การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายใน

นายครรชิต โขมพัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. ๒๕๒๕

ISBN ๙๗๔-๕๖๑-๒๔๑-๓

007148

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN INTERNAL CARDIAC PACEMAKER

MR. KUNCHIT KHOMPATARA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1982

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายใน
โดย	นายครรชิต โขมพัตร
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ศรีไพพรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ นายแพทย์ชูศักดิ์ เวชแพศย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ชูศักดิ์ เวชแพศย์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ แพทย์หญิงบังอร ชมเดช)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ศรีไพพรรณ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายใน
ชื่อนิสิต	นายครรชิต โขมพัตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ศรีไพพรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ นายแพทย์ชูศักดิ์ เวชแพศย์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	๒๕๒๔

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายในแบบให้อัตราเต้นคงที่ และแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ การวิจัยเครื่องแบบให้อัตราเต้นคงที่เน้นหนักถึงเทคนิคต่าง ๆ ในการสร้าง การใช้วัสดุและอุปกรณ์ทางอีเล็คทรอนิคส์ที่หาซื้อได้ในประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจให้มีราคาถูกเพื่อให้ผู้ป่วยที่มีรายได้น้อยมีโอกาสยืดชีวิตตัวเองได้ ได้ออกแบบเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจที่ปล่อยคลื่นไฟฟ้าออกมาถูกต้องและใช้พลังงานต่ำ ได้ทดลองนำเครื่องที่สร้างไปใช้กับผู้ป่วยที่เป็นโรคหัวใจโดยใช้เครื่องชนิดติดภายนอกร่างกายเป็นผลสำเร็จ ได้ใช้ก้อนกาวอีป๊อกซี่แข็งเคลือบด้วยอีลาสโตเมอร์ซีลีโคนขนาดเท่าเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจไปผ่าตัดฝังเข้าใต้ผิวหนังสุนัขทดลอง ผลการตรวจเนื้อเยื่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นว่าสารที่ใช้ฝังไม่มีปฏิกริยาที่เป็นอันตรายต่อสุนัขทดลอง

ในการวิจัยเครื่องแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ ได้สร้างและทดสอบวงจรต้นแบบในห้องปฏิบัติการ นำวงจรต้นแบบไปประกอบลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็กพอที่จะฝังเข้าไปในร่างกายผู้ป่วยได้ จากผลการทดลองของการวิจัยครั้งนี้ทำให้เชื่อได้ว่าวงจรต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถนำไปใช้งานได้

Thesis Title	The design and construction of an internal cardiac pacemaker
Name	Mr. Kunchit Khompatara
Thesis Advisor	Assistant Professor Chatri Sripaipan,PhD.
Thesis Co-advisor	Professor Chusak Vejbaesya, MD., PhD.
Department	Electrical Engineering
Academic Year	1981

ABSTRACT

This thesis was the design and construction of fixed rate and demand type internal cardiac pacemaker prototypes. In the research on the fixed rate one, the emphasis was on the various construction techniques. Using the material and components that can be purchased in the country. The purpose was to build a low cost pacemaker so that low income patients might extend their lives. The pacemaker could generate proper waveforms and had low energy consumption. They have been sucessfully applied to patients externally. Pieces of epoxy adhesives coated with silicone elastomer which had the same size and shape as pacemakers were implanted subcutaneously in dogs. Histologic section of tissue revealed that the implanted material did not have any harmful effect.

In the research on the demand type pacemaker, a prototype ones has been built and tested in the laboratory. The whole circuit can be mounted on a printed circuit board small enough for implantation. From the results of the research, the author feels confident that the circuits developed can be actually used.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความเอาใจใส่จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาตรี ศรีไพพรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย รวมทั้งสละเวลาคอยติดตามผลการวิจัย และชี้ข้อบกพร่องที่ควรแก้ไขอย่างดียิ่งตลอดมา ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ชูศักดิ์ เวชแพศย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ได้กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมและสนับสนุนการวิจัยอย่างเต็มความสามารถ รองศาสตราจารย์ แพทย์หญิง บังอร ชมเดช ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ให้คำปรึกษาช่วยเหลือในเรื่องสัตว์ทดลองและความรู้ทางสรีรวิทยา นายแพทย์ธาดา ชาคร ผู้อำนวยการโรงพยาบาลโรคทรวงอก และรองศาสตราจารย์ นายแพทย์ ปริญญา สากิยลักษณ์ โรงพยาบาลศิริราช ที่กรุณาให้ข้อมูล สถิติ และสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความกรุณาของท่านที่ได้กล่าวนามมาแล้วเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลจุฬา ที่ให้การดูแลสุนัขทดลองตลอดระยะเวลาของการทำวิจัยนี้ รวมทั้งผู้ร่วมงานทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข

กิตติกรรมประกาศ..... ค

สารบัญ..... ง

สารบัญตารางประกอบ..... ฎ

สารบัญรูปประกอบ..... ฐ

บทที่ ๑ บทนำ..... ๑

บทที่ ๒ กายวิภาคและสรีรวิทยาของหัวใจที่เป็นพื้นฐานของการนำเอาเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจไปใช้งาน..... ๗

๒.๑ การทำงานของระบบการไหลเวียนเลือด..... ๗

๒.๑.๑ Systemic circulation..... ๗

๒.๑.๒ Pulmonary circulation..... ๗

๒.๒ โครงสร้างของหัวใจ..... ๙

๒.๒.๑ เอเทรียมขวา..... ๙

๒.๒.๒ เวนตริเคิลขวา..... ๑๑

๒.๒.๓ เอเทรียมซ้าย..... ๑๑

๒.๒.๔ เวนตริเคิลซ้าย..... ๑๑

๒.๓ ระบบสื่อนำ..... ๑๒

๒.๓.๑ Sinoatrial node (S.A.node)..... ๑๓

๒.๓.๒ Atrioventricular node (A-V node)..... ๑๓

๒.๓.๓ AV Bundle (Bundle of His)..... ๑๓

๒.๓.๔ Bundle Branch..... ๑๓

๒.๓.๕ Purkinje Fiber..... ๑๓

๒.๔ การนำพลังไฟฟ้าของเซล..... ๑๓

๒.๕ การนำพลังไฟฟ้าของระบบสื่อนำ..... ๑๖

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๒.๖ สมมุติฐาน เบื้องต้นการนำคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบแทนพลังกระทบ ๒๑

บทที่ ๓ ลักษณะโครงสร้างองค์ประกอบและการใช้งานของ เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายใน ๒๒

๓.๑ การแบ่ง เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจ ๒๒

๓.๑.๑ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจที่แบ่งตามชนิดการใช้งาน ๒๒

๓.๑.๑.๑ ชนิดติดภายนอกร่างกายผู้ป่วย ๒๒

๓.๑.๑.๒ ชนิดฝังภายในร่างกายผู้ป่วย ๒๓

๓.๑.๒ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจที่แบ่งตามระยะ เวลาการใช้งาน ๒๓

๓.๑.๒.๑ แบบใช้ในระยะสั้น ๒๓

๓.๑.๒.๒ แบบใช้ระยะยาว ๒๔

๓.๑.๓ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจที่แบ่งตามระบบการทำงาน ๒๕

๓.๒ ระบบของ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจชนิดฝังภายในร่างกายในปัจจุบัน ๒๖

๓.๒.๑ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจแบบให้อัตรา เต้นคงที่ ๒๖

๓.๒.๒ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจแบบให้อัตรา เต้น เมื่อต้องการ ๒๘

๓.๒.๒.๑ P-wave Inhibited Demand Pacemaker (VVI) ๒๙

๓.๒.๒.๒ P-wave Triggered Demand Pacemaker (VDT) ๓๒

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๓.๒.๒.๓ Atrial Inhibited Demand Pacemaker (AAI) ๓๓

๓.๒.๒.๔ A-V Sequential Demand Pacemaker (DVI) ๓๓

๓.๒.๒.๕ Fully Automatic Demand Pacemaker (DDD) ๓๔

๓.๓ ลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่ ๓๖

๓.๔ ลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ ๓๘

๓.๕ องค์ประกอบของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายใน ๓๘

๓.๕.๑ วงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบในเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ ๔๑

๓.๕.๒ สายต่อ ๔๒

๓.๕.๓ อีเล็คโตรด ๔๕

๓.๕.๔ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ๕๐

บทที่ ๔ การออกแบบเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายใน ๕๓

๔.๑ เป้าหมายของการสร้างเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายในแบบให้อัตราเต้นคงที่ ๕๓

๔.๑.๑ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ๕๔

๔.๑.๒ วงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ ๕๖

๔.๑.๒.๑ การออกแบบกระแสไบแอสของ LM 4250 Programmable OP-Amp ๕๗

สารบัญ(ต่อ)

