

2012-447 Electronics Engineering Laboratory

Module: วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น

Part A: วงจรกรองสัญญาณ

อาจารณ์ ธีรมงคลรัศมี (มีนาคม 2564, สิงหาคม 2565, สิงหาคม 2567)

อาจารณ์ ธีรมงคลรัศมี และ อภิวัฒน์ เล็กอุทัย (กรกฎาคม 2562)

บทนำ

การทดลองเกี่ยวกับวงจรขยายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (electrocardiogram amplifier: ECG amp) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนการกรองสัญญาณ ส่วนวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน และส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (***) การทดลองหัวข้อนี้ใช้เวลา 3 สัปดาห์ การทดลองในแต่ละสัปดาห์มีความเชื่อมโยงกัน ผลหรือขั้นงานที่ทำในแต่ละการทดลองจะถูกนำมาใช้ในการทดลองครั้งต่อไป****)

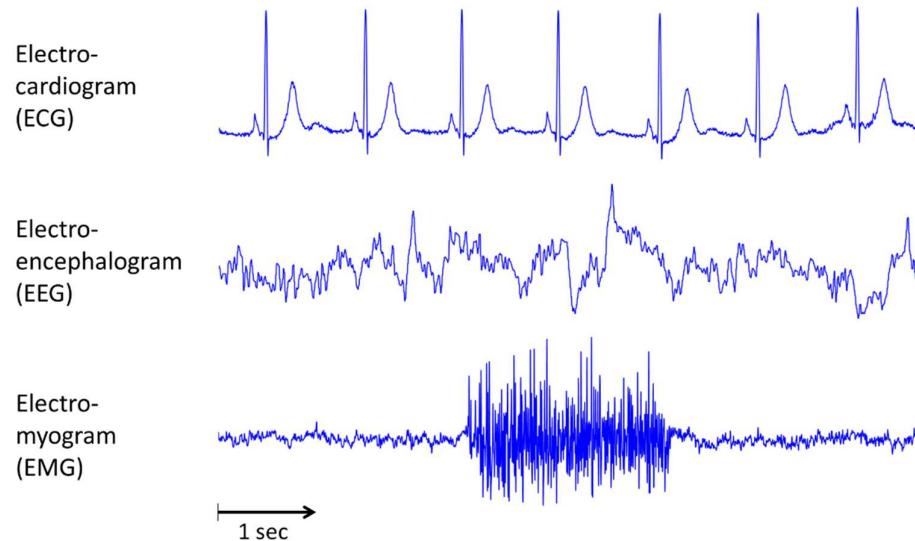
สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจเป็นสัญญาณศักย์ทางชีวภาพ (biopotential signal) ที่เกิดจากกล้ามเนื้อหัวใจสูบฉีดโลหิตไปยังส่วนต่างๆ ของร่างกาย อันที่จริงการทำงานในส่วนอื่นของร่างกาย ก่อให้เกิดสัญญาณหรือศักย์ทางไฟฟ้าได้เหมือนกัน เช่น คลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อเกิดจากการหดตัวหรือเกร็งมัดกล้ามเนื้อ คลื่นไฟฟ้าสมองเกิดจากการทำงานของสมอง เป็นต้น โดยที่ไปแล้วศักย์ทางชีวภาพรวมทั้งสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจจะมีขนาดที่เล็กมากในระดับมิลลิโวลต์หรือไมโครโวลต์ และมีแบบรูปที่อยู่ในช่วงความถี่จำเพาะแตกต่างกันตามชนิดของศักย์ทางชีวภาพ ดังนั้นในการวัดสัญญาณเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณ การกรองสัญญาณ (จำกัดช่วงความถี่ของการวัด) รวมทั้งการลดตอนสัญญาณรบกวน เพื่อให้คุณภาพของสัญญาณขาดจากภายนอกที่ได้มีคุณภาพสูงเพียงพอที่จะนำไปใช้ประยุกต์งานต่อไป เช่น การวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือ การใช้สัญญาณไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับผู้พิการ เป็นต้น

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับศักย์ทางชีวภาพ (Biopotential Signal)

คลื่นไฟฟ้าหัวใจ (ECG) คลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) และคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (EMG) เป็นสัญญาณทางสรีริวิทยาไฟฟ้าที่แพทย์นิยมใช้วินิจฉัยความผิดปกติของการทำงานในอวัยวะนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ยังมีอวัยวะอื่นอีกที่สามารถตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เช่น ลูกตา กระเพาะอาหาร ลำไส้ เส้นประสาท เป็นต้น สัญญาณดังกล่าวเรียกว่า สัญญาณศักย์ทางชีวภาพ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1

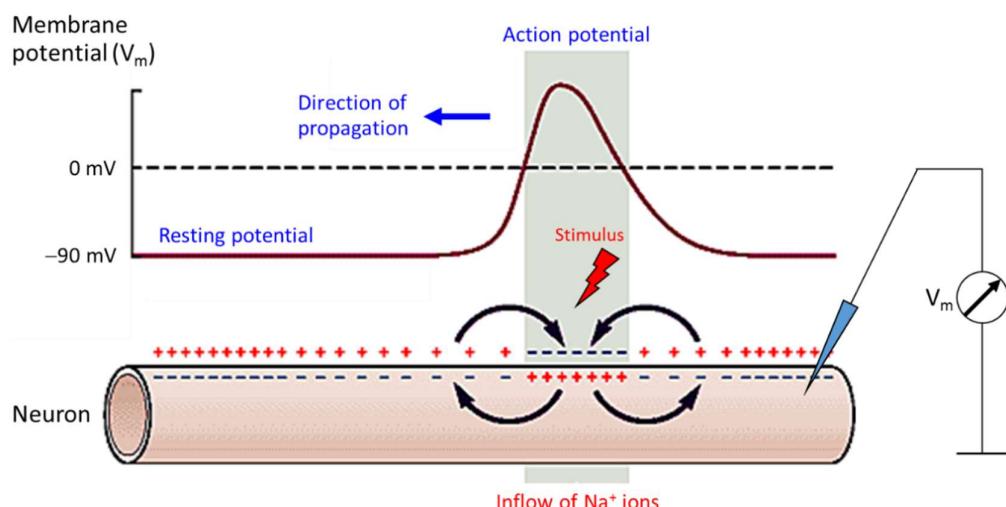
สัญญาณศักย์ทางชีวภาพเหล่านี้ ถึงแม้จะมีลักษณะของรูปคลื่น หรือมีแอมพลิจูดที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับการทำงานของอวัยวะนั้นๆ ล้วนแล้วแต่มีต้นกำเนิดคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นกิจกรรมทางไฟฟ้าในระดับเซลล์ ที่เกิดในเฉพาะเซลล์ที่ถูกเร้าหรือถูกกระตุ้นได้ (excitable cell) ได้แก่ เซลล์ประสาท เซลล์กล้ามเนื้อ รวมทั้ง เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ เป็นต้น กิจกรรมทางไฟฟ้านี้ มีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของไอออน (Na^+ , K^+) ภายใน

