โปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่ไมโครเวฟด้วยวิธี K-Inverter สำหรับการศึกษาวิศวกรรม

Simulation Software of Microwave Filters using K-Inverter Techniques for Engineering Education

ณัฐพงษ์ อินทรวิเศษ[1] นุชนาฏ ชุมชื่น[1] สมศักดิ์ อรรคทิมากูล[1] และสุปัญญา สิงห์กรณ์[2]

[1]ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ somsak.a@fte.kmutnb.ac.th

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรกรองความถี่สำหรับการศึกษาวิศวกรรมไมโครเวฟ โดยใช้ฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรมMATLAB® สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่จะใช้ทฤษฎีการประมาณค่าของบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth) และเชปบี้เชฟ (Chebychev) ร่วมกับเทคนิค K-Inverter ที่สามารถคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางความถี่ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ จากนั้นออกแบบและสร้างต้นแบบวงจรกรองความถี่ต่ำบนโครงสร้างแผ่นวงจรไมโครสตริปสำหรับใช้เป็นชุดสื่อประกอบการเรียนการสอนผลการวิจัยพบว่า โปรแกรมจำลองสามารถใช้ในการจำลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลการสร้างสื่อวงจรกรองความถี่ต่ำไมโครเวฟต้นแบบสามารถทำงานได้ที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 2.70 GHz ที่สอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี และสามารถนำไปใช้เป็นสื่อประกอบในการเรียนรู้ทางด้านการศึกษาวิศวกรรมได้อย่างมีคุณภาพ

คำสำคัญ: โปรแกรมจำลอง วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ เทคนิค K-Inverter การศึกษาด้านวิศวกรรม

Abstract

The research paper presents a simulation software for microwave filter design to apply in engineering education. The GUI-MATLAB® based simulation software was conducted using the Butterworth and Chebychev approximation theories and the K-inverter techniques that the users able to design, analyze and compute the filter parameters and the frequency response. Then, the low pass filter prototypes being a demonstration set were constructed using microstrip circuit structure. The research result shown that the constructed simulation program can be used effectively in simulating, designing and analyzing microwave filters. The implemented microwave LPF filter at the cutoff frequency at 2.70 GHz agreed with filter theory and can be a teaching media for engineering education as good quality.

Keywords: Simulation software, Microwave filters, K-Inverter techniques, Engineering education

1. บทนำ

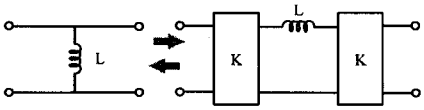
วิวัฒนาการของการพัฒนาประเทศไทยในปัจจุบันมีความพยายามในการผลักดันภาคอุสหกรรมเข้าสู่ยุคของอุตสาหกรรม 4.0 ที่มุ่งเน้นในการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาช่วยในการสร้างผลิตภัณฑ์หรือนวัตกรรมใหม่กันอย่างแพร่หลาย หากกล่าวถึงเทคโนโลยีวงจรไมโครเวฟ พบว่ามีการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น เกษตรกรรมสมัยใหม่ เครื่องมือแพทย์ การคมนาคม ระบบการสื่อสาร ระบบอินเทอร์เน็ต เป็นต้น โดยวงจรและอุปกรณ์ภายในวงจรไมโครเวฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วย วงจรสายส่ง วงจรกรองความถี่ วงจรขยายสัญญาณสายอากาศ เป็นต้น ที่มีความเกี่ยวข้องกับการเลือกใช้งานในช่วงความถี่ต่าง ๆ ดังนั้นวงจรกรองความถี่จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่สามารถกำหนดช่วงแถบความถี่ผ่าน หรือช่วงแถบความถี่หยุด สำหรับใช้ในการป้องกันสัญญาณรบกวน การเลือกหรือแยกสัญญาณตามที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยทั่วไปพื้นฐานของการออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่มักใช้อุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (Lumped Element) [1] โครงสร้างวงจรสายส่งไมโครสตริป และท่อนำคลื่น ที่มีการวิจัยและพัฒนากันมาต่อเนื่องเป็นเวลาหลายสิบปี แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการออกแบบด้วยวิธีพื้นฐานมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถตอบโจทย์ปัญหาได้ในบางเงื่อนไข จึงได้มีการนำเทคนิคของ K-Inverter [2], [3], [4], [5] ที่สามารถออกแบบและคำนวณโครงสร้างวงจรที่สัมพันธ์กับค่าอุปกรณ์พื้นฐานที่เป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยลดความยุ่งยากในการสร้างวงจรวงจรกรองความถี่ไมโครเวฟได้อีกด้วย นอกจากนั้น งานวิจัยทางด้านวงจรกรองความถี่ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับรองรับการใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม ที่ไม่ได้ให้ความสำคัญในการพัฒนาและออกแบบสำหรับใช้ในการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพ

บทความวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาโปรแกรมออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter สำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ ซึ่งโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นทำงานภายใต้ฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® ที่สามารถออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรกรองความถี่แบบต่าง ๆ ได้ และทำการสร้างและทดสอบวงจรกรองความถี่ต้นแบบที่สามารถนำไปใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนที่มีคุณภาพสำหรับการศึกษาทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

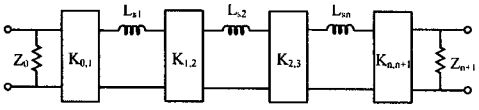
2.1 การออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter

การออกแบบวงจรกรองความถี่พื้นฐานโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่สูง วงจรกรองผ่านแถบความถี่ และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ ที่ส่วนมากจะใช้ทฤษฎีของการประมาณค่าของ Butterworth และ Chebychev ในการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ จากนั้นขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณและแปลงองค์ประกอบของวงจรทางความถี่ ซึ่งในทางปฏิบัติพบว่าไม่สามารถนำอุปกรณ์ที่ได้ไปสร้างได้จริงทุกวงจร เช่น วงจรที่ต่ออุปกรณ์แบบขนานหรือลงกราวด์ (Grounded elements) จะมีความยุ่งยากในการสร้าง เนื่องจากจะต้องใช้วิธีการลัดวงจร ดังนั้นจึงได้นำเทคนิคการแปลงวงจรด้วยวิธี K-Inverter ที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบวงจรเป็นอุปกรณ์แบบอนุกรมหรือแบบลอย (Floating elements) ดังในรูปที่ 1 ที่แสดงการแปลงวงจรตัวเหนี่ยวนำที่ต่อแบบขนานแปลงเป็นวงจรตัวเก็บประจุที่แบบอนุกรมโดยใช้วิธีของ K-Inverter ที่อาศัยวงจรต้นแบบของวงจรอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Impedance Inverters) [6] โดยในทางอุดมคติการทำงานของอิมพีแดนซ์อินเวอเตอร์ (K พารามิเตอร์) คล้ายกับการใช้สายนำสัญญาณที่มีความยาว $\lambda/4$ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบวงจรกรองความถี่ในย่านความถี่ที่ต้องการได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 1 หลักการแปลงวงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter

สำหรับบทความวิจัยนี้จะยกตัวอย่างการนำวงจรกรองความถี่ต่ำมาใช้งานร่วมกับวิธี K-Inverter ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยการหาค่าตัวเหนี่ยวนำ จะใช้สมการที่ (1) ถึงสมการที่ (3) เมื่อ L_1 ถึง L_n คือค่าของอุปกรณ์ที่ได้มาจากวงจรกรองความถี่ต้นแบบ Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และ Z_{n+1} คือค่าของอิมพีแดนซ์ของโหลด



รูปที่ 2 วงจรเทียบเคียงของวงจรกรองความถี่ต่ำที่แปลงด้วยวิธี K-Inverter

$$L_{s1} = \frac{L_1 \times (Z_0 / Z_{n+1})}{\omega} \quad (1)$$

$$L_{s2} = \frac{L_2 \times (Z_0 / Z_{n+1})}{\omega} \quad (2)$$

$$L_{sn} = \frac{L_n \times (Z_0 / Z_{n+1})}{\omega} \quad (3)$$

การหาค่าพารามิเตอร์ของ K-Inverter [7] ในแต่ละส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำ เริ่มต้นจากการหาค่า $K_{0,1}$ ถึง $K_{n,n+1}$ โดยใช้สมการที่ (4) ถึงสมการที่ (6) เมื่อค่าของ g_0 g_i g_i คือ ค่าองค์ประกอบความถี่ที่ได้มาจากการประมาณค่าของวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบ

$$K_{0,1} = \sqrt{\frac{Z_0 L_{s1}}{g_0 g_1}} \quad (4)$$

$$K_{i,i+1} = \sqrt{\frac{L_{si} L_{s(i+1)}}{g_i g_{i+1}}}\Bigg|_{i=1 \text{ to } n-1} \quad (5)$$

$$K_{n,n+1} = \sqrt{\frac{L_{sn} Z_{n+1}}{g_n g_{n+1}}} \quad (6)$$

2.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปด้วยวิธี K-Inverter

การออกแบบวงจรกรองความถี่บนโครงสร้างไมโครสตริปด้วยวิธี K-Inverter ในส่วนนี้จะออกแบบและสร้างวงจรด้วยอุปกรณ์ไมโครเวฟที่นำมาวางอยู่ระหว่างช่องว่างบนแถบตัวนำของสายส่งไมโครสตริป สำหรับการออกแบบจะพิจารณาค่าความไม่ต่อเนื่องไมโครสตริปแบบช่องว่าง (Gap) ร่วมกับทฤษฎีสายส่งไมโครสตริป ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 วงจรกรองความถี่ต่ำโดยใช้อุปกรณ์ไมโครเวฟบนโครงสร้างไมโครสตริป

สำหรับการคำนวนหาค่าความยาวของสายส่งไมโครสตริป (λ_g) สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (7) เมื่อ f คือความถี่ที่ใช้งาน c คือความเร็วแสงในอวกาศ และ ε_r คือ ค่าไดอิเล็กตริกของแผ่นวงจรพิมพ์

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (7)$$

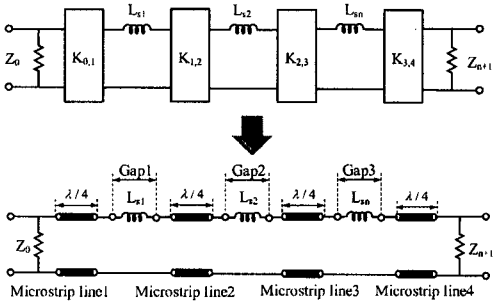
การหาความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (W)

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{2e^A - 2} \quad (8)$$

เมื่อ h คือ ความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ โดยที่ค่าของ A หาได้จาก

$$A = \frac{Z_0}{60}\left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\right)\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right) \quad (9)$$

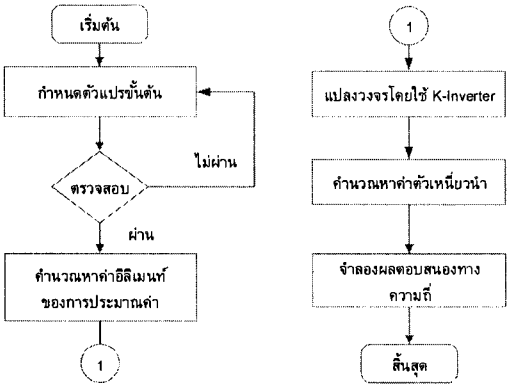
เมื่อคำนวณหาขนาดโครงสร้างวงจรกรองความถี่ครบถ้วนแล้ว วงจรเทียบเคียงของวงจรกรองความถี่ต่ำที่แปลงด้วยวิธี K-Inverter บนโครงสร้างไมโครสตริป จะแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรเทียบเคียงของวงจรกรองความถี่ต่ำที่แปลงด้วยวิธี K-Inverter

3. การออกแบบโปรแกรมจำลอง

สำหรับการออกแบบโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่ด้วยวิธีของ K-Inverter ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB ด้วยฟังก์ชั่น GUI สามารถออกแบบวงจรกรองความถี่ได้ 4 แบบ ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่สูง วงจรกรองผ่านแถบความถี่ และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ โดยบทความนี้ได้เลือกนำเสนอวงจรกรองความถี่ต่ำด้วยวิธี K-Inverter ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังในรูปที่ 5 สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำโดยมีความถี่คัทออฟที่ความถี่ 2.40 GHz บนโครงสร้างไมโครสตริปโดยใช้อุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำแบบชิพ เลือกใช้การประมาณค่าแบบ Chebyshev ที่มีจำนวนอันดับท่ากับ 3 มีค่า ripple เท่ากับ 0.1 ค่าไดอิเล็กตริก (ε_r) ของแผ่น FR-4 มีค่าเท่ากับ 4.3 และอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 แผนผังการทำงานโปรแกรมจำลองของวงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter

การกำหนดค่าในโปรแกรมการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 6 มีดังนี้

1) กำหนดความถี่ตัดในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำ

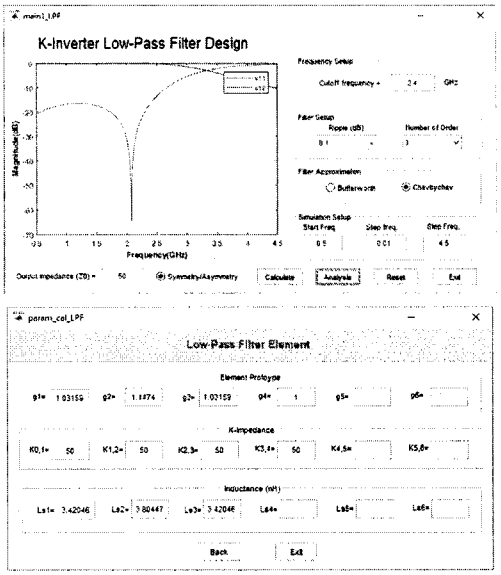
2) เลือกชนิดของการประมาณค่าเป็นแบบ Chebyshev และกำหนดค่าเริ่มต้น ได้แก่ จำนวนอันดับ และค่าของ ripple

3) กำหนดค่าในการจำลองการทำงานโดยกำหนดความถี่เริ่มต้นเท่ากับ 0.0 GHz, จำนวนจุดในการ Sampling ความถี่เท่ากับ 101 จุด หรือเท่ากับ 0.01 GHz, ความถี่สิ้นสุดเท่ากับ 3 GHz

4) กำหนดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม

5) กำหนดค่าชนิดของวงจรเป็นแบบสมมาตร (Symmetry)

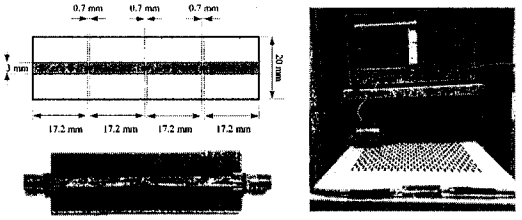
จากการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองพบว่า ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ตั้งไว้ดังแสดงในรูปที่ 6 ทำให้ได้ค่าอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{s1} และ L_{s3} เท่ากับ 3.42 nH L_{s2} เท่ากับ 3.80 nH ค่าพารามิเตอร์ของ $K_{0,1}$ $K_{1,2}$ $K_{2,3}$ $K_{3,4}$ เท่ากับ 50 โอห์ม ในลำดับถัดไปจะเป็นการออกแบบวงจรบนโครงสร้างไมโครสตริป โดยจากการคำนวณจะได้ความกว้างเท่ากับ 3 mm และความยาวของสายนำสัญญาณแต่ละเส้นเท่ากับ 17.2 mm และกำหนดช่องว่าง (Gap) ที่ใช้สำหรับวางอุปกรณ์ไมโครเวฟชิพเท่ากับ 0.7 mm



รูปที่ 6 หน้าต่างโปรแกรมการคำนวณและวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter

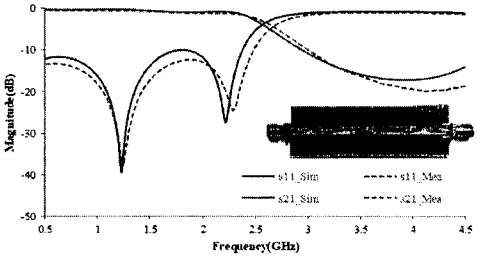
4. ผลของการวิจัย

การวัดทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยวิธี K-Inverter โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไฟฟ้ายี่ห้อ Agilent รุ่น E5071C แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การวัดทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำไมโครเวฟที่สร้างขึ้น

การเปรียบเทียบผลของการวัดกับผลของโปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio พบว่า ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบที่สร้างขึ้นมีค่าความถี่คัทออฟที่ 2.70 GHz และ 2.60 GHz ค่าสูญเสียจากการใส่แทรกมีค่าเท่ากับ 1.49 dB และ1.6 dB ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 15 dB และ 10 dB ที่ความถี่ 2.4 GHz ตามลำดับ รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ±5 %



รูปที่ 8 ผลการจำลองการทำงานและการวัดทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำไมโครสตริป

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำโปรแกรมจำลองที่พัฒนาและวงจรสื่อต้นแบบที่สร้างขึ้น ไปใช้ในการเรียนการสอนกับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี ดังแสดงในรูปที่ 9 เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของสื่อการสอน และประเมินความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อการสอนที่พัฒนาขึ้น แสดงดังในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

รูปที่ 7 การประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนด้านการศึกษาวิศวกรรม

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบของประสิทธิภาพของสื่อการสอน

ผลสอบ	คะแนนเต็ม	คะแนนที่ได้	ร้อยละที่ได้	คะแนนเฉลี่ย	ทฤษฎีเมกุยแกนส์
ก่อนเรียน	20	10	4	5.47	1.09
หลังเรียน	20	19	10	14.63	

ตารางที่ 2 ผลประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อชุดการสอน

ข้อคำถามความคิดเห็น	ค่าเฉลี่ย	S.D.	Results
1) สอดคล้องกับวัตถุประสงค์หลักสูตร	4.07	0.59	High
2) ขั้นตอนของรูปแบบ RRSDI Model	4.20	0.68	High
3) สื่อการเรียนการสอน	4.33	0.62	High
4) การวัดและประเมินผล	4.20	0.77	High
5) รูปแบบของกิจกรรมการเรียนการสอน	3.87	1.06	High
6) ส่งเสริมผู้เรียนมีการลงมือปฏิบัติงาน	4.47	0.74	High
7) ส่งเสริมให้ผู้เรียนทำงานเป็นทีม	4.27	0.70	High
8) ส่งเสริมให้ผู้เรียนแก้ปัญหาได้	3.93	0.96	High
9) เหมาะสมกับการสอนด้านวิศวกรรม	4.67	0.49	Highest
10) นำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้	4.07	0.80	High
ค่าเฉลี่ยรวม	4.21	0.50	High

จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าชุดสื่อการสอนสำหรับการศึกษาวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐานของเมกุยแกนส์ ที่สามารถส่งเสริมให้ผู้เรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนสูงมากขึ้น โดยผู้เรียนมีความพึงพอใจในการนำมาใช้ในการสอนด้านวิศวกรรมอยู่ในระดับมาก ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 และผลรวมของการประเมินความพึงพอใจทั้งหมดพบว่าอยู่ในระดับมาก ที่มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.21 และ S.D. มีค่าเท่ากับ 0.50 และจากการสังเกตการเรียนการสอนพบว่า ส่วนใหญ่ผู้เรียนมีความสนใจและกระตือรือร้นในการเรียนรู้จากการที่ได้ลงมือปฏิบัติงานโดยใช้สื่อการสอนที่พัฒนาขึ้น

5. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอโปรแกรมออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter ด้วยฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® สำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ โดยวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบถูกออกแบบด้วยวิธี K-Inverter ที่สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำบนโครงสร้างไมโครสตริปได้อย่างถูกต้องตามหลักการทางทฤษฎีวงจรกรองความถี่ ทั้งนี้ผลการเปรียบเทียบการทำงานของวงจรกรองความถี่ที่สร้างขึ้นจากการวัดของชิ้นงานจริงและการจำลองมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 5 % อันเนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในวัสดุที่ใช้ในการสร้างวงจรจริง และค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำที่นำมาใช้ทดสอบ อย่างไรก็ตามผลของงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ เพื่อให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจถึงหลักการและเทคนิคการออกแบบวงจรขั้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

[1] T.-H. Lee, B. Lee, and J. Lee, "First-order reflectionless lumped-element lowpass filter (LPF) and bandpass filter (BPF) design," Presented at the 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, 2016.

[2] P. Dong, S. Sun and X. Yu, "Synthesis and design of filtering antenna based on j/k inverters and l/4 resonators," 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/APCAP.2017.8420627.

[3] J. Lin and Q. Chu, "Accurately Characterizing the Coupling Effects of Patch Antennas With Complex- and Frequency-Dependent J/K Inverters," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 3, pp. 1554-1561, March 2019.