		หน้า
	๔.๑.๒.๒ การออกแบบวงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ...	๕๙
	๔.๑.๓ การออกแบบภาคขับเอาท์พุท.....	๖๖
	๔.๒ เป้าหมายของการสร้างเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายในแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ.....	๖๙
	๔.๒.๑ ภาคกรองความถี่วิทยุ.....	๗๒
	๔.๒.๒ ภาควงจรขลิบสัญญาณ.....	๗๓
	๔.๒.๓ ภาคป้องกันดีฟิบริลเลเตอร์.....	๗๔
	๔.๒.๔ ภาคกรองความถี่สูงผ่าน.....	๘๐
	๔.๒.๕ ภาคกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	๘๔
	๔.๒.๖ ภาคขยายกลับเฟส.....	๘๖
	๔.๒.๗ ภาคโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ ๔๐๐ มิลลิวินาที.....	๘๙
	๔.๒.๘ ภาคควบคุมเวลา และกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ.....	๙๔
	๔.๒.๙ ภาคขับเอาท์พุท.....	๑๐๓
	๔.๒.๑๐ ภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	๑๐๕
บทที่ ๕	การสร้าง ทดสอบ และผลการทดลองเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ	๑๐๙
	๕.๑ การสร้าง ทดสอบ และผลการทดลองเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่.....	๑๐๙
	๕.๑.๑ ผลการทดสอบวัดลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรในห้องปฏิบัติการ.....	๑๐๙
	๕.๑.๒ การสร้างเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่ต้นแบบ.....	๑๑๒
	๕.๑.๓ ผลการทดสอบวัดลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรในสภาพแวดล้อมจริง.....	๑๑๗

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๕.๑.๓.๑ ผลการทดสอบวัดอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบและช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้า เอาท์พุทในอุณหภูมิต่างๆ (๓๐° ซ ถึง ๔๕° ซ) ... ๑๑๗

๕.๑.๓.๒ ผลการทดสอบวัดอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบและช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้า เอาท์พุทในอุณหภูมิ ๓๗ องศา เซลเซียส คงที่ .. ๑๑๘

๕.๑.๓.๓ การทดสอบหาอายุการใช้งานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจ ๑๒๑

๕.๑.๓.๔ ผลการทดสอบ เปรียบเทียบอายุการใช้งานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อทำการบัดกรีและไม่บัดกรีขั้ว เซล เมอคิวรี่ ๑๒๓

๕.๑.๓.๕ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจร เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจ เมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง ๑๒๕

๕.๑.๔ ผลการทดสอบ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจกับผู้ป่วย ๑๒๗

๕.๑.๕ ผลการทดสอบทางสรีรวิทยา โดยการฝังสารแปลกปลอมเข้าใต้ผิวหนังสุนัขทดลอง ๑๓๖

๕.๑.๕.๑ ผลการตรวจสอบสภาพของสารแปลกปลอมโดยทั่วไป ๑๔๐

๕.๑.๕.๒ ผลการตรวจสอบ เนื้อ เยื่อหลังการผ่าตัด เอาสารแปลกปลอมออก ๑๔๐

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๕.๒ ผลการทดสอบและสร้างวงจรต้นแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายในแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ..... ๑๔๒

๕.๒.๑ ผลการทดลองตัวกรองความถี่สูงผ่าน..... ๑๔๒

๕.๒.๒ ผลการทดลองตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน..... ๑๔๒

๕.๒.๓ ผลการทดลองหาความถี่ตอบสนองของวงจร เมื่อต่อวงจรตัวกรองความถี่สูงผ่าน วงจรตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรขยายกลับเฟสเข้าด้วยกัน..... ๑๔๔

๕.๒.๔ ผลการทดลองวงจรกรองความถี่วิทยุ..... ๑๔๖

๕.๒.๕ ผลการทดลองวัดกระแส Pacing และกระแส Inhibited..... ๑๔๗

๕.๒.๖ ผลการวัดลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรต้นแบบ ๑๕๑

๕.๒.๗ ผลการวัดลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรต้นแบบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง..... ๑๕๒

๕.๒.๘ ผลการวัดลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรต้นแบบกรณีใช้แม่เหล็กทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง..... ๑๕๖

๕.๒.๙ ผลการทดลองวัดลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรต้นแบบ เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง..... ๑๕๗

๕.๒.๑๐ ผลการบันทึกรูปร่างของสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของวงจรต้นแบบ..... ๑๖๐

๕.๒.๑๑ การสร้างวงจรต้นแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียว..... ๑๖๙

บทที่ ๖ บทสรุปและข้อเสนอแนะ ๑๗๑

๖.๑ บทสรุป..... ๑๗๑

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๖.๒ ข้อเสนอแนะ ๑๗๓

เอกสารอ้างอิง ๑๗๖

ภาคผนวก ก. ๑๘๐

ภาคผนวก ข. ๑๘๕

ภาคผนวก ค. ๑๙๑

ภาคผนวก ง. ๑๙๕

ประวัติ ๑๙๗

สารบัญตารางประกอบ

		หน้า
ตารางที่ ๑.๒	แสดงสถิติแบบเครื่อง (ก) และลักษณะการใช้สายต่อ (ข) ของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจชนิดฝังภายในในประเทศไทย (พ.ศ.๒๕๑๖-๒๕๒๓).....	๒
๓.๕	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ แบบให้อัตราเต้นคงที่.....	๓๗
๓.๖	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ แบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการรุ่นต่าง ๆ	๓๙
๓.๑๘	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติเฉพาะของเซลเมอคิวรี่และเซลลิเธียม.....	๕๒
๔.๒๕	ตารางค่าคงที่ของซีเนอร์ไดโอด บริษัท Motorola.....	๘๐
๕.๒	ลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ แบบให้อัตราเต้นคงที่.....	๑๑๐
๕.๔๒	ตารางเปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรต้นแบบ กับเครื่องรุ่นต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย...	๑๕๓

สารบัญรูปประกอบ

		หน้า
รูป ๑.๑	สถิติผู้ป่วยจากโรงพยาบาลราชวิถี,ศิริราช,โรคทรวงอก,จุฬา,พระมงกุฎ, ภูมิพล ได้รับการผ่าตัดฝัง เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจชนิดฝังภายใน ในประ เทศไทย (พ.ศ.๒๕๑๖-๒๕๒๓).....	๒
๒.๑	แสดงระบบการไหล เวียน เลือด.....	๘
๒.๒	(ก) ลักษณะโครงสร้างภายในหัวใจและหลอด เลือด.....	๑๐
	(ข) ลักษณะภายในของหัวใจและสิ้นหัวใจรวมทั้งหลอด เลือด.....	๑๐
๒.๓	ระบบสื่อนำของหัวใจ.....	๑๒
๒.๔	ภาคตัดขวางของ เซลขณะพัก เซลอยู่ในสภาวะโปลาไรซ์.....	๑๕
๒.๕	ภาคตัดขวางของ เซลขณะทำงาน เซลอยู่ในสภาวะดีโปลาไรซ์.....	๑๕
๒.๖	แสดงการ เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ส่วนต่าง ๆ ของหัวใจ.....	๑๗
๒.๗	(ก) การ เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าภายใน เซล เวนตริ เคิล.....	๑๙
	(ข) การ เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของ เซลหัวใจทั้งหมดบันทึกจากผิวหนัง..	๑๙
๒.๘	แสดงการแพร่กระจายคลื่นกระทบจากS.A.node สู่กล้าม เนื้อ เวนตริ เคิล โดยผ่านระบบสื่อนำ.....	๒๐
๓.๑	ภาคคลื่นไฟฟ้าหัวใจแสดงรายละ เอียดของส่วนต่าง ๆ.....	๒๙
๓.๒	แสดงผังของจังหวะ เวลาการทำงานของ เครื่องแบบ VVI.....	๓๑
๓.๓	แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของ P-wave Triggered Demand Pacemaker.....	๓๒
๓.๔	แสดงการทำงานของ เครื่องควบคุมจังหวะการ เต้นของหัวใจแบบให้อัตรา เต้น เมื่อต้องการแบบต่าง ๆ (VVI,AAI,VDT/I,DVI และDDD)	๓๕
๓.๗	คลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่ปล่อยออกมาจากวงจรกำ เนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ.....	๔๑
๓.๘	วงจรพื้นฐานของวงจรกำ เนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ.....	๔๑
๓.๙	ปลายสายต่อที่พัฒนาให้ยึดกับหัวใจได้แน่นแบบต่าง ๆ.....	๔๓
๓.๑๐	แสดงการผ่าตัดสอดสายต่อ เข้าไปยัง เอนโดคา เดียม.....	๔๔