และภายนอกเซลล์ที่แตกต่างกัน ทำให้เกิด ศักย์เยื่อหุ้มเซลล์ (membrane potential) ที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยอิเล็กโตรดขนาดเล็ก



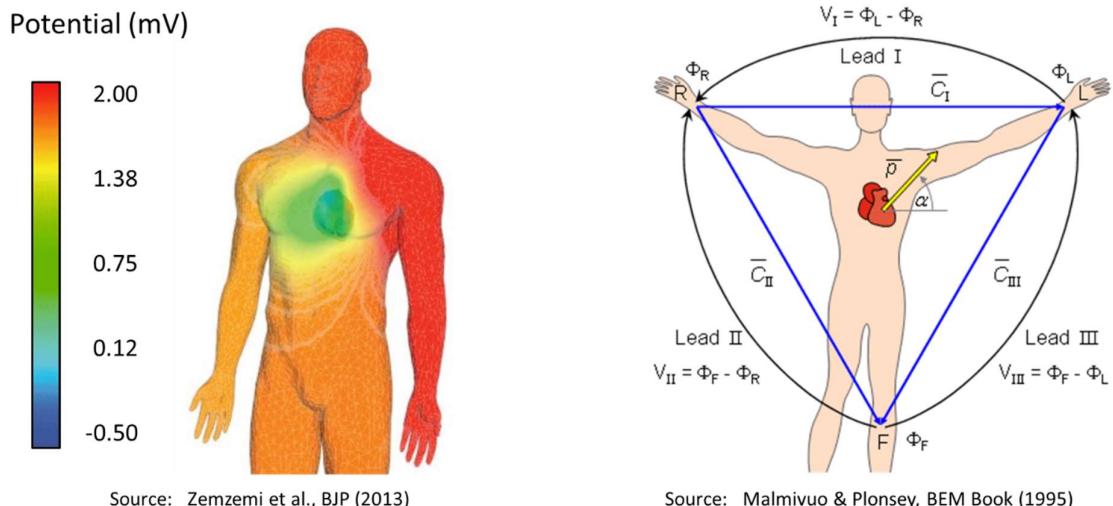
รูปที่ 1: ตัวอย่างสัญญาณศักย์ทางชีวภาพ (biopotential signal)

รูปที่ 2 แสดงถึงศักย์เยื่อหุ้มเซลล์ในขณะพัก (resting potential) ที่มีค่าประมาณ -60 ถึง -90 mV แต่เมื่อเซลล์ถูกกระตุ้น จะส่งผลให้ศักย์เยื่อหุ้มเซลล์กลับข้ามเป็นบวก เนื่องจาก Na^+ กรุเข้าไปในเซลล์พร้อมกัน โดยทันที เมื่อหุ้มเซลล์บริเวณดังกล่าวจึงเปลี่ยนเป็นภาวะถูกเร้า ทำให้เกิดสิ่งที่เรียกว่า ศักยะงาน (action potential) ซึ่งจะเห็นว่านำเยื่อหุ้มเซลล์ข้างๆ ให้เกิดการกลับข้ามจากลบเป็นบวกแบบนี้ต่อไปเรื่อยๆ หากเกิดในเซลล์ประสาท จะเป็นการส่งต่อของข้อมูลที่เรียกว่ากระแสประสาทนั่นเอง หรือหากเกิดในเซลล์กล้ามเนื้อ จะส่งผลให้กล้ามเนื้อบริเวณนั้นเกิดการหดตัวนั่นเอง



รูปที่ 2: กลไกการเกิดศักยะงาน (action potential) ในเซลล์ประสาท (neuron)

จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของไออุ่นบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ ที่เป็นที่มาของศักยะงานนี้ หากพิจารณาเปรียบเทียบในทางไฟฟ้าจึงคล้ายกับในร่างกายของเรามีดipoles (dipole) เล็กๆ จำนวนมหาศาลที่เกิดการกลับข้างมาอยู่ตลอดเวลา ได้โดยเหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายไปทั่วร่างกาย โดยรวมของสนามไฟฟ้า ณ จุดต่างๆ ของร่างกายนี้ เป็นที่มาของศักย์ไฟฟ้าบนผิวนังดังแสดงในรูปที่ 3 (ขวา) ดังนั้นสัญญาณศักย์ทางชีวภาพที่ตรวจวัดได้นั้น จึงเป็นการวัดความศักย์ระหว่างจุด 2 จุดบนผิวนังของเรานั่นเอง



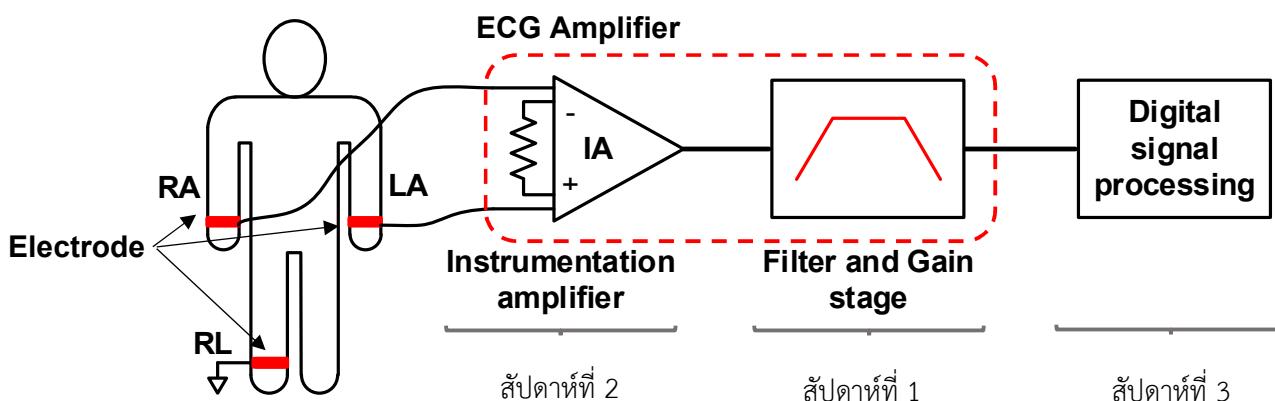
รูปที่ 3: (ขวา) รูปจำลองการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบนผิวนัง ณ เวลาหนึ่ง โดยมีหัวใจเป็นแหล่งกำเนิด (ขวา) จุดมาตรฐานในการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แบบ Lead I, Lead II และ Lead III

ดังนั้นหากเราต้องการวัดสัญญาณศักย์ทางชีวภาพระหว่าง 2 จุดบนร่างกาย ตำแหน่งที่นำขึ้นอิเล็ก trode ไปติดนั้นจำเป็นต้อง “คร่อมแหล่งกำเนิด” ที่เป็นต้นตอของสัญญาณไฟฟ้านั้นๆ ด้วย เช่น การวัด ECG จำเป็นต้องคร่อมหัวใจ ดังแสดงในรูปที่ 3 (ขวา) เป็นต้น ในทางทฤษฎีแล้วเราสามารถเลือกวัดความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดใดๆ ก็ได้ ซึ่งจะได้สัญญาณที่มีรูปคลื่นแตกต่างกันไป แต่เพื่อให้เกิดมาตรฐานในการวินิจฉัยทางการแพทย์ และให้สัญญาณนั้นสามารถวัดซ้ำและนำไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของคนปกติทั่วไปได้ ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องกำหนดจุดมาตรฐานขึ้น เช่น การวัด ECG จะมีจุดมาตรฐาน 10 จุด ซึ่งประกอบด้วยจุดที่แขน-ขา-ซ้าย-ขวาทั้งหมด 4 จุด (RA, LA, RL, LL) และบริเวณหน้าอกด้านซ้ายอีก 6 จุด (V1-V6) หรือ การวัด EEG จะมีจุดมาตรฐานบนกะโหลกศีรษะอยู่ 21 จุดตามระบบที่เรียกว่า ระบบ 10-20 เป็นต้น

ภาพรวมของระบบวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

รูปที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมหลักของการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ใช้ในการทดลอง เราช่วยดัดแปลง เรายังวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจผ่านอิเล็กโทรดที่ติดอยู่ที่แขนซ้าย (LA) แขนขวา (RA) และ ขาขวา (RL) โดยที่วงจรจะวัดผลต่างของศักย์ไฟฟาระหว่างแขนซ้ายและแขนขวา โดยมีขาขวาต่ออยู่กับขั้วร่วม (common) หรือกราวด์ของวงจร ในการทดลองนี้มีส่วนประกอบหลัก คือ วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และ ส่วนของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

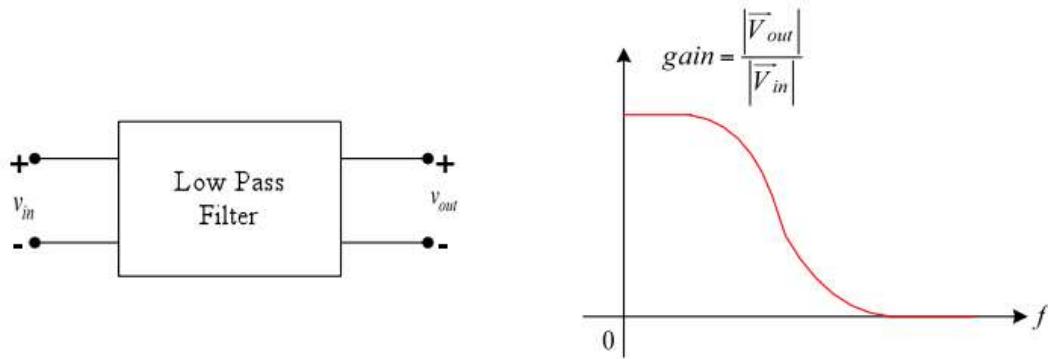
ส่วนที่อยู่ในกรอบเส้นประ คือ วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักของ 2 ส่วน คือ วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ชัน ทำหน้าที่ขยายสัญญาณผลต่างระหว่างแขนซ้ายและแขนขวา และ ส่วนของการกรองและขยาย ทำหน้าที่กำหนดค่าอัตราขยายโดยรวมและแบบดีดตัวของการวัด โดยสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยทั่วไป จะมีขนาด 0.5–4 mV และมีสเปกตรัมของสัญญาณอยู่ในช่วง 0.01–250 Hz [1] ส่วนของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ในที่นี้ใช้เพื่อลดthonสัญญาณรบกวนที่เกิดแหล่งจ่ายกำลัง 50 Hz



รูปที่ 4: บล็อกไดอะแกรมหลักของการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ โดยแสดงลำดับของการทดลองในแต่ละสัปดาห์

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรกรอง

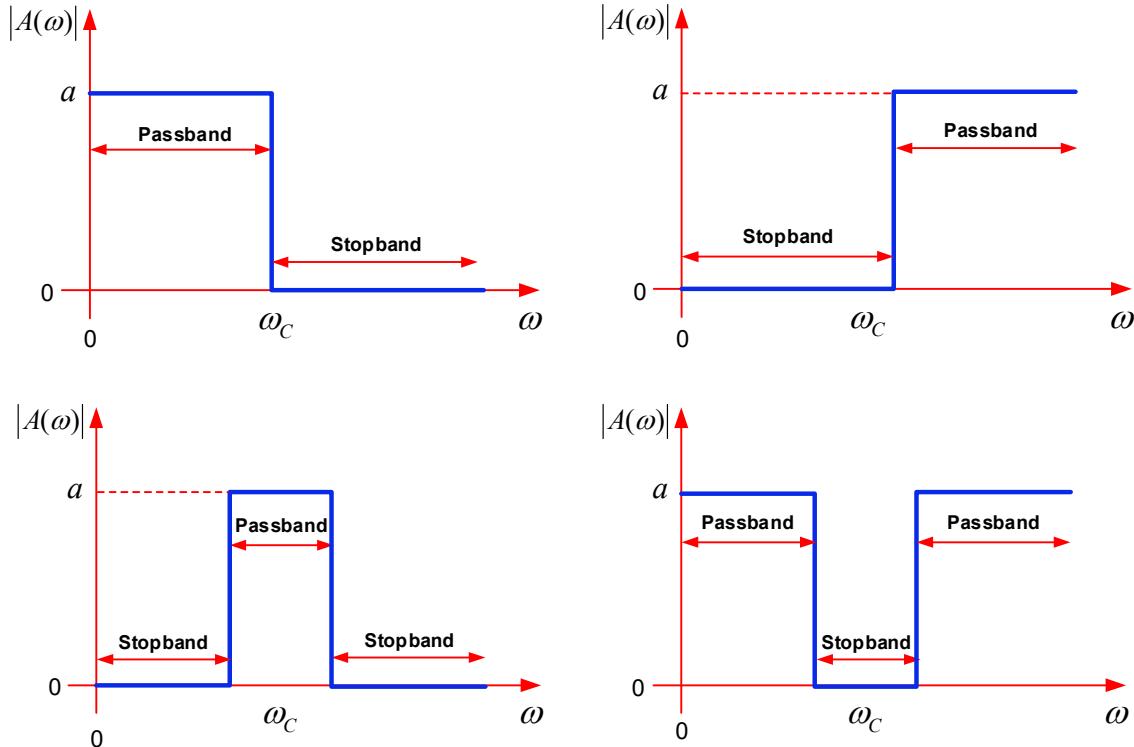
วงจรกรองเป็นวงจรซึ่งยอมให้สัญญาณในช่วงความถี่ค่าหนึ่งผ่านจากขาเข้าไปยังขาออกได้ ในขณะเดียวกัน วงจรกรองจะลดthonหรือป้องกันสัญญาณในช่วงความถี่อื่นไม่ให้ผ่านไปยังขาออกของวงจร ดังนั้นค่าอัตราส่วนของขนาดแรงดันขาออกต่อแรงดันขาเข้า ($|V_{out} / V_{in}|$) หรือ โดยทั่วไปจะใช้คำว่า อัตราขยาย (gain) มีลักษณะที่ขึ้นกับความถี่ รูปที่ 5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองผ่านตัว และ ผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราขยายมีค่าสูงในช่วงความถี่ต่ำ และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น อัตราขยายจะมีค่าลดลง นอกจากอัตราขยายที่ขึ้นกับความถี่แล้ว ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้ายังมีลักษณะที่ขึ้นกับความถี่อีกด้วย



รูปที่ 5: บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองผ่านต่ำและผลตอบสนองเชิงความถี่

วงจรกรองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วงจรกรองแบบไม่ไฟงาน (passive filter) และ วงจรกรองแบบไฟงาน (active filter) วงจรกรองแบบไม่ไฟงานจะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวน้ำ และ ตัวเก็บประจุ มาต่อร่วมกัน วงจรกรองแบบไฟงาน นอกจากตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวน้ำ และตัวเก็บประจุแล้ว ยัง มีอุปกรณ์ไฟงาน เช่น ทรานซิสเตอร์ หรือ ออปแอมป์ เป็นต้น ต่อเป็นวงจรขยายร่วมอยู่ด้วย วงจรกรองแบบไม่ไฟงานสามารถใช้งานได้กับความถี่ในช่วงกว้าง ตั้งแต่ย่านความถี่ต่ำไปจนถึงย่านความถี่สูง แต่โดยทั่วไปแล้ว วงจรกรองแบบไม่ไฟงานเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการกำลังงานสูงหรืองานในช่วงความถี่สูง แต่ ในช่วงความถี่ต่ำ การใช้งานวงจรกรองแบบไม่ไฟงานอาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากข้อจำกัดของตัวเหนี่ยวน้ำ ในทางปฏิบัติ ที่ความถี่ต่ำเมื่อต้องการค่าความเหนี่ยวน้ำสูงจะทำให้ตัวเหนี่ยวน้ำที่ใช้มีขนาดใหญ่มาก ดังนั้น ในช่วงความถี่ที่ไม่สูงมากนัก เราจึงนิยมใช้วงจรกรองแบบไฟงานโดยถูกออกแบบให้ใช้งานในช่วงความถี่เฉพาะ

วงจรกรองมี 4 รูปแบบที่สำคัญ คือ วงจรกรองผ่านต่ำ (low pass filter) วงจรกรองผ่านสูง (high pass filter) วงจรกรองผ่านแคบ (band pass filter) และวงจรกรองหยุดแคบ (band stop filter) รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ในทางอุตสาหกรรมของวงจรกรองทั้ง 4 รูปแบบ วงจรกรองแต่ละรูปแบบจะ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ pass band ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณเข้าผ่านไปยังขาออก โดยไม่มีการลดthon และไม่มีความเพี้ยน (มีเฟสเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับความถี่ในช่วงนี้) และ stop band ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ยอมสัญญาณเข้าผ่านไปยังขาออกเลย ตัวอย่างเช่น วงจรกรองผ่านต่ำในทาง อุตสาหกรรมมีช่วง pass band ตั้งแต่ความถี่ศูนย์ไปจนถึงความถี่ตัดผ่าน (cut-off frequency, \$\omega_c\$) และมีช่วง stop band ตั้งแต่ความถี่ตัดผ่านไปจนถึงความถี่อนันต์ การเปลี่ยนแปลงจากช่วง pass band ไปยังช่วง stop band สามารถเป็นแบบทันทีทันใด ค่าอัตราขยายของช่วง pass band สามารถกำหนดได้ ส่วนอัตราขยายของ ช่วง stop band มีค่าเป็นศูนย์ (ส่วนรูปแบบของวงจรกรองชนิดอื่น นิสิตสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ จากแหล่งข้อมูลอื่น)



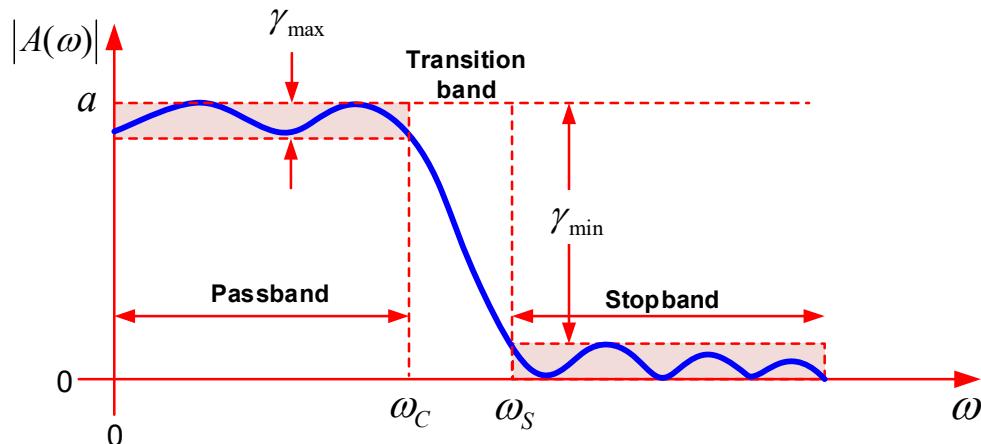
รูปที่ 6: รูปแบบของผลตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติของตัวกรองผ่านตัว (ซ้ายบน) ผ่านสูง (ขวาบน)
ผ่านแคบ (ซ้ายล่าง) และหยุดแคบ (ขวาล่าง)

ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถสร้างวงจรกรองให้มีผลตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติที่กล่าวมาแล้วข้างต้นได้ ยกตัวอย่างเช่น เราไม่สามารถสร้างวงจรกรองที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจากช่วง pass band ไปยังช่วง stop band หรือกลับกัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีการกำหนดแอบความถี่ในการเปลี่ยนผ่าน (transition band) จากช่วง pass band ไปยังช่วง stop band หรือมีการกำหนดอัตราขยายในช่วง stop band ที่มีค่าเล็กได้ แต่ไม่สามารถเป็นศูนย์ได้ เป็นต้น เพื่อให้การออกแบบกรองสามารถใช้งานได้และไม่ซับซ้อนจนเกินไป ในทางปฏิบัติจึงนิยมออกแบบวงจรกรองผ่านตัว ให้มีรูปแบบของผลตอบสนองเชิงความถี่ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งมีคุณลักษณะที่ถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ในช่วง pass band อัตราขยายไม่จำเป็นต้องมีค่าคงที่ แต่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงได้บ้าง การเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด คือ γ_{\max}

การลดทอนสัญญาณจากช่วง pass band ไปยังช่วง stop band มีค่าอย่างน้อยเป็น γ_{\min}
ช่วงความถี่ของการเปลี่ยนผ่านจาก pass band ไปยัง stop band ถูกกำหนดด้วยค่าความถี่ตัดผ่าน ω_c และค่าความถี่ขอบ (stop band edge: ω_s) อัตราส่วนระหว่าง ω_c / ω_s เราเรียกว่า ค่า selectivity ซึ่งแสดงความคมของการกรอง หรือบอกถึงความกว้างของช่วงเปลี่ยนผ่านได้

ในการออกแบบ ถ้าพารามิเตอร์ γ_{\max} มีค่าน้อย γ_{\min} มีค่ามาก และ ω_c / ω_s มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง จะทำให้การกรองสัญญาณใกล้เคียงกับทางอุดมคติ แต่ว่าจะต้องออกแบบจะมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นการออกแบบจะจึงกรองที่ดีในทางปฏิบัติต้องมีความสมดุลระหว่างเงื่อนไขของการออกแบบและความซับซ้อนของวงจร



รูปที่ 7: รูปแบบของผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองผ่านต่อในทางปฏิบัติ และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบตัวกรองสัญญาณ มีหลายแบบที่นิยมนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ตัวอย่างของการออกแบบตัวกรองนี้ มีหลายชนิดได้แก่

ตัวกรองสัญญาณแบบ Butterworth มีคุณลักษณะเด่นคือ จะมีช่วง pass band ที่เรียบที่สุด และไม่มีการแกว่ง (ripple) ทั้งในช่วง pass band และ stop band

ตัวกรองสัญญาณแบบ Chebyshev มีคุณลักษณะเด่นคือ จะมีการแกว่งในช่วง pass band แต่มีช่วง transition band ที่แแคบกว่าแบบ Butterworth

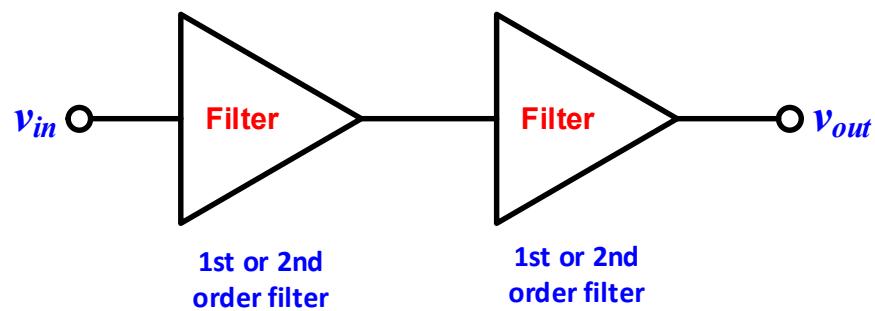
ตัวกรองสัญญาณแบบ Elliptic มีคุณลักษณะเด่นคือ มีช่วง transition band ที่แคบที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกรองสัญญาณทั้งสองแบบ แต่มีการแกว่งทั้งในช่วง pass band และ stop band

เนื่องจากข้อจำกัดของเนื้อที่ รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบกรองสัญญาณเหล่านี้ นิสิตสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารหรือเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 1 Normalized Butterworth polynomials ($\omega_c = 1$ rad/s) or $s = j\omega/\omega_c$

Order n	Characteristic Equations
1	$s + 1$
2	$s^2 + \sqrt{2}s + 1$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$
5	$(s + 1)(s^2 + 0.6180s + 1)(s^2 + 1.6180s + 1)$

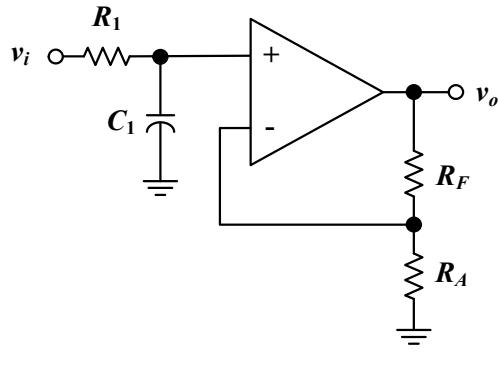
จากตารางที่ 1 เราสามารถสร้างวงจรกรองอันดับสูงจากการต่อวงจรกรองอันดับหนึ่งและอันดับสองอยู่ก្នມ



ตัวอย่างวงจรกรองไฟงานอันดับหนึ่งและอันดับสอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างวงจรกรองแบบไฟงานอันดับที่ 1 และ 2 ที่สามารถนำมาใช้ได้ในทางปฏิบัติ สำหรับวงจรกรองแบบไฟงานอันดับที่สูงกว่า สามารถนำวงจรกรองอันดับที่ 1 และ 2 มาต่ออนุกรมกับวงจรกรอง อีกด้วย เช่น วงจรกรองอันดับที่ 3 สามารถสร้างจากวงจรกรองอันดับที่ 1 มาต่ออนุกรมกับวงจรกรองอันดับที่ 2 เป็นต้น สำหรับวงจรกรองอันดับที่สูงกว่านี้ สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน ข้อดีของการใช้งานกรองแบบไฟงาน คือ เราสามารถนำวงจรกรอง 2 วงจรมาเชื่อมต่อกันได้โดยตรง โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลของการโหลด (loading effect) ในวงจรกรองภาคตัดไป

วงจรกรองผ่านตัวอันดับหนึ่งที่มีอัตราขยายเท่ากับ $\left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$



ผลตอบสนองเชิงความถี่

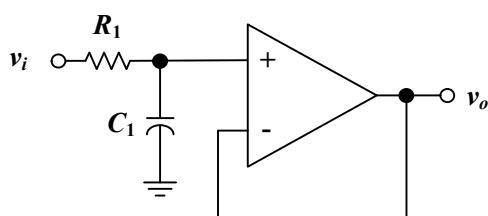
$$A_{LF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{1}{1 + j(\omega / \omega_C)}$$

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$

ความถี่ตัดผ่าน

$$\omega_C = \frac{1}{R_1 C_1}$$

วงจรกรองผ่านตัวอันดับหนึ่งที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่

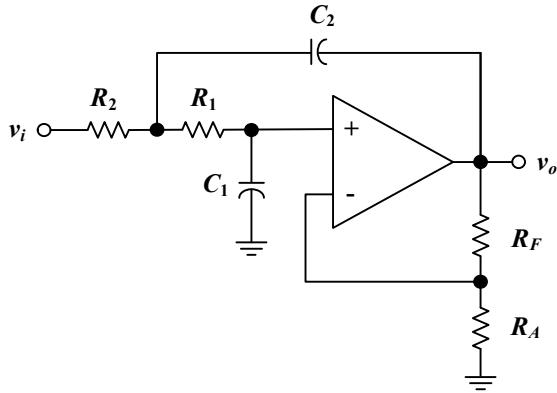
$$A_{LF}(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega / \omega_C)}$$

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = 1$

ความถี่ตัดผ่าน

$$\omega_C = \frac{1}{R_1 C_1}$$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ $\left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$



ผลตอบสนองเชิงความถี่

$$A_{LF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{1}{1 + j\omega((R_1 + R_2)C_1 - \frac{R_F}{R_A}R_2C_2) + (j\omega)^2(R_1C_1R_2C_2)}$$

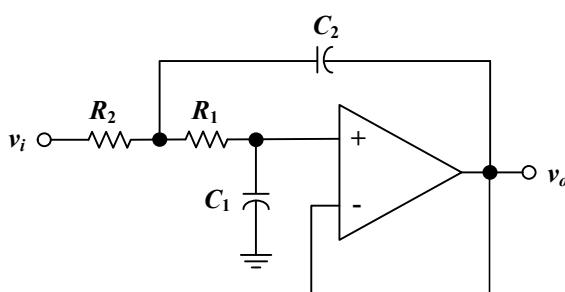
อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$

ความถี่ตัดผ่าน $\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$

ตัวประกอบคุณภาพ

$$\frac{1}{Q} = 2\zeta = \omega_C \left[(R_1 + R_2)C_1 - \frac{R_F}{R_A}R_2C_2 \right]$$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่

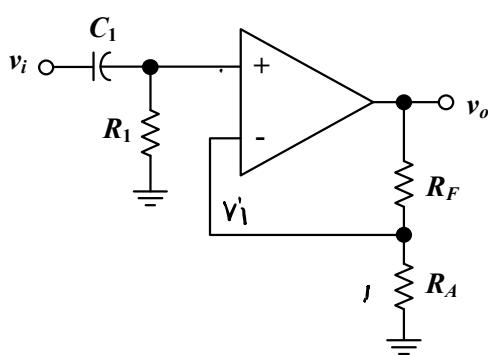
$$A_{LF}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega(R_1 + R_2)C_1 + (j\omega)^2(R_1C_1R_2C_2)}$$

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = 1$

ความถี่ตัดผ่าน $\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$

ตัวประกอบคุณภาพ $\frac{1}{Q} = 2\zeta = \omega_C [(R_1 + R_2)C_1]$

วงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่งที่มีอัตราขยายเท่ากับ $\left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$



ผลตอบสนองเชิงความถี่

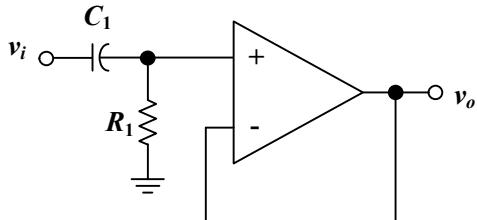
$$A_{HF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{j(\omega / \omega_C)}{1 + j(\omega / \omega_C)}$$

อัตราขยายที่ความถี่สูง $A(\infty) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$

ความถี่ตัดผ่าน

$$\omega_C = \frac{1}{R_1C_1}$$

วงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่งที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่

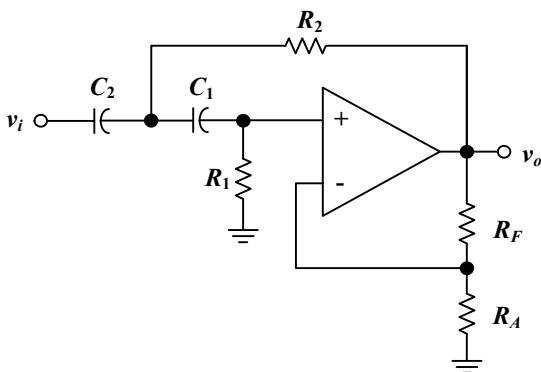
$$A_{HF}(j\omega) = \frac{j(\omega / \omega_C)}{1 + j(\omega / \omega_C)}$$

อัตราขยายที่ความถี่สูง $A(\infty) = 1$

ความถี่ตัดผ่าน

$$\omega_C = \frac{1}{R_1 C_1}$$

วงจรกรองผ่านสูงอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ $\left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$



ผลตอบสนองเชิงความถี่

$$A_{HF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{(j\omega)^2 (R_1 C_1 R_2 C_2)}{1 + j\omega \left(R_2(C_1 + C_2) - \frac{R_F}{R_A} R_1 C_1\right) + (j\omega)^2 (R_1 C_1 R_2 C_2)}$$

อัตราขยายที่ความถี่สูง $A(\infty) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$

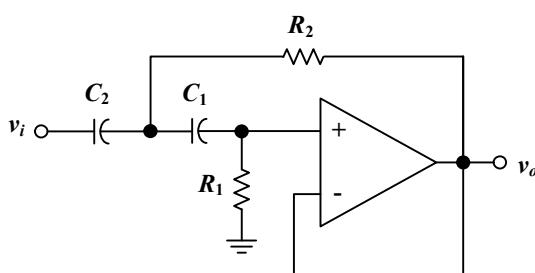
ความถี่ตัดผ่าน

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

ตัวประกอบคุณภาพ

$$\frac{1}{Q} = 2\zeta = \omega_C \left[R_2(C_1 + C_2) - \frac{R_F}{R_A} R_1 C_1 \right]$$

วงจรกรองผ่านสูงอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่

$$A_{HF}(j\omega) = \frac{(j\omega)^2 (R_1 C_1 R_2 C_2)}{1 + j\omega R_2(C_1 + C_2) + (j\omega)^2 (R_1 C_1 R_2 C_2)}$$

อัตราขยายที่ความถี่สูง $A(\infty) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$

ความถี่ตัดผ่าน

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

ตัวประกอบคุณภาพ

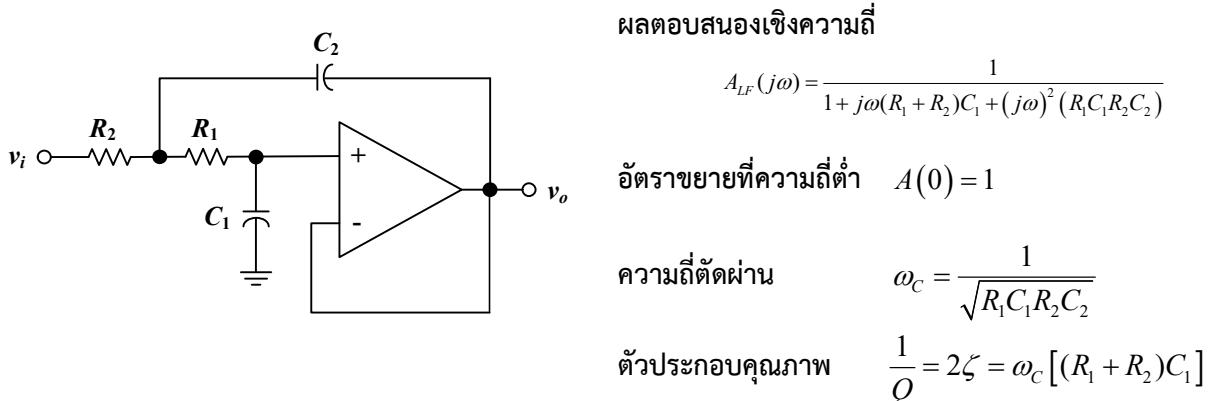
$$\frac{1}{Q} = 2\zeta = \omega_C [R_2(C_1 + C_2)]$$

ตัวอย่างการออกแบบ

ตัวอย่างที่ 1 จะออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำ Butterworth อันดับสี่ ที่มีอัตราขยาย เท่ากับ 1 และมีความถี่ตัดผ่านที่ 1 kHz วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสี่ สามารถสร้างจากวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสอง 2 วงจรมาต่ออนุกรมซึ่งแต่ละวงจรมีความถี่ตัดผ่านที่

$$\omega_C = 2\pi f_{3dB} = 6.2832 \text{ krad/s}$$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



จากตารางที่ 1 Normalized Butterworth polynomial อันดับสี่

$$(s^2 + 2\zeta_1 s + 1)(s^2 + 2\zeta_2 s + 1) = (s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$$

