50
.ENDS
*SUMINT      1 1 0
.SUBCKT SINT 1 2 3
E1 3 0 4 0 -10E6
R1 1 4 1
R2 2 4 1
R3 3 0 10K
C1 4 3 0.1 IC=0
.ENDS
*INTEGRATING AMPLIFIER
*            1 0
.SUBCKT INTI 1 2
E1 2 0 3 0 -10E6
R1 1 3 2
R2 2 0 10K
C1 3 2 0.1 IC=0
.ENDS
*GAIN = -1
*            1 0
.SUBCKT A1 1 2
E1 2 0 1 0 -1
R1 1 0 10K
R2 2 0 10K
.ENDS
*GAIN = 0.0618
*            1 0
.SUBCKT A2 1 2
E1 2 0 1 0 0.0618
R1 1 0 10K
R2 2 0 10K
.ENDS
*GAIN = 0.79
*            1 0
.SUBCKT A3 1 2
E1 2 0 1 0 0.79
R1 1 0 10K
R2 2 0 10K
.ENDS
*THE MOTION OF SPRING-AND-MASS SYSTEM
.TRAN 0.02 4 UIC
X1 1 2 3 SINT
X2 3 4 INTI
X3 4 5 A1
X4 3 6 SQR
X5 6 7 A1
X6 7 2 A2
X7 5 1 A3
.PLOT TRAN V(5)
.END
```

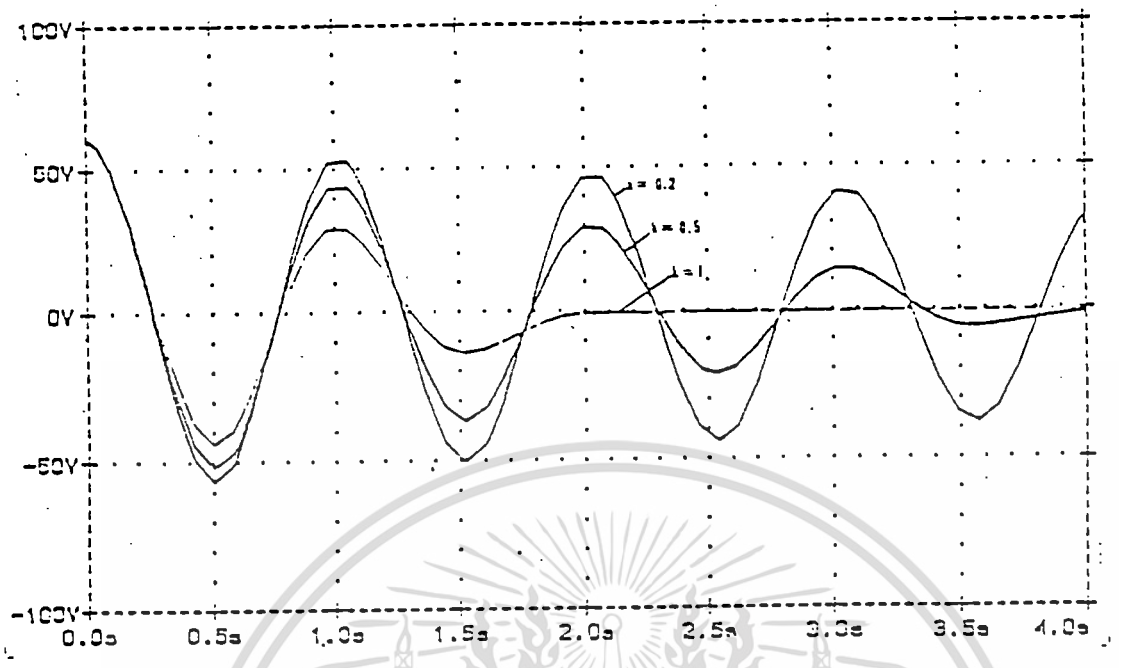
รูปที่ 9 โปรแกรมเลียนแบบ SPICE ของระบบสปริงและมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

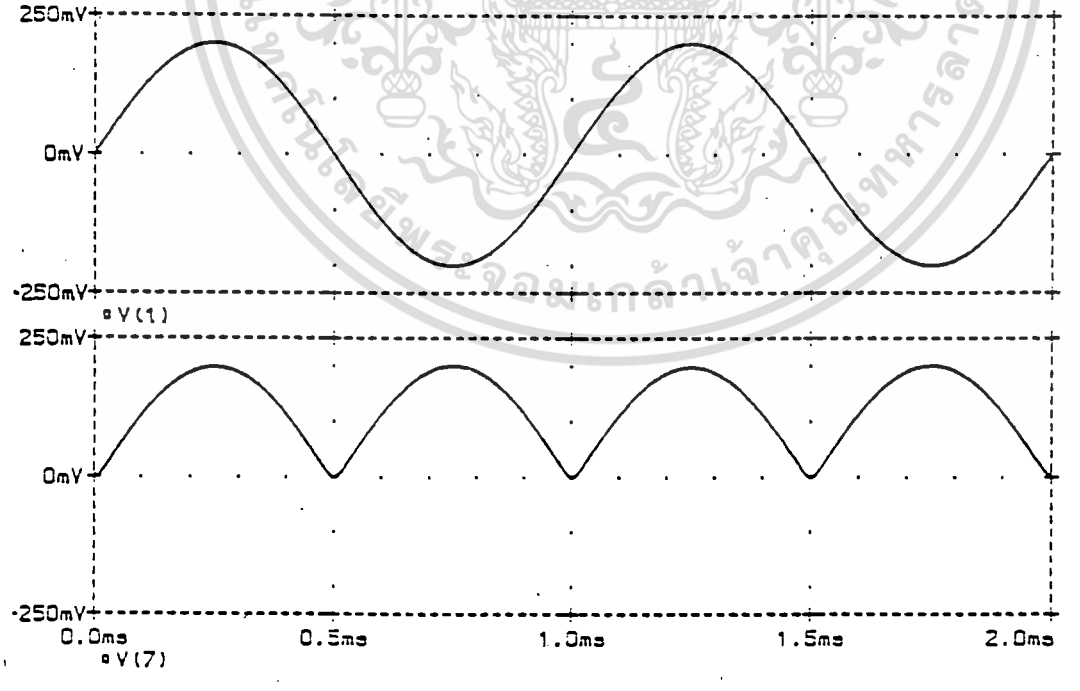
```
FULL-WAVE RECTIFIER CIRCUIT USING 2-OPAMP
*OPAMP MUA741
.SUBCKT OPAMP :   2   3   4   5   6
*             Vi+ Vi- GND Vp+ Vp- Vout
R1  14  5  1K
R2 12 5 50K
R3 15 5 1K
R4 16 5 3K
R5 18 17 39K
R6 22 23 40K
R7 19 5 50K
R8 24 5 50