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูป ๓.๑๑	แสดงการผ่าตัดเปิดทรวงอกผู้ป่วยก่อนฝังอีเล็คโตรดที่กล้ามเนื้อหัวใจ	๔๖
๓.๑๒	ตำแหน่งที่อีเล็คโตรดฝังที่กล้ามเนื้อหัวใจเวนตริเคิลขวา.....	๔๗
๓.๑๓	แสดงการยึดอีเล็คโตรดให้ติดกับกล้ามเนื้อหัวใจด้านนอก.....	๔๗
๓.๑๔	ปฏิกริยาของเนื้อเยื่อในสุนัขทดลองเมื่อมีสารแปลกปลอมเข้าไปอยู่ ๖ เดือน.....	๔๘
๓.๑๕	ปฏิกริยาของเนื้อเยื่อหัวใจในสุนัขทดลอง หลังจากได้ผ่าตัดฝังสายต่อและอีเล็คโตรดเข้าไปนาน ๑๒ วัน	๔๙
๓.๑๖	ปฏิกริยาของเนื้อเยื่อหัวใจคนต่อสายต่อและอีเล็คโตรดที่ฝังอยู่.....	๕๐
๓.๑๗	อายุการใช้งานของเซลเมอคิวรี่.....	๕๑
๔.๑	ผังวงจรเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่	๕๔
๔.๒	การต่อแบตเตอรี่เพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงในวงจรเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่.....	๕๕
๔.๓	การใช้ตัวเก็บประจุต่อคร่อมแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในแบตเตอรี่ช้าลง.....	๕๖
๔.๔	แสดงวิธีการไบแอสกระแสของ LM4250 โดยใช้ความต้านทานต่อลงดิน.....	๕๘
๔.๕	การต่อ Rset เพื่อควบคุมกระแสไบแอส LM4250.....	๕๙
๔.๖	แสดงรูปร่างของคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่ออกแบบ.....	๖๐
๔.๗	แสดงรูปวงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมสมดุลย์พร้อมทั้งแสดงผังจังหวะเวลาของคลื่นไฟฟ้า เอาท์พุทและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1.....	๖๑
๔.๘	วงจรที่ดัดแปลงมาจากวงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าที่สมดุลย์กันเพื่อใช้ทำหน้าที่เป็นวงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ.....	๖๒

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

			หน้า
รูป	๔.๙	รูปร่างของคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบจากเอาท์พุทของวงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ	๖๓
	๔.๑๐	แสดงผังจังหวะเวลาของคลื่นไฟฟ้าจากเอาท์พุทและแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ C_1	๖๔
	๔.๑๑	วงจรสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ	๖๕
	๔.๑๒	วงจรภาคขับเอาท์พุท	๖๖
	๔.๑๓	วงจรสมบูรณ์ของภาคขับเอาท์พุท	๖๘
	๔.๑๔	วงจรสมบูรณ์ของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่	๖๘
	๔.๑๕	ผังวงจรของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ	๗๐
	๔.๑๖	วงจรกรองความถี่วิทยุ	๗๒
	๔.๑๗	วงจรสมบูรณ์กรองความถี่วิทยุ ความถี่คัดออฟ ๕๐ กิโลเฮิทซ์	๗๓
	๔.๑๘	วงจรขลิบสัญญาณ	๗๔
	๔.๑๙	การใช้ซีเนอร์ไดโอดป้องกันเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจเสียหายจากการใช้เครื่องดีฟีบริลเลเตอร์	๗๕
	๔.๒๐	วงจรสมมูลย์ในการใช้เครื่องดีฟีบริลเลเตอร์กระตุ้นผ่านทรวงอกเข้าสู่หัวใจ	๗๖
	๔.๒๑	ลักษณะการใช้ซีเนอร์ไดโอดป้องกันสัญญาณจากเครื่องดีฟีบริลเลเตอร์.	๗๗
	๔.๒๒	การจำลองคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่ใช้ทดสอบวงจรป้องกันดีฟีบริลเลเตอร์.	๗๘
	๔.๒๓	การยุบวงจรสมมูลย์เครื่องดีฟีบริลเลเตอร์โดยทฤษฎีเธเวนิน	๗๘
	๔.๒๔	การต่อวงจรสมมูลย์เครื่องดีฟีบริลเลเตอร์เข้ากับวงจรต้นแบบของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ	๗๙
	๔.๒๖	รูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจและขนาดของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ PQRST-wave	๘๑

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

รูป ๔.๒๗ วงจรตัวกรองความถี่สูงผ่าน 3 dB ripple order 3 Chebyshev ๘๑

๔.๒๘ วงจรตัวกรองความถี่สูงผ่าน Normalized 1Ω และ w=1 radian/sec..... ๘๓

๔.๒๙ วงจรสมบูรณ์ตัวกรองความถี่สูงผ่าน 3 dB ripple order 3 Chebyshev f_c 8 H_Z..... ๘๔

๔.๓๐ วงจรตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน 3 dB ripple order 3 Chebyshev. ๘๕

๔.๓๑ วงจรตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน Normalized 1Ω และ w=1 radian/sec..... ๘๖

๔.๓๒ วงจรสมบูรณ์ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน 3 dB ripple order 3 Chebyshev f_c 30 H_Z ๘๗

๔.๓๓ วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าสลับแบบกลับเฟส..... ๘๗

๔.๓๔ วงจรสมบูรณ์ขยายกลับเฟส..... ๘๘

๔.๓๕ วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ ที่ใช้ในการออกแบบและรูปร่างของสัญญาณที่จุดต่าง ๆ..... ๙๐

๔.๓๖ วงจร RC ดิฟเฟอเรนเชียล ให้ τ = ๑๐ มิลลิวินาที..... ๙๑

๔.๓๗ วงจรสมบูรณ์โมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ ๔๐๐ มิลลิวินาที..... ๙๒

๔.๓๘ วงจรสมบูรณ์โมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ ๔๐๐ มิลลิวินาที ที่ปรับความไวของสัญญาณขาเข้า ๑.๕ และ ๒ โวลต์..... ๙๓

๔.๓๙ วงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ..... ๙๔

๔.๔๐ แรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทและตัวเก็บประจุ C_1..... ๙๕

๔.๔๑ วงจรสมบูรณ์กำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ..... ๙๗

๔.๔๒ วงจรควบคุมเวลาและวงจรกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ..... ๙๘

๔.๔๓ การใช้ Q_1 และZ.D. ทำหน้าที่สวิทช์ และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุให้คายประจุที่ -.๙ โวลต์..... ๙๙

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

รูป ๔.๔๔ ผังจังหวะเวลาในการนำสัญญาณจากวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ มาเซทให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส..... ๑๐๐

๔.๔๕ วงจรดิฟเฟอเรนเชียล ดัดแปลงสัญญาณจากวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์..... ๑๐๐

๔.๔๖ แสดงสภาพของวงจรไบแอส Q_1 ขณะไม่นำกระแส..... ๑๐๑

๔.๔๗ วงจรสมบูรณ์ของภาคควบคุมเวลาและกำเนิดคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบ.... ๑๐๒

๔.๔๘ ผังวงจรและผังจังหวะเวลาของภาคขับเอาท์พุท..... ๑๐๓

๔.๔๙ วงจรภาคขับเอาท์พุท..... ๑๐๔

๔.๕๐ วงจรสมบูรณ์ภาคขับเอาท์พุท..... ๑๐๖

๔.๕๑ วงจรภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า $\pm$ ๓.๔ โวลต์..... ๑๐๖

๔.๕๒ วงจรต้นแบบของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ..... ๑๐๘

๕.๑ วงจรเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่ ที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ ๔..... ๑๑๐

๕.๓ แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในวงจรเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ แบบให้อัตราเต้นคงที่..... ๑๑๑

๕.๔ วงจรพิมพ์ของวงจรเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นคงที่..... ๑๑๒

๕.๕ ที่ใส่แบตเตอรี่ ขนาด ๔ ก้อน ในเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ แบบให้อัตราเต้นคงที่..... ๑๑๓

๕.๖ รายละเอียดแบบแปลนการออกแบบขั้วต่อของสายต่อ ซึ่งประกอบด้วยขั้วต่อโลหะ (๑) แหวนยาง (๒) น็อตยึดสายต่อ (๓) และน็อตปิดขั้วต่อ (๔)..... ๑๑๔

๕.๗ แบบแปลนชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่จะนำมาประกอบเป็นเครื่องควบคุมจังหวะ

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

			หน้า
		การเต้นของหัวใจ แบบให้อัตราเต้นคงที่.....	๑๑๕
รูป	๕.๘	เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ แบบให้อัตราเต้นคงที่ ที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว.....	๑๑๖
	๕.๙	แสดงการเปรียบเทียบความหนาของเครื่องต้นแบบ (ข)(ค) กับเครื่องที่มาจากต่างประเทศ (ก).....	๑๑๗
	๕.๑๐	แสดงการเปรียบเทียบขนาดรูปร่างของเครื่องต้นแบบ (ข)(ค) กับเครื่องที่มาจากต่างประเทศ (ก).....	๑๑๗
	๕.๑๑	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบกับอุณหภูมิในสารละลายต่าง ๆ กัน (๓๐°ซ - ๔๕°ซ).....	๑๑๙
	๕.๑๒	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้า เอาท์พุทกับอุณหภูมิในสารละลายต่าง ๆ กัน (๓๐°ซ - ๔๕°ซ).....	๑๑๙
	๕.๑๓	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบกับจำนวนวันที่ทดลอง เมื่อทดลองในสารละลายเกลือ pH = 7.4 ที่อุณหภูมิ ๓๗°ซ	๑๒๐
	๕.๑๔	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้า เอาท์พุทกับจำนวนวันที่ทดลองในสารละลายเกลือ pH=7.4ที่อุณหภูมิ ๓๗°ซ....	๑๒๐
	๕.๑๕	แสดงวงจรที่ใช้ทำการทดสอบหาอายุการใช้งานของเซลเมอคิวรี่...	๑๒๑
	๕.๑๖	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ทดสอบในการหาอายุการใช้งานของเซลเมอคิวรี่.....	๑๒๒
	๕.๑๗	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ทดสอบในการหาอายุการใช้งานของเซลเมอคิวรี่.....	๑๒๒
	๕.๑๘	แสดงวงจรที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบหาอายุการใช้งานของเซลเมอคิวรี่ ในกรณีเชื่อมขั้วเซลเมอคิวรี่ด้วยความร้อน และใช้โลหะสปริง.	๑๒๓
	๕.๑๙	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของเซลเมอคิวรี่กับกระแส	