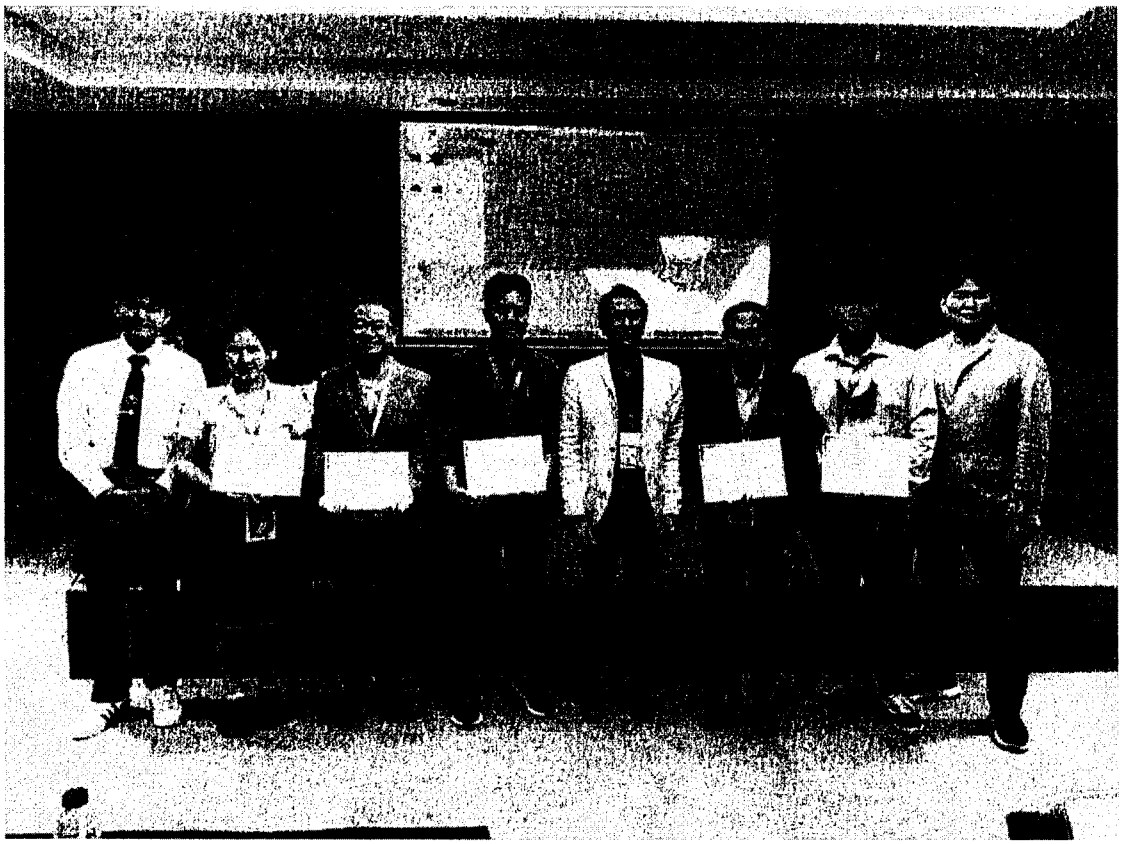
[4] S. Zhang and L. Zhu, "Synthesis Method for Even-Order Symmetrical Chebyshev Bandpass Filters With Alternative J/K Inverters and lambda//4 Resonators," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, no. 2, pp. 808-816, Feb. 2013, doi: 10.1109/TMTT.2012.2233748.

[5] Q. Wang and J. Bornemann, "Synthesis and design of direct-coupled rectangular waveguide filters with arbitrary inverter sequence," presented at the 2014 16th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), Victoria, BC, Canada, 2014.

[6] I.C. Hunter, "Theory and design of microwave filters", IEE Electromagnetic Waves Series, 2001.

[7] G. Hong Jia-Shen and M. J. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, New York: Wiley, 2001.

The 43rd Electrical Engineering Conference (EECON-43)
EGAT
PEA
HITACHI
Tektronix
IRCT
PTS



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๓ (EECON-43)

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ระหว่างวันที่ ๒๘ - ๓๐ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๖๓

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

ณัฐพงษ์ อินทรวิเศษ นุชนาฏ ชุมชื่น สมศักดิ์ อรรคทิมากูล และ สุปัญญา สิงห์กรณ์

ได้นำเสนอบทความวิจัยเรื่อง

"โปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่ไมโครเวฟด้วยวิธี K-Inverter
สำหรับการศึกษาวิศวกรรม"

(รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษบุตร)
นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ วัฒนวงค์พิทักษ์)
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม