



การสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดกระแส
ที่ควบคุมได้แบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรรวมแอนะล็อก
Synthesis and Design of Electronically Controlled Current-Mode
Multifunction Filter for Analog Integrated Circuit

นายกฤษฎิ์พนธ์ พรณรัตน์ชัย

สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ประเภททั่วไปประจำปีงบประมาณ 25๕๗

Created with

 **nitro**PDF professional

download this free trial online at nitropdf.com/professional/



การสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดกระแส
ที่ควบคุมได้แบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรรวมแอนะล็อก
Synthesis and Design of Electronically Controlled Current-Mode
Multifunction Filter for Analog Integrated Circuit

นายกฤษฎิ์พนธ์ พรณรัตน์ชัย

สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ประเภททั่วไปประจำปีงบประมาณ 25๕๗

Created with

 **nitro**PDF professional

download this free trial online at nitropdf.com/specifications/

Created with

 **nitro**^{PDF} professional

download the free trial online at nitropdf.com/gifttrial.html

ชื่อ : นายกฤษฎิ์พนธ์ พรณรัตน์ชัย

หัวข้อวิจัย : การสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดกระแสที่ควบคุมได้แบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรรวมแอนะล็อก

คณะ : เทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ปีการศึกษา : ๒๕๕๗

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรจำลองอุปกรณ์ที่ให้ค่าความไวต่ำต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและประยุกต์ใช้งานโดยใช้ VDTA CFTA และ DDCC เป็นอุปกรณ์หลัก จุดเด่นของวงจรที่นำเสนอ คือ (๑) สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ (๒) ความต้านทานที่เอาต์พุตมีค่าสูงทำให้สามารถต่อคาสเคดหรือต่อโหลดได้โดยตรง (๓) สามารถควบคุมอัตราขยายของวงจรได้ (๔) ใช้ CFTA จำนวน ๑ ตัวร่วมกับตัวต้านทาน ๑ ตัวและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก ๑ ตัว พร้อมกันนี้ได้นำเอาวงจรอินทิเกรเตอร์มาประยุกต์ใช้งานในวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์หลายเฟสและวงจรกรองความถี่ลำดับสอง

ผลการจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้พารามิเตอร์ของโมสทรานซิสเตอร์เบอร์ TSMC $0.18\mu m$ CMOS เทคโนโลยี ที่แหล่งจ่ายแรงดัน $\pm 1.5V$ ใช้ $C=100pF$ $R=1k\Omega$ $I_D=100\mu A$ และ $V_{DS}=-0.5V$ พบว่าที่ความถี่ต่ำความต่างเฟสของสัญญาณเอาต์พุตและอินพุตจะประมาณ 0 องศา และความต่างเฟสจะเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าประมาณ -90 องศาที่ความถี่สูง ส่วนผลตอบสนองทางขนาดสามารถควบคุมได้และจะลดเรื่อยๆ เมื่อความถี่สูงขึ้น เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรทั้ง 3 แล้ว จะให้อุปกรณ์แอกทีฟจำนวนน้อยและสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวต้านทานในการออกแบบวงจรได้ ส่งผลให้ชิปไอซีมีขนาดเล็ก จึงเหมาะสมกับการนำวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งไปพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นวงจรรวม จากผลการทดสอบวงจรพบว่าผลการการทำงานของวงจรสอดคล้องตามที่คาดการณ์ไว้ในทางทฤษฎี

คำสำคัญ : วงจรกรองความถี่, CDCTA, โหมดกระแส

Name : Mr.Kritphon Phanrattanachai

Master Project Title : Synthesis and Design of Electronically Controlled Current-Mode Multifunction Filter for Analog Integrated Circuit

Faculty : faculty of agricultural and technology
Phetchabun Rajabhat University

Academic Year : ๒๐๖๕

Abstract

This paper deals with a single-input multiple-output biquadratic filter providing three functions (low-pass, high-pass and band-pass) based on current differencing cascaded transconductance amplifier (CDCTA). The quality factor and pole frequency can be electronically tuned via the bias current. The proposed circuit uses two CDCTAs and two grounded capacitors without any external resistors, which is suitable to further develop into an integrated circuit. Moreover, the circuit possesses high output impedance, providing easy current-mode cascading. The PSPICE simulation results are included, verifying the key characteristics of the proposed filter.

Keywords : Filter circuit, CDCTA, Current-Mode

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยเรื่องการสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดกระแส ที่ควบคุมได้แบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรรวมแอนาล็อก สำเร็จได้เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้ข้อมูลข้อเสนอแนะ คำปรึกษาแนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้เขียน

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจในการทำงาน และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ที่ได้สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ช่วยส่งเสริมสนับสนุนกระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมาให้ผู้เขียนจัดทำรายงานการวิจัย

นายฤทธิพนธ์ พรรณรัตน์ชัย
๑๐ ธันวาคม ๒๕๕๗

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ ๑ บทนำ	๑
๑.๑ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	๑
๑.๒ วัตถุประสงค์	๒
๑.๓ สมมติฐานของการวิจัย	๒
๑.๔ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	๒
๑.๕ ขอบเขตของการวิจัย	๓
บทที่ ๒ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	๔
๒.๑ ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรขยายความนำผลต่างแรงดัน	๔
๒.๒ หลักการของวงจรกรองความถี่	๖
๒.๓ หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณ	๑๒
๒.๔ หลักการกำเนิดสัญญาณชายนแบบหลายเฟส	๑๘
๒.๕ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	๒๖
๒.๖ สรุป	๒๙
บทที่ ๓ วิธีการดำเนินการวิจัย	๓๐
๓.๑ การสังเคราะห์และออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์โหมตกระแส	๓๐
๓.๒ การวิเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติ	๓๓
๓.๓ การสังเคราะห์และออกแบบวงจรประยุกต์ใช้งาน	๓๖
๓.๔ สรุป	๔๐
บทที่ ๔ ผลการวิจัย	๔๑
๔.๑ ผลการจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์	๔๑
๔.๒ ผลการจำลองการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณชายนแบบควอดเรเจอร์	๔๖
๔.๓ ผลการจำลองการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณชายนแบบหลายเฟส	๔๗

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
๔.๔ ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่	๔๙
๔.๕ สรุป	๕๐
บทที่ ๕ สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	๕๑

๕.๑ บทสรุป
๕.๒ ข้อเสนอแนะ
บรรณานุกรม

๕.๑
๕.๒
๕.๕

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
๒๑ ความสัมพันธ์ของจำนวนเฟสเงื่อนไขและความถี่ของการออสซิลเลตของ โครงสร้างวงจร	๒๑
๒๒ ความสัมพันธ์ของจำนวนเฟสเงื่อนไขและความถี่ของการออสซิลเลตของ โครงสร้างวงจร	๒๒
๔๑ ขนาดของทรานซิสเตอร์	๔๑

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
๒.๑ สัญลักษณ์ของ VDTA	๕
๒.๒ ระบบของวงจรกรองความถี่	๖
๒.๓ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ	๘
๒.๔ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านในทางอุดมคติ	๙
๒.๕ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในทางอุดมคติ	๙
๒.๖ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในทางอุดมคติ	๑๐
๒.๗ บล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของวงจรกำเนิดสัญญาณ	๑๓
๒.๘ บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่มีการป้อนกลับแบบบวก	๑๓
๒.๙ ความหมายทางเกณฑ์ของบาร์คูลูเซน	๑๕
๒.๑๐ โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณชานน์เฟสเดียว	๑๗
๒.๑๑ การดัดแปลงกำหนดความถี่	๑๙
๒.๑๒ ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	๒๐
๒.๑๓ โครงสร้างของวงจรกำเนิดสัญญาณชานน์หลายเฟสที่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	๒๑
๒.๑๔ สัญญาณชานน์ ๓ เฟสที่มีความต่างของเฟสของสัญญาณข้างเคียง ๑๒๐ องศา	๒๒
๒.๑๕ สัญญาณชานน์ ๓ เฟสที่มีความต่างของเฟสของสัญญาณข้างเคียง ๖๐ องศา	๒๓
๒.๑๖ ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ตามสมการที่ ๒.๒๑	๒๔
๒.๑๗ ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ตามสมการที่ ๒.๒๒	๒๕
๒.๑๘ โครงสร้างของวงจรกำเนิดสัญญาณชานน์หลายเฟสที่วงจรกรองผ่านทุกความถี่	๒๕
๒.๑๙ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ CFA	๒๖
๒.๒๐ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ OTA	๒๗
๒.๒๑ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ DVCC	๒๗
๒.๒๒ วงจรอินทิเกรเตอร์โหมดแรงดันที่ใช้ OTA กับออปแอมป์	๒๘
๒.๒๓ วงจรอินทิเกรเตอร์โหมดกระแสที่ใช้ OTA กับออปแอมป์	๒๙

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
๓.๑ ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	๓๑
๓.๒ วงจรอินทิเกรเตอร์โหมดกระแส	๓๒
๓.๓ วงจรเทียบเคียงของ CFTA เมื่อพิจารณาที่ความสูง	๓๕

๓.๔	วงจรอินทิเกรเตอร์เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง	๓๕
๓.๕	แผนผังการสังเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณ	๓๖
๓.๖	(a) ๒ nd order LP filter (b) integrator	๓๗
๓.๗	บล็อกไดอะแกรมวงจรสร้างลำดับที่ ๓ ที่พัฒนาขึ้น	๓๘
๓.๘	โครงสร้างของวงจรกำเนิดสัญญาณขายัน n เฟส	๓๙
๓.๙	แผนผังการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่	๔๐
๔.๑	โครงสร้างภายในของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	๔๓
๔.๒	ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรอินทิเกรเตอร์	๔๔
๔.๓	ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรอินทิเกรเตอร์เมื่อปรับค่า LB	๔๔
๔.๔	ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่มีความถี่ต่างๆ	๔๕
๔.๕	ผลการจำลองวงจรกำเนิดสัญญาณขายันแบบควอดเรเจอร์ที่ความถี่ ๑๓๖MHz	๔๖
๔.๗	ผลการจำลองวงจรกำเนิดสัญญาณ ๓ เฟสที่ความถี่ ๒.๔๖๕MHz	๔๘
๔.๘	ผลการจำลองวงจรกำเนิดสัญญาณ ๓ เฟสที่ความถี่ ๔.๘๓๐MHz	๔๘
๔.๙	ผลตอบสนองทางขนาด	๔๙
๔.๑๐	ผลตอบสนองทางขนาดของฟังก์ชัน band pass เมื่อเปลี่ยนค่า R	๕๐

บทที่ ๑

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน ส่งผลให้อุตสาหกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะทางด้านการออกแบบวงจรได้มีการพัฒนาให้เจริญก้าวหน้าไปอย่างมากมาย เมื่อเทียบกับในอดีต โดยเริ่มจากการออกแบบวงจรโดยใช้หลอดสุญญากาศ มาเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นดิสครีต (Discrete) จนมาเป็นรูปแบบ วงจรรวม (Integrated circuit) หรือที่เรียกว่าไอซี (IC) ในขณะที่ได้มีการวิจัยคิดค้นการออกแบบวงจรโดยใช้หลักการใหม่ๆ ขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อให้สามารถนำวงจรไปใช้ได้โดยง่าย หรือออกแบบวงจรที่มีใช้งานกันอยู่แล้ว ให้มีคุณสมบัติโดดเด่นกว่าวงจรเดิม กล่าวคือ ทำให้มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น อาทิเช่น ทำให้ค่าความละเอียดแม่นยำในการทำงานดียิ่งขึ้น มีผลตอบสนองต่อความถี่ในการปฏิบัติงานสูง อีกทั้งให้วงจรใช้จำนวนอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทำให้วงจรบริโภคกำลังไฟฟ้าน้อยลง สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำลง รวมถึงทำให้วงจรที่ออกแบบขึ้นนั้นทำงานโดยอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ระดับแรงดันไฟเลี้ยง สัญญาณรบกวน ส่งผลน้อยที่สุด เป็นต้น

ในทศวรรษที่ผ่านมา มีความต้องการที่จะลดแรงดันไฟเลี้ยงของระบบและวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากความนิยมในปัจจุบันที่มีออกแบบและผลิตให้ผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์นั้น มีขนาดเล็กสามารถพกพาได้ โดยมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง จากเหตุผลที่มีความจำเป็นในการต้องการลดแรงดันไฟเลี้ยงลง เทคนิคการทำงานในโหมดกระแสเป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเพราะเหมาะสมกับความต้องการดังกล่าว มากกว่าการทำงานในโหมดแรงดันแบบเดิม นอกจากนี้แล้ววงจรที่มีการทำงานในโหมดกระแสยังมีลักษณะเด่นกว่าโหมดแรงดันหลายประการ ยกตัวอย่าง เช่น มีพิสัยพลวัตกว้างกว่า ตอบสนองต่อความถี่ในย่านกว้างกว่า มีความเป็นเชิงเส้นกว้างกว่า โครงสร้างของวงจรมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับหน้าที่ของวงจรเดียวกัน และบริโภคกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า ดังนั้นจึงพบเห็นได้ว่า มีการนำเสนอการออกแบบและสังเคราะห์วงจรที่มีการทำงานในโหมดกระแสอย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแล้ววงจรในโหมดกระแสที่มีความต้านทานที่เอาต์พุตมีค่าสูงจะสามารถต่อคาสเคด (Cascade) หรือต่อโหลดได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้วงจรตามกระแส (Current follower) เพิ่มเติม รวมถึงวงจรที่ใช้ตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์จะสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่ายและขนาดของชิปจะมีขนาดเล็กกว่าตัวเก็บประจุแบบลอย

วงจรรองความถี่เป็นวงจรหนึ่งที่สำคัญและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จนอาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกอย่างจะมีวงจรรองความถี่เป็นส่วนประกอบอยู่ ตัวอย่าง เช่น ระบบสื่อสาร ระบบเครื่องมือวัด และระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [๑-2] เป็นต้น โดยมากแล้ววงจรรองความถี่มักจะถูกพัฒนาให้เป็นวงจรรองความถี่แบบหลายหน้าที่ลำดับสองแบบหลายอินพุต-หนึ่งเอาต์พุต (Multiple input-single output biquadratic filter) ที่มีข้อดีกว่าวงจรรองความถี่ทั่วไปคือ เป็นวงจรที่สามารถให้การตอบสนองได้หลายแบบ โดย

ที่ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวงจร อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อคาสเคดเป็นวงจรรองความถี่อันดับสูงได้ ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยวงจรที่อยู่ข้างในอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องมีขนาดเล็ก บริโภคกำลังงานต่ำ สามารถทำงานที่แรงดันต่ำๆ ได้เนื่องจากต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาให้วงจรสามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้ โดยการสังเคราะห์วงจรในโหมดกระแสเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับวงจรในโหมดแรงดัน เช่น มีช่วงพิสัยพลวัตที่กว้าง มีแบนด์วิธกว้าง ทำงานที่แรงดันต่ำได้ดีและบริโภคลำงงานต่ำ [3] ดังนี้ เป็นต้น ด้วยข้อดีดังกล่าวมาทำให้นักวิจัยได้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรรองความถี่ในโหมดกระแสไว้มากมาย

จากการศึกษาพบว่าได้มีผู้นำเสนอวงจรรองความถี่ลำดับสองหลายหน้าที่แบบหลายอินพุต-หนึ่งเอาต์พุตที่ทำงานในโหมดกระแสโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟที่แตกต่างกันไป [4-22] แต่วงจรเหล่านั้นยังมีข้อด้อยดังต่อไปนี้

ไม่สามารถควบคุมความถี่โพลและควอลิตี้แฟกเตอร์ได้อย่างอิสระจากกัน

ใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมากโดยเฉพาะตัวต้านทาน

ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

ต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวงจรเพื่อให้ได้ผลตอบสนองหลายฟังก์ชัน

ต้องป้อนอินพุตที่มีขนาดเป็นสองเท่าของอินพุตตัวอื่นๆ

ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยซึ่งไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นวงจรรวม

ต้องการความแม่นยำ (Matching) กันของอุปกรณ์พาสซีฟ

จากปัญหาที่ได้นำเสนอหลักการข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่ลำดับสองหลายหน้าที่โหมดกระแสที่สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

วัตถุประสงค์

๑. เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่ลำดับสองหลายหน้าที่โหมดกระแสที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์
๒. เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรรองความถี่ลำดับสองหลายหน้าที่โหมดกระแสที่สังเคราะห์และออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม PSPICE

สมมติฐานของการวิจัย

๑. วงจรอินทิเกรเตอร์โหมดกระแสสามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์
๒. วงจรประยุกต์ใช้งานวงจรอินทิเกรเตอร์โหมดกระแสสามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วงจรกรองความถี่โหมดกระแสหลายหน้าที่ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนทำให้สะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

ขอบเขตของการวิจัย

การสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดกระแสที่ควบคุมได้แบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรรวมแอนะล็อกมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

๑. วงจรกรองความถี่ที่สังเคราะห์และออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ current differencing cascaded transconductance amplifier (CDCTA) เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ
๒. ควอลิตี้แฟกเตอร์และความถี่โพลสามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกันด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์
๓. วงจรสามารถทำงานได้ในย่านความถี่สูงถึงระดับเมกะเฮิรซ์ (MHz)
๔. วงจรที่สร้างขึ้นใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ทั้งหมด

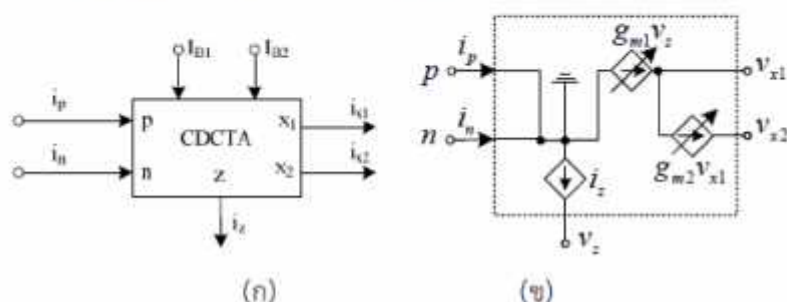
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากในรายงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์และออกแบบวงจรอิทีเกรเตอร์และวงจรประยุกต์ใช้งาน จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงอุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟพื้นฐานรวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

๑. ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรขยายความนำผลต่างแรงดัน
๒. หลักการของวงจรกรองความถี่
๓. หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณ
๔. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
๕. สรุป

๒.๑ ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรขยายความนำผลต่างแรงดัน

ทฤษฎีเบื้องต้นของอุปกรณ์ current differencing cascaded transconductance amplifier CDCTA เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใหม่ตระกูลนี้มี ๕ ขั้ว โดย CDCTA ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย X. Jun และคณะ ในปี ค.ศ. ๒๐๑๒ ซึ่งได้พัฒนามาจาก current differencing transconductance amplifier (CDTA) แต่ CDCTA จะมีคุณสมบัติพิเศษกว่า CDTA โดยมีขั้วกระแสเอาต์พุตที่สามารถควบคุมความนำถ่ายโอน (Transconductance) ได้อย่างอิสระจากกันจำนวนสองตัว ในจำนวน ๕ ขั้วของ CDCTA สามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มคือ ขั้วสัญญาณกระแสอินพุต ๒ ขั้ว (p และ n) ขั้วกระแสเอาต์พุต ๓ ขั้ว (z , x_p และ x_n) และขั้วกระแสควบคุม ๒ ขั้ว (g) โดยสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CDCTA แสดงได้ดังภาพที่ ๑(ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ ๒๑ CDCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

จากสัญลักษณ์ในภาพที่ 1(ก) ขั้วกระแสอินพุตซึ่งมีความต้านทานต่ำมาก (ในอุดมคติเป็น 0) ได้แก่ ขั้ว p (positive) และขั้ว n (negative) ส่วนขั้วกระแสเอาต์พุตได้แก่ขั้ว z และขั้ว x_o และ x_o และขั้วกระแสควบคุมได้แก่ขั้ว i_{B_1} และ i_{B_2} กระแสเอาต์พุตที่ขั้ว z จะเป็นผลต่างของกระแสอินพุตที่ไหลเข้าที่

ขั้ว p และขั้ว n ส่วนกระแสเอาต์พุตที่ขั้ว x_n จะเป็นการส่งผ่านความนำถ่ายโหนดที่หนึ่ง (g_{m1}) ซึ่งควบคุมได้ด้วย I_{B1} มาจากแรงดันที่ขั้ว z ขณะที่กระแสเอาต์พุตที่ขั้ว x_n จะเป็นการส่งผ่านความนำถ่ายโหนดที่สอง (g_{m2}) ซึ่งควบคุมได้ด้วย I_{B2} มาจากแรงดันที่ขั้ว x_n ในทางอุดมคติความต้านทานที่ขั้ว z, x_n และ x_p จะมีค่าเป็นอนันต์ จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงด้วยสมการได้ดังนี้

$$i_z = i_p - i_n; i_{x1} = g_{m1}v_z; i_{x2} = g_{m2}v_{x1} \quad (๑)$$

เมื่อ CDCTA ที่มีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ (Bipolar transistor) ความนำถ่ายโหนด g_{m1} และ g_{m2} สามารถแสดงได้เป็น

$$g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T} \quad (๒)$$

และ

$$g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (๓)$$

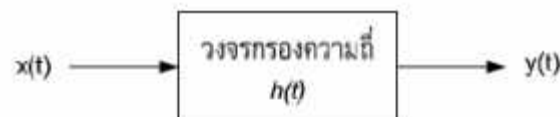
เมื่อ V_T คือศักดาความร้อน (Thermal voltage) ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 26mV

๒.๒ หลักการของวงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่มีบทบาทสำคัญวงจรหนึ่งในทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในสาขาต่างๆ มากมายและเป็นวงจรที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารโทรคมนาคมต่างๆ เช่น ในระบบการกระจายเสียง (Broadcasting systems), ระบบดาวเทียมสื่อสาร (Satellite systems) เป็นต้น วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท ได้แก่ วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital signals) หรือสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time signals) และวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่ถูกใช้กับสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา (Continuous-time signals) โดยวงจรกรองแบบแอนะล็อกนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อยๆ ได้อีก 2 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่ประเภทพาสซีฟ (Passive filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างจากอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ขดลวดตัวนำและตัวต้านทานหรือสร้างมาจากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ และวงจรกรองความถี่อีกประเภทหนึ่งคือ วงจรกรองความถี่ประเภทแอคทีฟ (Active filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ เช่น ออปแอมป์ OTA วงจรสายพานกระแส ฯลฯ ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เป็นต้น

รายละเอียดของวงจรกรองความถี่ที่จะกล่าวถึงเพื่อเป็นพื้นฐานเบื้องต้นในบทนี้นั้น จะเป็นหลักการโดยทั่วไปของวงจรกรองความถี่และจะเป็นการกล่าวถึงรูปแบบโดยทั่วไปของสมการการถ่ายโอน

ของวงจรกรองความถี่แบบแอนาล็อกที่มีรูปแบบของสมการการถ่ายโอนของวงจรเป็นแบบไบควอด (Biquadratic function) เป็นหลัก ระบบของวงจรกรองความถี่สามารถเขียนแสดงได้ดังภาพที่ 2.๒



ภาพที่ ๒.๒ ระบบของวงจรกรองความถี่

เมื่อ $x(t)$ คือ สัญญาณทางด้านขาเข้า

$y(t)$ คือ สัญญาณทางด้านขาออก

และ $h(t)$ คือ สัญญาณตอบสนองต่อสัญญาณแบบอิมพัลส์ (Impulse response) ของระบบซึ่งถ้าให้วงจรกรองความถี่ภายใต้การพิจารณาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นแบบคอซอล (Causal) เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) และเป็นระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time – invariant) แล้ว $y(t)$ จะสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$y(t) = \int_0^t h(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (๒.๓)$$

หรือเมื่อทำการแปลงลาปลาซของสมการที่ (๒.๓) จะได้ผลการแปลงลาปลาซคือ

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (๒.๔)$$

โดย $Y(s)$, $X(s)$ และ $H(s)$ คือผลการแปลงลาปลาซของ $y(t)$, $x(t)$ และ $h(t)$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาบนแกนความถี่ $s = j\omega$ สมการที่ (๒.๔) สามารถเขียนแสดงอยู่ในรูปส่วนประกอบของขนาดและเฟสได้ดังนี้ คือ

$$|Y(s)| = |H(s)||X(s)| \quad (๒.๕)$$

และ

$$\phi_{Y(j\omega)} = \phi_{H(j\omega)} + \phi_{X(j\omega)} \quad (๒.๖)$$

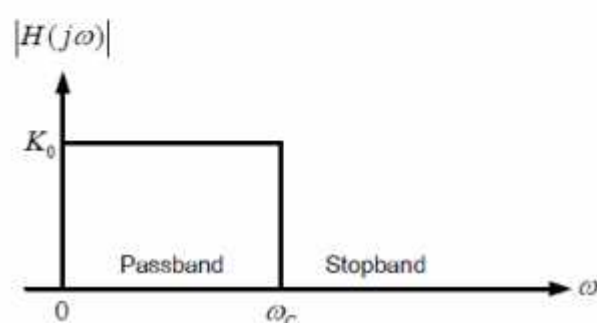
โดย $\phi_{Y(j\omega)}$ คือค่าเฟสของ $Y(j\omega)$, $\phi_{H(j\omega)}$ คือค่าเฟสของ $H(j\omega)$ และ $\phi_{X(j\omega)}$ คือค่าเฟสของ $X(j\omega)$

หลักการโดยทั่วไปของวงจรกรองความถี่นั้นก็คือ ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณที่ต้องการ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดก็เช่น ในการสัญญาณวิทยุซึ่งสัญญาณที่ส่งมาจากทางด้าน

สถานีส่งนั้นจะเป็นสัญญาณที่มาจากทุกๆสถานีที่ทำการกระจายเสียงรวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นขณะทำการกระจายเสียง การปรับค่าความถี่เพื่อรับฟังรายการจากสถานีใดสถานีหนึ่งนั้นจะทำได้โดยการกรองเอาสัญญาณของสถานีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการฟังรวมทั้งสัญญาณรบกวนออกให้เหลือเพียงสัญญาณของสถานีที่ต้องการจะรับฟังเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ (๒.๕) จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณทางด้านขาออกนั้นเป็นผลคูณของค่าขนาดของสัญญาณขาเข้ากับค่าขนาดของฟังก์ชันของการตอบสนองในเชิงความถี่ (Frequency response function) ของวงจรกรองความถี่ ถ้าหากค่าฟังก์ชันขนาด (Magnitude Function) ของ $H(j\omega)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง ω_1 และ ω_2 ก็แสดงว่าสัญญาณทางด้านขาออกจะมีค่าขนาดเท่ากับศูนย์ ไม่ว่าสัญญาณทางด้านขาเข้านั้นจะมีค่าเท่าไรอยู่ในช่วง (ω_1, ω_2) ซึ่งโดยทั่วไปช่วงความถี่ (ω_1, ω_2) จะเรียกว่าแถบหยุด (Stopband) ของวงจร $H(j\omega)$ นั้น ในทำนองเดียวกันเมื่อค่าฟังก์ชันขนาดของ $H(j\omega)$ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง ω_1 และ ω_2 ก็จะทำให้สัญญาณทางด้านขาออกจะมีค่าขนาดเป็นไปตามสมการที่ (2.๕) ในช่วงความถี่ (ω_1, ω_2) ซึ่งช่วงความถี่นี้มีชื่อเรียกว่าแถบผ่าน (Passband) ของวงจร $H(j\omega)$ นั้น

จากธรรมชาติการตอบสนองของฟังก์ชันขนาดของ $H(j\omega)$ ในช่วงของแถบความถี่ที่แตกต่างกันของวงจร ทำให้วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นแบบย่อย ๆ ได้อีก 4 แบบตามคุณลักษณะของแถบหยุดและแถบผ่านของวงจร ซึ่งเพื่อให้สะดวกในการอธิบายจึงขอสมมุติให้วงจรกรองความถี่ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวงจรกรองความถี่ในเชิงอุดมคติ นั่นคือ การตอบสนองทางเฟสเป็นแบบเชิงเส้นและมีค่าการสูญเสียทางขนาดเป็นศูนย์ในช่วงแถบผ่านของวงจรและให้การสูญเสียในแถบหยุดของวงจรมีค่าเป็นอนันต์ ($|H(j\omega)| = 0$)

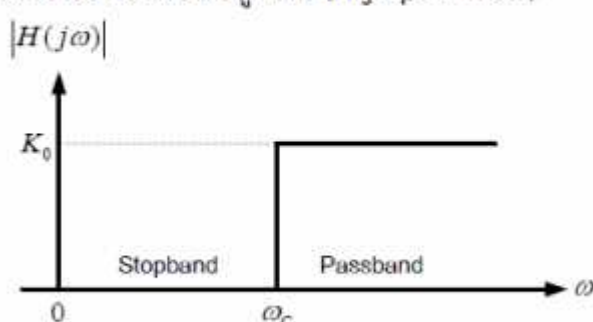
๒.๒.1 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (Low - pass filter)



ภาพที่ ๒.๓ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ

วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง ๐ ถึงความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency) ω_c ในขณะที่ช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟจะเป็นช่วงความถี่แถบหยุดของวงจร ในกรณีเช่นนี้ค่าแบนด์วิธ (Bandwidth) ของวงจรมีค่าเท่ากับ ω_c จะพบว่าการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในแบบอุดมคตินั้นแสดงดังภาพที่ ๒๓

๒.๒.2 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (High-pass filter)

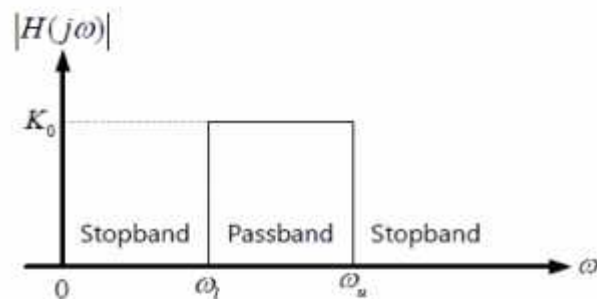


ภาพที่ ๒๔ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านในทางอุดมคติ

วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงความถี่ต่ำระหว่าง 0 และความถี่คัทออฟ ω_c ในขณะที่วงจรจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟผ่านวงจรไปได้ ซึ่งการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในแบบอุดมคตินั้นแสดงในภาพที่ ๒๔

๒.๒.3 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band – pass filter)

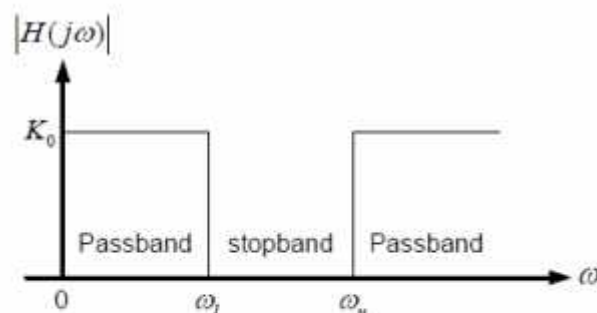
วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านของวงจรอยู่ในช่วงระหว่างความถี่คัทออฟของความถี่ คือ ω_1 และ ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) ในขณะที่แถบหยุดของวงจรจะมีอยู่สองแถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คัทออฟ ω_1 และในช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟ ω_2 สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในแบบอุดมคตินั้นจะมีดังแสดงในภาพที่ ๒๕



ภาพที่ ๒๕ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในทางอุดมคติ

๒.๒.๔ วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด (Band-stop filter)

วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงระหว่างความถี่คutoff สองความถี่คือ ω_l และ ω_h ($\omega_h > \omega_l$) ในขณะที่แถบความถี่ผ่านของวงจรจะมีอยู่สองแถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คutoff ω_l และในช่วงของความถี่ที่สูงกว่าความถี่คutoff ω_h สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในแบบอุดมคติแสดงดังภาพที่ ๒.๖



ภาพที่ ๒.๖ การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในทางอุดมคติ

วงจรกรองความถี่ที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ตามอุดมคตินั้นไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริงซึ่งในทางปฏิบัตินั้นคงใช้วงจรที่มีผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ประมาณคล้ายกับผลตอบสนองในอุดมคติมาปฏิบัติการต่างๆ เท่านั้น วงจรทางปฏิบัติเบื้องต้นแบบง่ายๆ คือ วงจรกรองความถี่ชนิดที่เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบไบควอดซึ่งคุณสมบัติของวงจรไบควอดนั้นจะมีดังที่จะกล่าวถึงต่อไป

๒.๒.5 รูปแบบสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบไบควอด

สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบไบควอดนั้นจะมีรูปแบบมาตรฐานเป็นดังนี้ คือ

$$H(s) = K \frac{s^2 + \frac{\omega_z}{Q_z}s + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (๒.๗)$$

โดย ω_z , Q_z และ Q_p คือ ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงค่าความถี่ของซีโร่ (Zero) ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของซีโร่, ค่าความถี่ของโพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของโพลของฟังก์ชันการถ่ายโอน $H(s)$ นั้นตามลำดับ

เมื่อค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2.๗) เปลี่ยนไป จะทำให้ได้วงจรกรองถี่ชนิดต่าง ๆ คือ วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน, แบบความถี่สูงผ่าน, แบบแถบความถี่ผ่าน และแบบความถี่หยุดได้ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณแบบต่างๆ ดังกล่าวนั้นมีตามลำดับดังต่อไปนี้ คือ

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน จะมีรูปแบบสมการดังนี้คือ

$$H(s) = K \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (๒.๘)$$

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านนั้นมีลักษณะต่อไปนี้ คือ

$$H(s) = K \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (๒.๙)$$

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน จะมีรูปแบบของสมการโดยเฉพาะเป็น

$$H(s) = K \frac{\frac{\omega_p}{Q_p}s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (๒.๑๐)$$

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบโพลีโนเมียลของวงจรความถี่แบบแถบความถี่หยุด จะมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากฟังก์ชันการถ่ายโอนอื่นๆ ดังนี้คือ

$$H(s) = K \frac{s^2 + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q}s + \omega_p^2} \quad (๒.๑๑)$$

๒.๓ หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณ

วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator circuit) เป็นวงจรไฟฟ้าที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณได้ในตัววงจรเองโดยจะให้สัญญาณทางด้านขาออก (Output signal) มีรูปแบบเป็นสัญญาณแบบรายคาบ (Periodic signal) โดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณทางด้านขาเข้า (Input signal) ของวงจรแต่อย่างใด วงจรกำเนิดสัญญาณนั้นเป็นวงจรพื้นฐานอย่างหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในทางวิศวกรรมไฟฟ้าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในระบบเครื่องมือวัด ระบบการสื่อสารโทรคมนาคม ฯลฯ ในระบบโทรคมนาคมวงจรออสซิลเลเตอร์สามารถจะถูกใช้เป็นวงจรสร้างสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier signal) เพื่อใช้ในการมอดูเลต (Modulation) สัญญาณหรือเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงหลัก (Reference clock signal) ให้แก่ระบบ เป็นต้น

วงจรกำเนิดสัญญาณที่เป็นที่รู้จักกันดีมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ วงจรกำเนิดสัญญาณแบบคริสตัล (Crystal oscillator) วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase shift oscillator) วงจรกำเนิดสัญญาณแบบวินบริดจ์ (Wien – bridge oscillator) วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิทซ์ (Colpitts oscillator) หรือ วงจรกำเนิดสัญญาณแบบฮาร์ทเลย์ (Hartley oscillator) เป็นต้น รูปแบบของสัญญาณที่สร้างขึ้นจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบต่าง ๆ ก็มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น สัญญาณไซน์ สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม สัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณฟันเลื่อย ฯลฯ อย่างไรก็ตามในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการเกี่ยวกับวงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ซึ่งเป็นเรื่องเกี่ยวเนื่องอยู่กับวงจรกำเนิดสัญญาณที่จะนำเสนออยู่ในงานวิจัยฉบับนี้เท่านั้น

ในการออกแบบสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณนั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของวงจร เงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบ และต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงานที่สำคัญในการกำเนิดรูปสัญญาณของวงจรอีกด้วย

๒.๓.1 องค์ประกอบของวงจรกำเนิดสัญญาณ

องค์ประกอบที่สำคัญของวงจรกำเนิดสัญญาณที่จำเป็น สามารถแยกออกได้ดังนี้

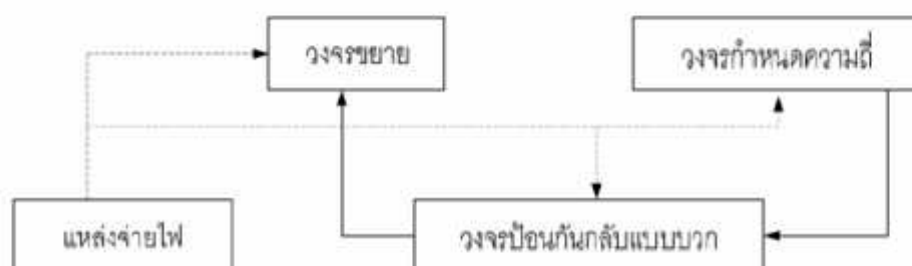
๑. ตัวกำเนิดพลังงาน (Energy source) ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟ แบตเตอรี่ โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่มีศักดาคงที่ใช้จ่ายไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรเป็นสำคัญ

๒. วงจรกำเนิดความถี่ (Frequency-determining circuit) ในการกำเนิดสัญญาณ วงจรกำเนิดความถี่นี้จะเป็นวงจรที่สามารถใช้เลือกความถี่ได้ ในลักษณะที่เป็นวงจรกรองแบบแถบความถี่ ผ่านซึ่งอาจจะได้แก่ วงจรจูนแบบ LC, วงจรจูนแบบ RC หรือ แบบคิสตัล เป็นต้น

๓. วงจรขยาย (Amplifier circuit) เป็นวงจรประเภทแอกทิฟซึ่งอาจจะเป็นวงจรขยายแบบทรานซิสเตอร์ แบบเฟต หรือวงจรขยายที่อยู่ในรูปของไอซีอย่างใดอย่างก็ได้ ซึ่งจะทำหน้าที่ทำการกำเนิดของสัญญาณไว้ด้วยการชดเชยพลังงานในส่วนที่สูญเสียไปภายในวงจรกำเนิดสัญญาณให้มีค่าคงตัวอยู่เช่นเดิมโดยอัตโนมัติ

4. วงจรป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback circuit) เป็นวงจรที่จะนำสัญญาณจากทางด้านขาออกของวงจรกำเนิดสัญญาณกลับไปยังด้านขาเข้าของวงจร โดยสัญญาณทางด้านขาออกที่ป้อนกลับไปสู่ด้านขาเข้าของวงจรมันจะต้องจัดให้มีเฟส ตรงกันกับเฟสของวงจรทางด้านขาเข้าทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดการเสริมสัญญาณกันขึ้นเพื่อจะทำให้สัญญาณคงตัวอยู่ได้

ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 4 ข้อจัดประกอบกันได้ดังไดอะแกรมในภาพที่ 2.๗



ภาพที่ ๒.๗ บล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของวงจรกำเนิดสัญญาณ

๒.๓.๒ เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณของวงจร

วงจรกำเนิดสัญญาณนั้นจัดเป็นโครงข่ายแบบป้อนกลับแบบหนึ่ง ซึ่งมีการป้อนกลับแบบบวก สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมองค์ประกอบการไหลวนของสัญญาณได้ดังภาพที่ 2.1๓



ภาพที่ ๒.๘ บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่มีการป้อนกลับแบบบวก

สัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรเป็นดังต่อไปนี้

x_i คือ สัญญาณทางด้านขาเข้าของวงจร

x_o คือ สัญญาณทางด้านขาออกของวงจร

x_e คือ สัญญาณผลรวมระหว่าง x_i และ x_f มีค่าเท่ากับ $x_i + x_f$

x_f คือ สัญญาณป้อนกลับ

$A(j\omega)$ คือ ค่าเกนของวงจรขยาย

$B(j\omega)$ คือ ค่าเกนของวงจรกำหนดความถี่

จากบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ ๒๘ จะได้ว่า

$$x_e = x_i + x_f \quad (๒.๑๒)$$

เมื่อ $x_f = B(j\omega)x_o \quad (๒.๑๓)$

และ $x_o = A(j\omega)x_e \quad (๒.๑๔)$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (๒.๑๒) และ (๒.๑๓) ลงใน (๒.๑๔) ตามลำดับและเมื่อปรับรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)} \quad (๒.๑๕)$$

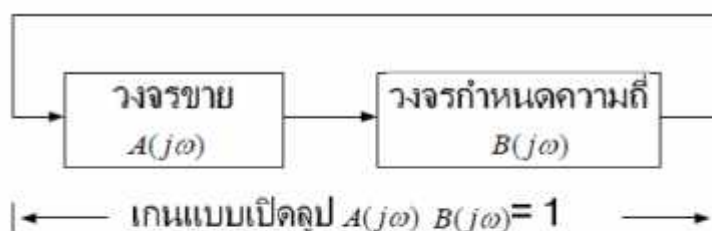
ในการกำเนิดสัญญาณนั้น วงจรจะต้องสามารถสร้างสัญญาณทางด้านขาออกได้โดยที่ไม่มีสัญญาณทางด้านขาเข้าซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวจะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อค่าเกนขยายมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) นั่นคือค่าส่วนของสมการที่ (๒.๑๕) จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ กล่าวคือ

$$1 - A(j\omega)B(j\omega) = 0 \quad (๒.๑๖)$$

โดยเมื่อเงื่อนไขตามสมการที่ (๒.๑๖) เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งความถี่ค่าหนึ่ง (สมมติว่าเป็นที่ค่าความถี่ ω_0) ก็แสดงว่าจะเกิดมีการให้กำเนิดสัญญาณที่มีความถี่นั้นขึ้น เกณฑ์การตรวจสอบที่สำคัญที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ เกณฑ์ของบาร์คฮูเซน (Barkhausen criterion) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่รู้จักกันดีในการออกแบบสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ เกณฑ์ดังกล่าวมีนัยที่กล่าวได้โดยสรุปดังนี้คือ “วงจรกำเนิดสัญญาณที่จะสามารถกำเนิดสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องนั้นจะต้องมีเกนแบบเปิดลูป (Open-loop gain) เป็นค่าจริงเท่ากับหนึ่ง” นั่นคือเราจะได้เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณแยกเป็นสองเงื่อนไขที่จะต้องเกิดพร้อมกันคือ

$$[A(j\omega_o)B(j\omega_o)] = 1 \quad (๒.๑๓)$$

และมีค่าเฟส $\arctan \{A(j\omega_o)B(j\omega_o)\} = 0$ หรือ $2n\pi$ (n = เลขจำนวนเต็ม)



ภาพที่ ๒.๙ ความหมายทางเกณฑ์ของบาร์คูลูเซ่น

ซึ่งในการรักษาค่าเกนแบบเปิดรูปของวงจรให้มีค่าเท่ากับหนึ่งนั้น ก็เพื่อเป็นการรักษาการกำเนิดสัญญาณให้คงที่อยู่ตลอดไปนั่นเอง ความหมายของเงื่อนไขบาร์คูลูเซ่นอาจแสดงได้ดังภาพที่ ๒.๙ โดยการป้อนกลับแบบบวกจะทำให้เกนแบบปิดรูป (Closed loop Gain) ของวงจรมีค่ามากขึ้นและถ้าเกนแบบเปิดรูปของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งก็จะทำให้เกนแบบปิดรูปของ วงจรค่าเป็นอนันต์ซึ่งจะเห็นได้โดยการแทนสมการที่ (๒.๑๓) ลงในสมการ (๒.๑๕) คือ

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{A(j\omega)}{1-1} = \infty \quad (๒.๑๔)$$

สมการที่ (๒.๑๔) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกนแบบเปิดรูปของวงจรมีค่าเท่ากับหนึ่งแล้วจะทำให้เกนแบบปิดรูปของวงจรมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งหมายความว่าแม้ไม่มีสัญญาณทางด้านขาเข้า ($x_i = 0$) วงจรนี้ก็อาจสามารถสร้างสัญญาณทางด้านขาออกได้ คือวงจรจะสามารถให้กำเนิดสัญญาณขึ้นมาได้นั่นเอง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ววงจรดังกล่าวจะอาศัยสัญญาณรบกวน (Noise Signal) เป็นสัญญาณเริ่มต้นทางด้านขาเข้าให้กับวงจรซึ่งสัญญาณรบกวนนี้อาจจะมาจากแหล่งกำเนิดใดๆ ก็ได้ เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมาจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเอง เป็นต้น

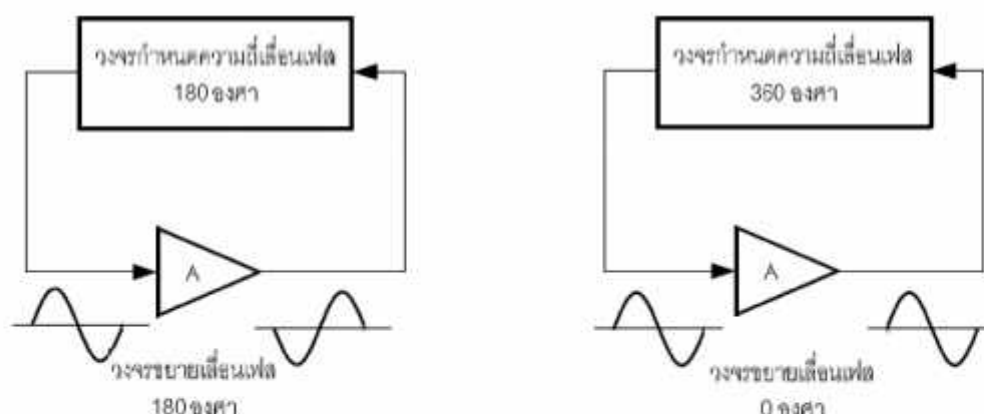
เมื่ออาศัยทฤษฎีนี้ในการนำไปสร้างเป็นวงจรถ้าหนดสัญญาณไซน์เฟสเดียวจะเป็นโครงสร้างของวงจร ๒ รูปแบบ ตามภาพที่ ๒.๑๐ คือถ้าวงจรถ้าหนดความถี่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ความถี่ ω_o ไป 180 องศา ก็จะต้องใช้วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ ω_o มีการเลื่อนเฟสไป 180 องศา ทั้งนี้เพราะว่าเพื่อให้การเลื่อนเฟสรวมทั้งหมดภายในรูปเป็น 360 องศา (2π เรเดียน) ในทำนองเดียวกันถ้าวงจรถ้าหนดความถี่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ความถี่ ω_o ไป 360 องศา ก็จะต้องใช้วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ ω_o มีการเลื่อนเฟสไป 0 องศา หรือไม่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณเลยในวงจรขยายสัญญาณ

อย่างไรก็ตามเพื่อพิจารณากันโดยธรรมชาติแล้วนั้น วงจรกำเนิดสัญญาณโดยทั่วไปนั้นจะเป็น วงจรประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear circuit) หากแต่การวิเคราะห์วงจรนั้นได้ใช้หลักการการ วิเคราะห์แบบเป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นเงื่อนไขที่ได้จึงสามารถที่จะกำหนดได้แต่เพียงความถี่ของ สัญญาณเท่านั้นแต่จะไม่สามารถกำหนดขนาดของสัญญาณที่กำเนิดขึ้นได้ดังจะเห็นได้จากเกณฑ์การ ตรวจสอบของบาร์คูลูเซ่นที่กล่าวไว้นั้นแสดงแต่เพียงว่า ณ ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณจะมีค่าเฟสของ สัญญาณเท่ากับ $2n\pi$ (n เป็นเลขจำนวนเต็ม)

สำหรับการควบคุมขนาดของสัญญาณที่ถูกกำเนิดขึ้นมานั้นที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธีคือ

๑. ทำได้โดยการเพิ่มวงจรในส่วนที่จะทำหน้าที่รักษาระดับของสัญญาณ

๒. ใช้หลักการของการจำกัดขนาดด้วยตัวเอง (Self-limiting) ของอุปกรณ์ภายในวงจร เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ (Transistor) ในขณะเริ่มต้นเมื่อสัญญาณมีค่าต่ำ ทรานซิสเตอร์จะมีค่าเกนสูง ทำให้ค่าลูบเกนของวงจรจะมีค่ามากกว่า 1 ณ ตำแหน่งความถี่ที่มีค่าเฟส เท่ากับ $2n\pi$ แต่เมื่อขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มอิ่มตัว (Saturate) ทำให้ ทรานซิสเตอร์มีเกนลดลงซึ่งจะทำให้ลูบเกนของวงจรจะลดลงจนกระทั่งทำให้สัญญาณมีขนาดที่คงที่ได้ใน ที่สุด



ภาพที่ ๒.๑๐ โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์เฟสเดียว

๒.๓.๓ หลักการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณ

การทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนั้นอาจสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะ คือ

1. สภาวะเริ่มต้นการทำงานของวงจร (First Turn-On)

สภาวะเริ่มต้นการทำงานของวงจรจะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกำลังงานให้แก่วงจร ซึ่งการ จ่ายกำลังงานจากแหล่งพลังงานภายนอกให้แก่วงจรอย่างทันทีทันใดนี้ จะทำให้เกิดสภาวะเปลี่ยนย้าย (Transition) ขึ้นทำให้มีสเปกตรัมของสัญญาณเกิดกระจายขึ้นอย่างมากมาย อย่างไรก็ตามเนื่องจากวงจร

กำเนิดสัญญาณนั้นจะมีวงจรกำหนดความถี่อยู่ใน ดังนั้นจึงมีความถี่เพียงความถี่เดียวเท่านั้นที่โดดเด่น และจะถูกเลือกให้ถูกป้อนย้อนกลับในกระบวนการป้อนกลับ ทำให้เกิดการฟีดแบ็คเป็นความถี่ของสัญญาณที่จะปรากฏเป็นสัญญาณขาออกของวงจร

๒. สภาวะการสร้างสัญญาณ (Signal build up)

เมื่อความถี่ของสัญญาณที่กำเนิดขึ้นถูกกำหนดความถี่โดยวงจรกำหนดความถี่แล้ว สัญญาณทางด้านขาออกจะถูกนำกลับไปยังด้านขาเข้าของวงจร ซึ่งสัญญาณจะถูกจัดโดยวงจรให้มีเฟสตรงกันเพื่อเป็นการเสริมสัญญาณให้มีกำลังมากยิ่งขึ้น

๓. สภาวะรักษาสัญญาณ (Sustained oscillation)

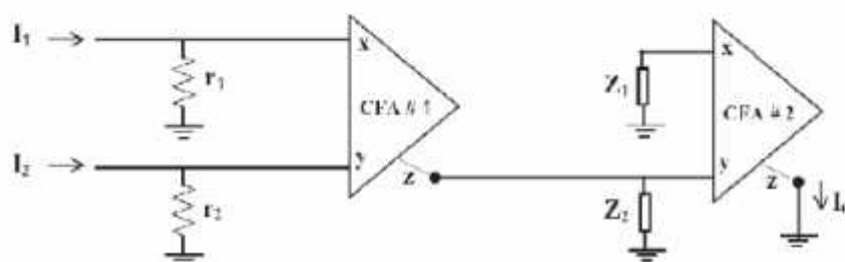
การรักษาสัญญาณกำเนิดสัญญาณให้คงอยู่นั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขของบาร์คฮุเซน คือผลคูณค่าเกนของวงจรขยาย และวงจรป้อนกลับจะต้องมีค่าเท่ากับหนึ่งในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าเกนรวมของระบบจะต้องมีค่ามากกว่าหนึ่งเล็กน้อยในสถานะเริ่มแรก ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการชดเชยการลดทอนสัญญาณที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในวงจรและจะใช้ลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณมีค่ามากมาเป็นตัวรักษาลูปเกนให้เท่ากับหนึ่งเพื่อเป็นตัวจำกัดขนาดของสัญญาณที่ได้ออกมา

๒.๔ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากได้มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นอย่างละเอียดไปแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ได้มีผู้นำเสนอมาพอสังเขปดังนี้

๒.๔.๑ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ CFA

วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ CFA ดังภาพที่ ๒.๑๑ ประกอบไปด้วย CFA จำนวน ๒ ตัว ตัวด้านทานอีก 3 ตัว ร่วมกับตัวเก็บประจุอีก 1 ตัว (Z_b)

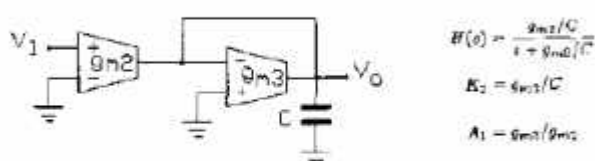


ภาพที่ ๒.๑๑ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ CFA

จุดเด่นของวงจรคือ สามารถปรับอัตราขยายของวงจรได้ ความต้านทานที่เอาต์พุตมีค่าสูงและใช้เพียงอุปกรณ์ที่ต่อลงกราวด์ แต่จะพบยังมีข้อด้อยคือ ใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีสจำนวนมาก ไม่สามารถควบคุมความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งกระแสเอาต์พุตไม่สามารถเป็นทั้งบวกและลบได้

๒.๔.๒ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ OTA

วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ OTA ดังภาพที่ ๒.๑๒ ประกอบไปด้วย OTA จำนวน ๒ ตัวและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 1 ตัว

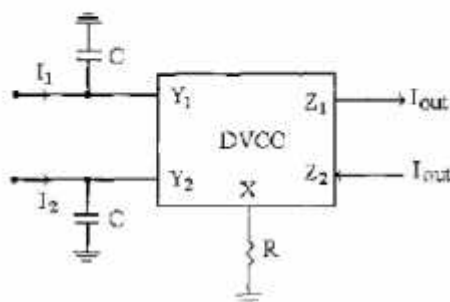


ภาพที่ ๒.๑๒ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ OTA

จุดเด่นของวงจรคือ สามารถปรับอัตราขยายของวงจรและความถี่ธรรมชาติได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์และใช้เพียงอุปกรณ์ที่ต่อลงกราวด์ แต่จะพบยังมีข้อด้อย คือ วงจรทำงานในโหมดแรงดัน ซึ่งมีจุดด้อยหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรในโหมดกระแส

๒.๔.๓ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ DVCC

วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ DVCC ดังภาพที่ ๒.๑๓ ประกอบไปด้วย DVCC จำนวน ๑ ตัวร่วมกับตัวต้านทาน 1 ตัวและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 2 ตัว

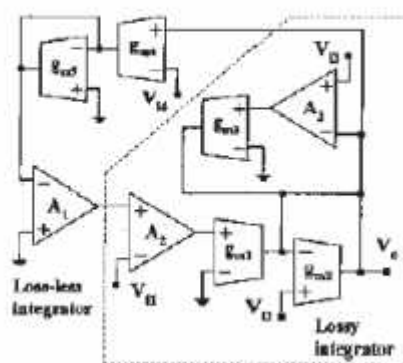


ภาพที่ ๒.๑๓ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ DVCC

จุดเด่นของวงจรคือ ความต้านทานที่เอาต์พุตมีค่าสูงและใช้เพียงอุปกรณ์ที่ต่อลงกราวด์ แต่จะพบยังมีข้อด้อยคือ ใช้อุปกรณ์พาสซีสจำนวนมาก ไม่สามารถควบคุมความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ไม่สามารถปรับอัตราขยายของวงจรได้

๒.๔.๔ วงจรรวมอินทิเกรเตอร์โหมดแรงดันที่ใช้ OTA กับออปแอมป์

วงจรรวมอินทิเกรเตอร์โหมดแรงดันที่ใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟได้แก่ OTA กับออปแอมป์ดังภาพที่ ๒.๑๔ จะพบว่า หากจะสร้างวงจรรวมอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย (Loss-less Integrator) จะใช้ OTA จำนวน 2 ตัวและออปแอมป์อีก 1 ตัว ส่วนวงจรรวมอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสียจะใช้ OTA จำนวน ๓ ตัวและออปแอมป์อีก 2 ตัว

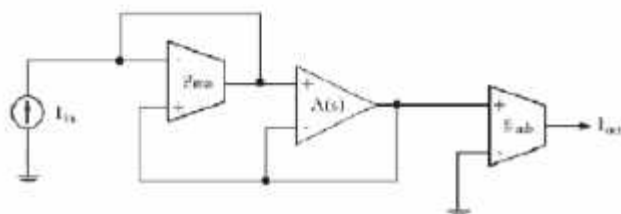


ภาพที่ ๒.๑๔ วงจรรวมอินทิเกรเตอร์โหมดแรงดันที่ใช้ OTA กับออปแอมป์

จุดเด่นของวงจรคือ สามารถปรับอัตราขยายของวงจรและความถี่ธรรมชาติได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟ แต่จะพบยังมีข้อด้อยคือ วงจรทำงานในโหมดแรงดันซึ่งมีจุดด้อยหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรในโหมดกระแส และวงจรจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมาก

๒.๔.๕ วงจรรวมอินทิเกรเตอร์โหมดกระแสที่ใช้ OTA กับออปแอมป์

วงจรรวมอินทิเกรเตอร์โหมดกระแสที่ใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟได้แก่ OTA กับออปแอมป์ดังภาพที่ ๒.๑๕ จะพบว่าวงจรจะใช้ OTA จำนวน 2 ตัวและออปแอมป์อีก 1 ตัว



ภาพที่ ๒๑๕ วงจรอินทิเกรเตอร์โหมดกระแสที่ใช้ OTA กับออปแอมป์

จุดเด่นของวงจรคือ สามารถปรับอัตราขยายของวงจรและความถี่ธรรมชาติได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟ แต่จะพบยังมีข้อด้อยคือ วงจรจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมาก

๒.๕ สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปของวงจรกำเนิดสัญญาณ รวมทั้งได้นำเสนองานวิจัยบางเรื่องที่เกี่ยวข้องกับวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ได้มีผู้วิจัยขึ้นมา โดยสรุปได้ว่าวงจรที่ได้มีผู้วิจัยมานั้นมีข้อด้อยดังนี้

- ใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมากโดยเฉพาะตัวต้านทาน
- ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์
- ไม่สามารถให้คุณสมบัติที่เป็นทั้งแบบลบและแบบบวกในวงจรเดียวกัน
- ไม่สามารถควบคุมอัตราขยายของวงจรได้ ทำให้บางการประยุกต์ใช้งานต้องต่อวงจรขยายสัญญาณกระแสเพิ่มเติม

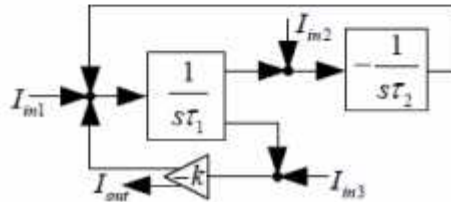
บทที่ ๓ วิธีการดำเนินการวิจัย

หลังจากที่ได้มีศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 แล้ว ในบทนี้ จะได้กล่าวถึงการสังเคราะห์และออกแบบวงจรจำลองอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ รวมถึงเหตุผลและแนวคิดในการพัฒนาการออกแบบตามลำดับ เพื่อให้ได้สมรรถนะที่สูงขึ้นอีกด้วย

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าได้มีผู้นำเสนอวงจรกรองความถี่ลำดับสองหลายหน้าที่แบบหลายอินพุต-หนึ่งเอาต์พุตที่ทำงานในโหมดกระแสโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟที่แตกต่างกันไป แต่วงจรเหล่านั้นยังมีข้อด้อยสามารถสรุปคุณสมบัติของวงจรที่ผ่านมาดังตารางที่ ๓.๑

ตารางที่ ๓.๑ คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ลำดับสองหลายหน้าที่โหมดกระแสที่มีผู้นำเสนอมาแล้ว

Active element	No. of active element	No. of R+C	Electronic control	Independent tune of ω_0 and Q_0	Requiring double input	Matching Condition	High output impedance
CCCDTA	๓	๐/๒	Yes	No	Yes	No	Yes
ICCI	๓	๒/๒	No	No	No	No	Yes
MO-CCCDTA	๓	๐/๒	Yes	No	No	No	Yes
OTA	๔'	๐/๒	Yes	No	No	Yes	Yes
CCII	๓	๒/๒	No	No	No	Yes	No
FDCCI	๓	๓/๒	No	Yes	No	Yes	Yes
DVCCTA	๓	๓/๒	Yes	No	No	No	Yes
MO-CCCDTA	๒	๐/๒	Yes	No	No	No	Yes
MOCCII & MO-CCCA	๓	๒/๒	Yes	Yes	No	No	Yes
CCII	๓	๒/๒	No	No	No	Yes	Yes
CDBA	๓	๒/๒	No	No	Yes	No	Yes
CCCI	๒	๐/๒	Yes	No	No	No	Yes
CCCI	๔'	๐/๒	Yes	Yes	No	Yes	Yes
CDTA	๓	๐/๒	Yes	No	No	No	Yes
CDTA	๒	๐/๒	Yes	No	Yes	No	Yes
CDTA	๔'	๒/๒	Yes	Yes	No	No	Yes
CCII	๓	๓/๒	No	Yes	No	No	Yes
CCII	๒	๓/๒	No	Yes	Yes	Yes	Yes
G-CCCI	๒	๐/๒	Yes	Yes	Yes	No	Yes



ภาพที่ ๓.๑ กรอบแนวความคิดในการออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่

จากภาพที่ ๓.๑ จะได้กระแสเอาต์พุต ดังนี้

$$I_{out} = \frac{k \left[- \left(s^2 + \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right) I_{in3} - s \frac{1}{\tau_1} I_{in1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2} I_{in2} \right]}{s^2 + sk \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (๔)$$

จากสมการ (๔) จะได้ความถี่โพล (Pole frequency) และควอลิตี้แฟกเตอร์ (Quality factor) ของวงจรดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (๕)$$

และ

$$Q = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (๖)$$

จากสมการที่ (๓) และ (๔) จะพบว่าสามารถควอลิตี้แฟกเตอร์ได้อย่างอิสระจากความถี่โพลที่อัตราขยาย k

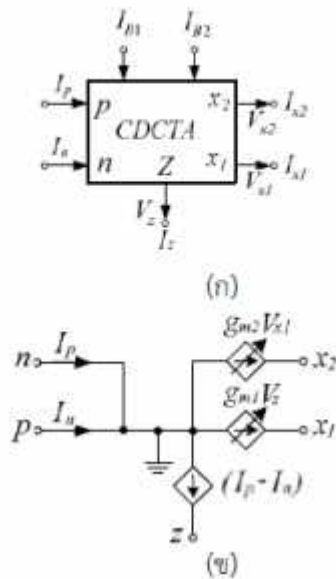
เนื่องจากวงจรที่นำเสนอประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักคือ CDCTA หัวข้อนี้จึงขอลำดับ CDCTA พอสั่งเซป ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของ CDCTA แสดงด้วยสมการในเชิงเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1, I_{x1} \\ I_{x1}, I_{x2c} \\ I_{x2}, I_{x2c} \\ V_{x2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{m2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ V_i \\ V_{x1} \end{bmatrix} \quad (๗)$$

ที่ซึ่ง g_m ค่าความนำถ่ายโอนของ CDCTA คือค่า g_m สามารถปรับค่าได้ โดยค่ากระแสไบอัสจากภายนอก I_b สำหรับโครงสร้าง CDCTA ที่มีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ ค่าความนำถ่ายโอนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (๒) และ (๓) โดยสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CDCTA แสดงได้ดังภาพที่ ๒.๒

$$g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T} \quad (๒)$$

$$g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (๓)$$



ภาพที่ ๒.๒ CDCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

๒.๒ วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ที่นำเสนอ

วงจรที่นำเสนอเป็นวงจรกรองความถี่โหมดกระแสที่มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูง ดังแสดงในภาพที่ ๒ ซึ่งวงจรประกอบไปด้วย CDCTA จำนวน ๒ ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก ๒ ตัว วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถกรองความถี่สูงผ่าน (HP), ความถี่ต่ำผ่าน(LP) และ ความถี่แถบผ่าน (BP) ได้ทั้งหมดด้วยคุณสมบัติเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงเมื่อพิจารณา CDCTA ในอุดมคติ ซึ่ง จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของแต่ละฟังก์ชันเป็น

$$\frac{I_{HP}}{I_n} = \frac{-s^2}{s^2 + s \frac{g_{m4}g_{m1} + g_{m1}g_{m2}}{g_{m3}C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (๔)$$

$$\frac{I_{LP}}{I_n} = \frac{-\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + s \frac{g_{m4}g_{m1} + g_{m1}g_{m2}}{g_{m3}C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (๕)$$

และ

$$\frac{I_{BP}}{I_n} = -\frac{s \frac{g_{m4}g_{m1}}{g_{m3}C_1}}{s^2 + s \frac{g_{m4}g_{m1} + g_{m1}g_{m2}}{g_{m3}C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (๖)$$

ซึ่งความถี่โพล (ω_0) และควอลิตี้แฟกเตอร์ (Q) สามารถแสดงได้เป็น

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}$$

และ

$$Q_0 = \frac{g_{m1}}{g_{m4}} \sqrt{\frac{C_1g_{m2}}{C_2g_{m1}}}$$

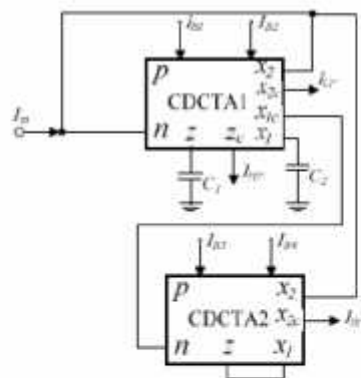
เพื่อพิจารณาอย่างง่าย, ถ้า $I_{B10} = I_{B11} = I_B$ และ $C_{m1} = C_{m2} = C$, ดังสมการ (๗) และ (๘) สามารถลดลงได้เป็น

$$\omega_0 = \frac{I_B}{2CV_T}, \quad (๙)$$

และ

$$Q_0 = \frac{I_{B1}}{I_{B4}} \quad (๑๐)$$

จากสมการที่ (๙) และ (๑๐) พบว่าสามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์และความถี่โพลได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระแสไบอัส เพิ่มค่าความถี่โพลและปรับค่าได้อิสระจากควอลิตี้แฟกเตอร์โดยการปรับค่ากระแส I_B ควอลิตี้แฟกเตอร์สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระแส I_{B10} และ I_{B11}



๒.๔ การวิเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติ

วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติ ค่ากระแส I_x , I_{B10} และ I_{B11} ของ CDCTA สามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$I_x = \alpha_p I_p - \alpha_n I_n; I_{x1} = \beta_1 g_{m1} V_{x1}; I_{x2} = \beta_2 g_{m2} V_{x2} \quad (๑๑)$$

เมื่อพารามิเตอร์ α_p , α_n , β_1 และ β_2 คือค่าผิดพลาดของการส่งผ่าน ภาพที่ ๒ สามารถปรับค่ากระแสเอาต์พุตได้โดย

$$\frac{I_{HP}}{I_{in}} = \frac{-\alpha_{n1}s^2}{s^2 + s \frac{\alpha_{n1}\alpha_{n2}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{\beta_3g_{m3}C_1} + \frac{\alpha_{n1}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (๑๒)$$

$$\frac{I_{LP}}{I_m} = \frac{-\frac{\alpha_{n1}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + s\frac{\alpha_{n1}\alpha_{n2}\beta_1\beta_4g_{m1}g_{m4} + \alpha_{n1}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{\beta_3g_{m3}C_1} + \frac{\alpha_{n1}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (๑๕)$$

และ

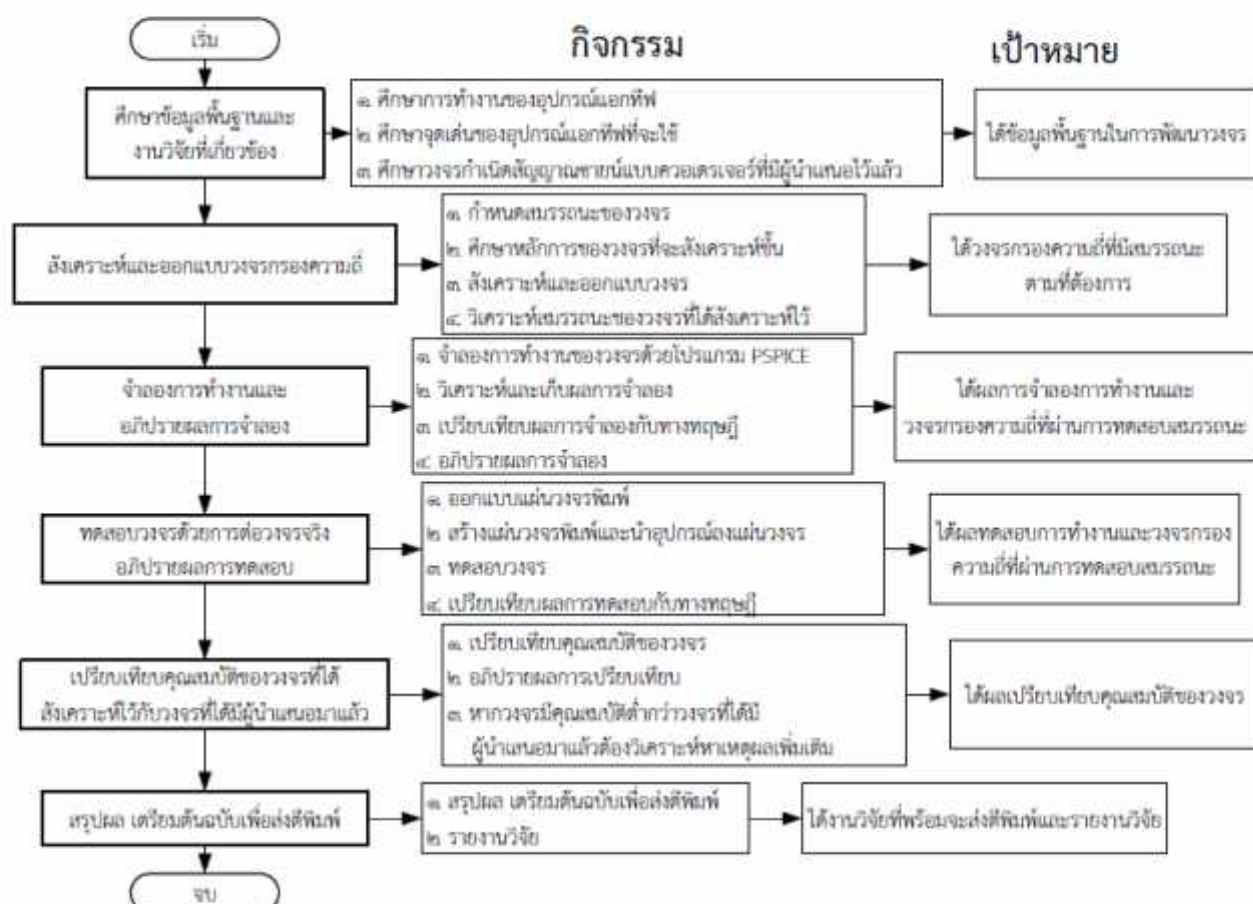
$$\frac{I_{BP}}{I_m} = -\frac{-s\frac{\alpha_{n1}\alpha_{n2}\beta_1\beta_4g_{m4}g_{m1}}{\beta_3g_{m3}C_1}}{s^2 + s\frac{\alpha_{n1}\alpha_{n2}\beta_1\beta_4g_{m1}g_{m4} + \alpha_{n1}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{\beta_3g_{m3}C_1} + \frac{\alpha_{n1}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (๑๖)$$

จากสมการ (๑๖) ค่าความถี่โพลและควอดรันตัมแฟกเตอร์

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\alpha_{n1}\beta_1\beta_2g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad , \quad (๑๗)$$

และ

$$Q_0 = \frac{\beta_3g_{m3}}{\alpha_{n2}\beta_4g_{m4}} \sqrt{\frac{\beta_3C_1g_{m2}}{\alpha_{n1}\beta_1C_2g_{m1}}}$$



ภาพที่ ๓.๓ ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

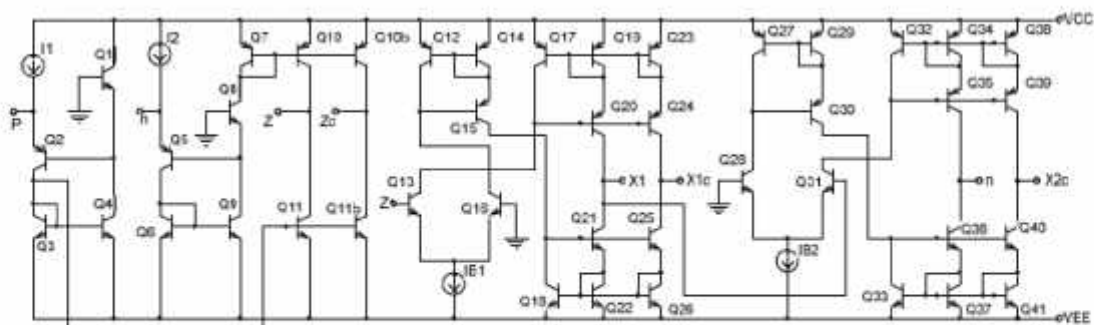
บทที่ ๔

ผลการวิจัย

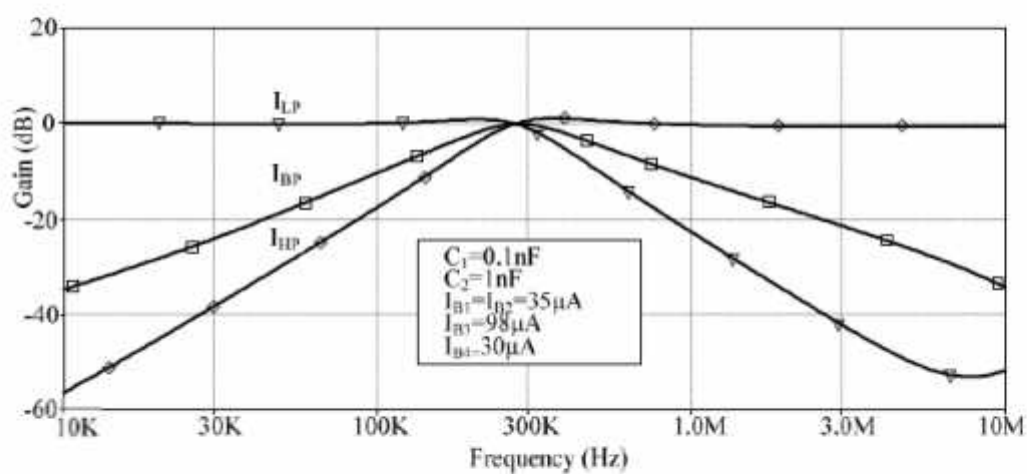
เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ ๓ จึงได้การทดลองต่อวงจรจริงและการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice มาช่วยทดสอบการทำงานของวงจรที่ได้วิเคราะห์ไว้ตามทฤษฎี สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร ได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR1000N และ NR1000N ตามลำดับซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T (Frey, ๑๙๙๓) กำหนดให้ DV-CCTA ทำงานที่แรงดัน $\pm 1.5\text{V}$ และมีโครงสร้างภายในดังภาพที่ ๔-๑