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

			หน้า
		ที่ไหลออกจากเซลเมอคิวรี่.....	๑๒๔
รูป	๕.๒๐	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของเซลเมอคิวรี่กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเซลเมอคิวรี่.....	๑๒๔
	๕.๒๑	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบกับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง.....	๑๒๖
	๕.๒๒	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทกับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	๑๒๖
	๕.๒๓	ผู้ป่วยชายอายุ ๔๐ ปี ขณะกำลังทดลองใช้เครื่องต้นแบบ.....	๑๒๗
	๕.๒๔	รูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แบบ Bipolar Limb Lead (L1-L3) ของผู้ป่วยชายอายุ ๔๐ ปี ที่ใช้เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจต้นแบบ.....	๑๒๙
	๕.๒๕	รูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แบบ Unipolar Limb Lead (AVR,AVL,AVF) ของผู้ป่วยชายอายุ ๔๐ ปี ที่ใช้เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจต้นแบบ.....	๑๓๐
	๕.๒๖	รูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แบบ Unipolar Chest Lead (V1-V6) ของผู้ป่วยชายอายุ ๔๐ ปี ที่ใช้เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจต้นแบบ.....	๑๓๒
	๕.๒๗	ผู้ป่วยหญิงอายุ ๖๐ ปี ขณะกำลังทดสอบใช้เครื่องต้นแบบ.....	๑๓๓
	๕.๒๘	รูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจของผู้ป่วยหญิงอายุ ๖๐ ปี ก่อนใส่เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจต้นแบบ.....	๑๓๕
	๕.๒๙	รูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจของผู้ป่วยหญิงอายุ ๖๐ ปี หลังจากทดลองใช้เครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจต้นแบบ.....	๑๓๖
	๕.๓๐	สุนัขที่ใช้ในการทดลองฝังสารแปลกปลอมเข้าไปใต้ผิวหนัง.....	๑๓๗
	๕.๓๑	ขณะผ่าตัดสุนัขทดลอง โดยแหวกหนังสุนัขให้กว้างเพื่อใส่สารแปลก	

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

			หน้า
		ปลอมเข้าใต้ผิวหนัง.....	๑๓๘
รูป	๕.๓๒	นำสารแปลกปลอมใส่เข้าใต้ผิวหนังสุนัขทดลอง.....	๑๓๘
	๕.๓๓	ลักษณะบาดแผลหลังจากผ่าตัดใส่สารแปลกปลอมใต้ผิวหนังสุนัขทดลอง	๑๓๙
	๕.๓๔	ใส่เสื้อแจ็กเก็ตให้สุนัขทดลอง หลังการผ่าตัดเพื่อรักษาความสะอาด.	๑๓๙
	๕.๓๕	วงจรต้นแบบของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ.....	๑๔๓
	๕.๓๖	กราฟแสดงผลความถี่ตอบสนองของวงจรตัวกรองความถี่สูงผ่านเป็นเดซิเบล (อัตราการขยายทางแรงดันไฟฟ้าเป็นเดซิเบลกับความถี่).	๑๔๔
	๕.๓๗	กราฟแสดงผลความถี่ตอบสนองของวงจรตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นเดซิเบล (อัตราการขยายทางแรงดันไฟฟ้าเป็นเดซิเบลกับความถี่).	๑๔๕
	๕.๓๘	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายทางแรงดันไฟฟ้าเป็นเดซิเบลกับความถี่ เมื่อต่อวงจรตัวกรองความถี่สูงผ่าน วงจรตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรขยายกลับเฟสเข้าด้วยกัน.....	๑๔๖
	๕.๓๙	กราฟแสดงผลความถี่ตอบสนองของวงจรกรองความถี่วิทยุเป็นเดซิเบล (อัตราการขยายทางแรงดันไฟฟ้าเป็นเดซิเบลกับความถี่).....	๑๔๗
	๕.๔๐	วิธีการวัดกระแส Inhibitedในวงจรต้นแบบของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ.....	๑๔๘
	๕.๔๑	วิธีการวัดกระแส Pacing ในวงจรต้นแบบของเครื่องควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ.....	๑๔๙
	๕.๔๓	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในวงจรต้นแบบ.....	๑๕๕
	๕.๔๔	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในวงจรต้นแบบ.....	๑๕๖
	๕.๔๕	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทกับ	

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (๒๙°ซ - ๔๕°ซ) เมื่อใช้แม่เหล็กทดสอบ... ๑๕๘

รูป ๔.๔๖ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทกับ
อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (๒๙°ซ - ๔๕°ซ) เมื่อใช้แม่เหล็กทดสอบ... ๑๕๘

๔.๔๗ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทกับ
แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง..... ๑๕๙

๔.๔๘ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงกว้างของคลื่นไฟฟ้าเอาท์พุทกับ
แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง..... ๑๕๙

๔.๔๙ รูปร่างของคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่เอาท์พุท วัดที่ขาคาโถดของ Z.D.1. ๑๖๑

๔.๕๐ รูปร่างของคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่เอาท์พุท วัดที่ขาคาโถดของ Z.D.1
(ก) เปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุทของภาคโมโนสเตเบิล มัลติไว
เบรเตอร์ วัดที่ขา ๖ ของ IC4 (ข)..... ๑๖๐

๔.๕๑ เปรียบเทียบคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่เอาท์พุท วัดที่ขาคาโถด Z.D.1(ก)
กับสัญญาณเอาท์พุท ขา ๖ IC4 ของวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบร
เตอร์ (ข) เมื่อเครื่องทำงานแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ..... ๑๖๒

๔.๕๒ เปรียบเทียบคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่เอาท์พุท วัดที่ขาคาโถด Z.D.1(ก)
กับสัญญาณเอาท์พุท ขา ๖ IC4 ของวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบร
เตอร์ เมื่อป้อนคลื่นไฟฟ้าหัวใจจำลองในอัตร ๗๒ ครั้งต่อนาที เข้า
ไปในวงจรต้นแบบ..... ๑๖๓

๔.๕๓ เปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุทของวงจรตัวกรองความถี่สูงผ่าน วัดที่ขา
๖ IC1 (ก) กับสัญญาณเอาท์พุท ขา ๖ IC4 ของวงจรโมโนสเต
เบิล มัลติไวเบรเตอร์ (ข)..... ๑๖๔

๔.๕๔ เปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุทของวงจรตัวกรองความถี่สูงผ่าน วัดที่ขา
๖ IC1 (ก) กับสัญญาณเอาท์พุท ขา ๖ IC4 ของวงจรโมโนสเต
เบิล มัลติไวเบรเตอร์ (ข) โดยตั้งเวลาในการสแกนของออสซิลโล

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

			หน้า
		สโคปให้ช้าลง.....	๑๖๕
รูป	๔.๕๕	เปรียบเทียบคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่เอาท์พุท วัดที่ขาคาโถด Z.D.1(ก) กับสัญญาณเอาท์พุท ขา ๖ IC4 ของวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (ข) เมื่อเครื่องทำงานแบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ โดยป้อนคลื่นไฟฟ้าจำลองในอัตรา ๓๐ ครั้งต่อนาที.....	๑๖๖
	๔.๕๖	เปรียบเทียบคลื่นไฟฟ้าช่วงแคบที่เอาท์พุท วัดที่ขาคาโถด Z.D.1(ก) กับสัญญาณเอาท์พุทของวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ เมื่อใช้แม่เหล็กทดสอบ.....	๑๖๗
	๔.๕๗	เปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายกลับเฟส ขา ๖ IC3(ก) กับสัญญาณเอาท์พุทของวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (ข) เมื่อใช้แม่เหล็กทดสอบ.....	๑๖๘
	๔.๕๘	ลายพิมพ์ของวงจรต้นแบบ แบบให้อัตราเต้นเมื่อต้องการ.....	๑๖๙
	๔.๕๙	วงจรต้นแบบที่ประกอบสมบูรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียว.....	๑๗๐