R9 6 26 25
R10 25 6 50
R11 20 5 50K
COMP 21 13 30PF
Q1 7 1 8 QNL
Q2 7 2 9 QNL
Q3 11 10 8 QPL
Q4 13 10 9 QPL
Q5 11 12 14 QNL
Q6 13 12 15 QNL
Q7 4 11 12 QNL
Q8 10 17 16 QNL
Q9 17 17 5 QNL
Q10 7 7 4 QPL
Q11 10 7 4 QPL
Q12 18 18 4 QPL
Q13 13 20 5 QNL
Q14 21 18 4 QPL
Q15 21 21 22 QNL
Q16 21 22 23 QNL
Q17 20 20 5 QNL
Q18 4 13 19 QNL
Q19 23 19 24 QNL
Q20 21 25 6 QNL
Q21 20 26 6 QPL
Q22 4 21 25 QNL
Q23 5 23 26 QPL
.MODEL QNL NPN(BF=200 RB=100 CCS=2PF TF=.3NS
+ TR=6NS CJE=3PF CJC=2PF VA=50)
.MODEL QPL PNP(BF=100 RB=20 TF= 1NS TR=20NS
+ CJE=6PF CJC=4PF VA=50)
.ENDS OPAMP
*
.LIB C:\PS\OPNOM.LIB
.TRAN .1MS 1.5MS 0MS .1MS
VIN  1 0 AC 1 SIN(0 0.4 1KHZ)
VCC 101 0 DC 15
VEE 102 0 DC -15
R1 3 5 22K
R2 5 7 10K
R3 4 6 22K
R4 6 0 5.27K
R5 102 5 11.14K
RA 101 3 75
RB 102 4 75
RC 2 0 32
X1 1 2 0 3 4 2 OPAMP
X2 6 5 0 101 102 7 LM741E
.PLOT TRAN V(1) V(7)
.END
```

รูปที่ 10 โปรแกรมเลียนแบบวงจรเร็กติไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบสปริงและมวล



รูปที่ 12 แสดงผลต่อสนองชั่วครู่ของวงจรเร็กติไฟเออร์แบบเต็มคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้