๔.๑. ผลการจำลองการทำงาน

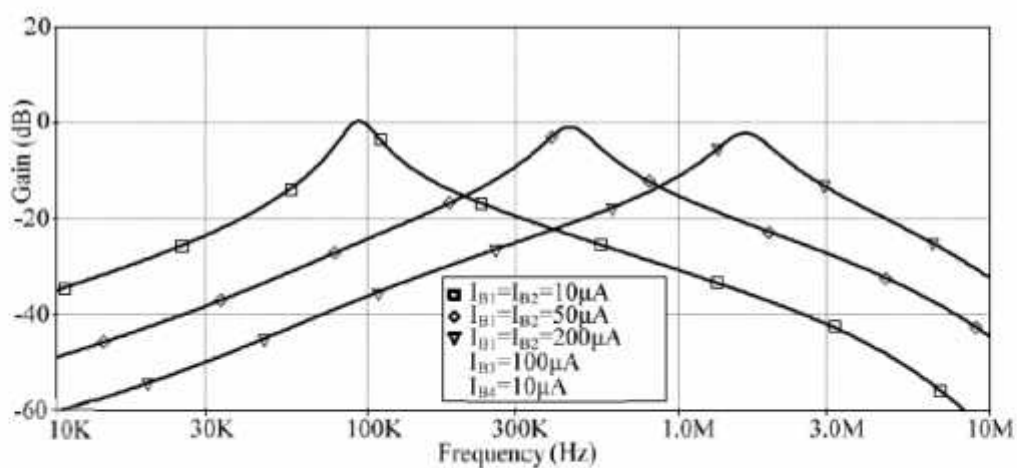
เพื่อเป็นการยืนยันและทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรผ่านโปรแกรม PSpice สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ ชนิด NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR1000N และ NR1000N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T [๓๗] CDCTA ที่จำลองการทำงานใช้โครงสร้างเทคโนโลยีไบโพลาร์ ดังแสดงในภาพที่ ๔.๑



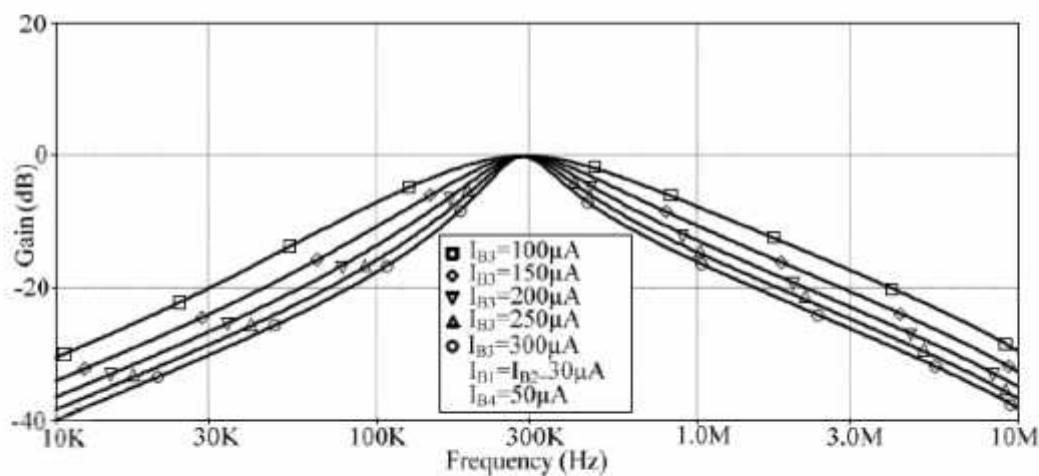
ภาพที่ ๔.๑ โครงสร้างภายในของวงจร CDCTA



ภาพที่ ๔๒ ผลตอบสนองความถี่ทางขนาดฟังก์ชันต่างๆ ของวงจรรองความถี่ที่นำเสนอ



ภาพที่ ๔๓ ผลตอบสนองความถี่ทางขนาดฟังก์ชันความถี่แถบผ่านเมื่อค่ากระแส $I_{B4} = I_{B1}$



ภาพที่ ๔๔ ผลตอบสนองความถี่แถบผ่านเมื่อปรับค่ากระแส I_{B3}

โดยกำหนดให้วงจรทำงานที่แรงดัน $\pm 1.5V$ ตัวเก็บประจุ $C_{11} = 0.1 nF$, $C_{12} = 10 nF$, $I_{B11} = I_{B12} = I_{B13} = 10 \mu A$ และ $I_{B14} = 5 \mu A$ การจำลองพบว่าความถี่ตัดอยู่ที่ $243.55 kHz$ แต่จากการคำนวณตามสมการที่ (๗) เท่ากับ $243.56 kHz$. ผลการจำลองแสดงดังภาพที่. ๔ ผลตอบสนองอัตรายาย biquad filter จากภาพที่ ๒ วงจรไบควอดมีผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งประกอบไปด้วย low-pass, high-pass และ band-pass โดยไม่ได้ปรับค่าใดๆ ของวงจรแสดงดังภาพที่ ๕ แสดงฟังก์ชันผลตอบสนองอัตรายาย band-pass, ที่ I_{B3} และ I_{B14} มีค่าเท่ากัน ด้วยวิธีการปรับค่ากระแสหลายค่า ความถี่โพล สามารถปรับค่าได้โดยอิสระจากควอลิตี้แฟกเตอร์ผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นไปตามสมการที่(๘). ภาพที่. ๖ แสดงผลตอบสนองอัตรายายของฟังก์ชัน band-pass สำหรับ ผลต่างค่ากระแส I_{B3} แสดงควอลิตี้แฟกเตอร์ สามารถปรับค่ากระแสไบอัสอินพุต I_{B3} ได้เป็นไปตามสมการที่(๑๐) โดยอิสระจากความถี่โพล

บทที่ ๕

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

๕.๑ บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์และออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์โหมตกระแสที่สามารถควบคุมอัตราขยายได้และวงจรประยุกต์ใช้งานโดยใช้ CDCTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักที่สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ จากผลการดำเนินการวิจัยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอเป็นวงจรกรองความถี่แบบหลายหน้าที่โหมตกระแสโดยใช้ CDCTAs ลักษณะเด่นของวงจรคือสามารถให้ฟังก์ชันถ่ายโอนได้สามฟังก์ชันนั่นคือ low-pass, high-pass และ band-pass ควอลิตี้แฟกเตอร์และความถี่โพล สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์และแยกอิสระจากกัน. โดยวงจรประกอบไปด้วย CDCTA จำนวน 2 ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 2 ตัว จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาให้อยู่ในลักษณะวงจรรวม อัตราบริโภคกำลังงานต่ำเท่ากับ 2.5 mW. ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าวงจรทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้

๕.๒ ข้อเสนอแนะ

๕.๒.๑ ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

๕.๒.๑.๑ ควรมีการสร้างวงจร CDCTA ขึ้นมาเพื่อทดสอบจริงจากทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ (Transistor array) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรที่ได้จากการจำลองด้วย PSpice

๕.๒.๑.๒ โครงภายในของ CDCTA ควรออกแบบด้วยวงจรพื้นฐานสธรณะสูง เช่น วงจรสะท้อนกระแส อาจใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสันหรือแบบคาสเคด เพื่อลดปัญหาด้านกระแสออฟเซตขาออกและอัตราการส่งผ่านกระแสจากขาเข้าไปยังขาออก

๕.๒.๒ ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

ควรมีนำวงจรอินทิเกรเตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นวงจรพื้นฐานในการสร้างวงจรอื่นๆ เช่น วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม

បរិច្ឆេទ

- C. Toumazou., F. J. Lidgley, and D. G. Haigh, Analogue IC design: the current-mode approach, London: Peter Peregrinus, ១៩៩៦.
- Y. Maruyama, A. Hyogo, and K. Sekine, "A digitally programmable CMOS biquad filter using current-mode integrators," IEICE trans. on fundamentals, vol. E៨៥-A, no. ២, pp. ៣៦៦-៣៧២, ២០០២.
- P. Prommee and K. Dejhan, "An Integrable electronic-controlled quadrature sinusoidal oscillator using CMOS operational transconductance amplifier," Int. J. Electronics, vol. ៩៤, ២០០៧, pp. ៣៦៥-៣៧៤.
- S. Minaei and O. Cicekolu, "New current-mode integrator, all-pass section and quadrature oscillator using only active elements". ២៣ IEEE Int. Conf. Circuits and Systems for Communications, vol. ២, pp. ៣៦-៣៧, ២០០២.
- C. L. Hou, H. C. Chien, and Y. K. Lo, "Squarewave generators employing OTRAs," Proc. IEE Circuits Devices Syst., vol. ១៥២, pp. ៣៦៥-៣៧២, ២០០៥.
- E. Yuce, S. Tokat, A. Kizilkaya and O. Cicekolu, "CCII-based PID controllers employing grounded passive components," Int. J. Electron. Commun. (AEU), ២០០៥.
- P. Venkateswaran, R. K. Nagaria, S. K. Sanyal, and R. Nandi, "Dual-input single-tunable integrators and differentiators using current feedback amplifier," Int. J. Elecs., vol. ១២, no. ២, pp. ១១១-១២៥, ២០០៣.
- E.S. Sinencio, R.L. Geiger and H.N. Lozano, "Generation of continuous time two integrator loop OTA filter structures," IEEE Trans. -Circuits and Syst., vol. ៣៥, no. ៤, pp. ៣៦៦-៣៧២, ១៩៨៨.
- S. Minaei, "Dual-input current-mode integrator and differentiator using single DVCC and grounded passive elements," IEEE MELECON ២០០៥, pp. ៣៣៣-៣៣៤, ២០០៥.
- T. Tsukutani, M. Higashimura, N. Takahashi, Y. Sumi, and Y. Fukui, "Versatile activeonly biquad circuits with loss-less and lossy integrators," Int. J. of Elecs, vol. ១២, no. ៤, pp. ៤៦៥-៤៧២, ២០០៥.
- S. Minaei, G. Topcu and O. Cicekolu, "Active only integrator and differentiator with tunable time constants," Int. J. of Elecs, vol. ១២, no. ៤, pp. ៤៦៦-៤៧២, ២០០៥.
- D. Biolk, R. Senani, V. Biolkova, Z. Kolka, "Active elements for analog signal processing: classification, review, and new proposals," Radioengineering, vol. ១៧, no. ៤, pp. ៣៥-៣៧, ២០០៨.