ดังนั้น วงจรกรองผ่านต่ำมี $\zeta_1 = 0.3827$ และ $\zeta_2 = 0.9239$ สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับ
ดังนั้นเราจะได้ สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 และตัวที่ 2

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} = 6.2832 \text{ krad/s}$$

$$2\zeta = \omega_C [(R_1 + R_2)C_1] \text{ ทำให้ได้ } \zeta = \frac{1}{2}\omega_C(R_1 + R_2)C_1 = 3.1416 \times 10^3 (R_1 + R_2)C_1$$

สำหรับวงจรกรองอันดับสอง วงจรที่ 1 $\zeta_1 = 0.3827$

เนื่องจากมีสองเงื่อนไขของ ω_C และ ζ แต่มี 4 ตัวแปรของ R_1, R_2, C_1 , และ C_2 ทำให้เรามีอิสระ 2 ตัวแปร ในที่นี้ เลือก $C_1 = 0.01 \mu\text{F}$ ทำให้เงื่อนไขดังนี้

$$R_1 + R_2 = 12.182 \text{ k}\Omega \text{ และ } R_1 R_2 C_2 = 2.5330$$

ขั้นต่อไป คือ การเลือกค่า C_2 ต้องทำให้ได้ค่า R_1 และ R_2 และมีค่าเป็นจำนวนจริงบวกและเหมาะสมในการต่อวงจร อาจจะต้องมีการลองผิดลองถูกดู

เลือก $C_2 = 0.082 \mu\text{F}$ ทำให้ได้ค่า $R_1 R_2 = 30.89 \times 10^6$

$$\text{ทำให้ได้ค่า } R_1 = 8.582 \approx 8.56 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 3.599 \approx 3.61 \text{ k}\Omega$$

หมายเหตุ การเลือกค่า C_2 ที่เหมาะสม ในกรณีข้างบน จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข $R_1R_2 < \frac{1}{4}(R_1+R_2)^2$

สำหรับวงจรกรองอันดับสอง วงจรที่ 2 $\zeta_2 = 0.9239$

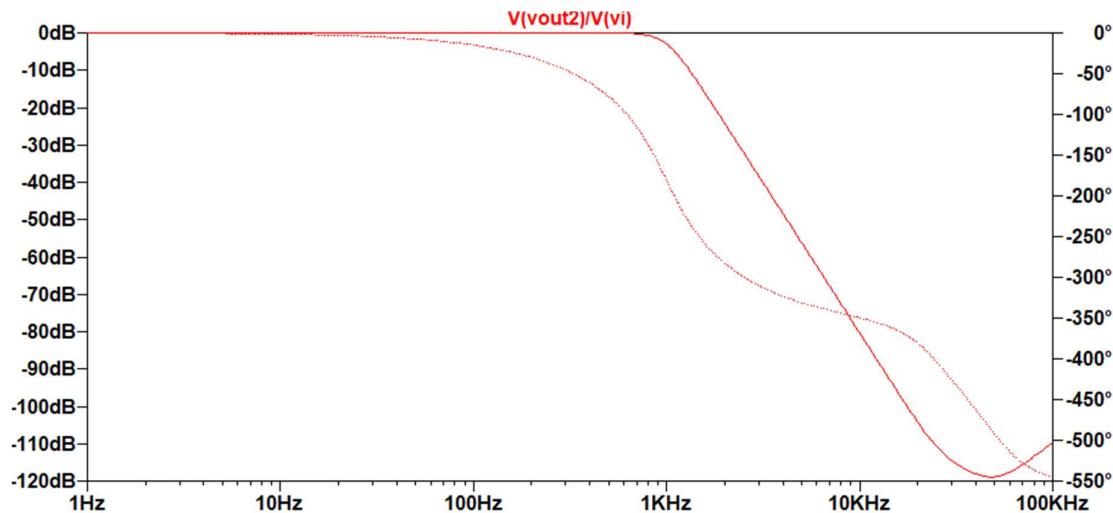
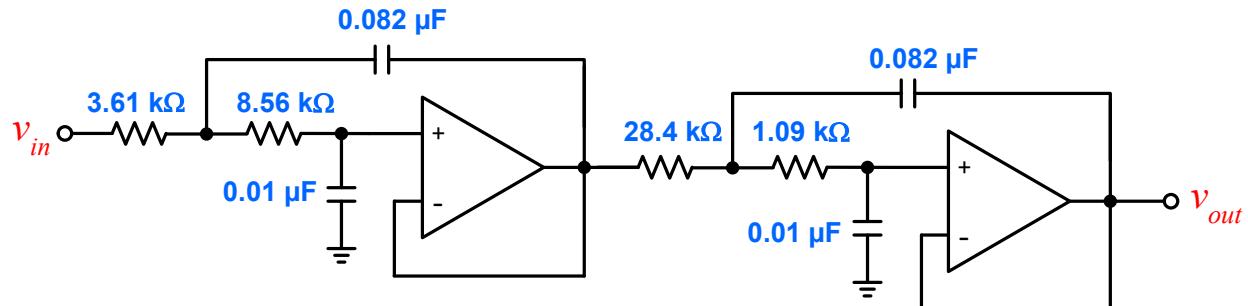
ด้วยขั้นตอนเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

$$\text{เลือก } C_1 = 0.01 \mu\text{F} \text{ ทำให้ได้ } R_1 + R_2 = 29.409 \text{ k}\Omega \text{ และ } R_1R_2C_2 = 2.5330$$

$$\text{เลือก } C_2 = 0.082 \mu\text{F} \text{ ทำให้ได้ } R_1R_2 = 30.89 \times 10^6$$

$$\text{ทำให้ได้ค่า } R_1 = 1.091 \approx 1.09 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 28.318 \approx 28.4 \text{ k}\Omega$$

ดังนั้นวงจรกรองอันดับสี่ที่ได้จะเกิดจากวงจรกรองอันดับสอง 2 วงจรมาต่ออนุกรมกัน ลำดับของการต่อไม่มีความสำคัญสามารถสลับตำแหน่งกันได้

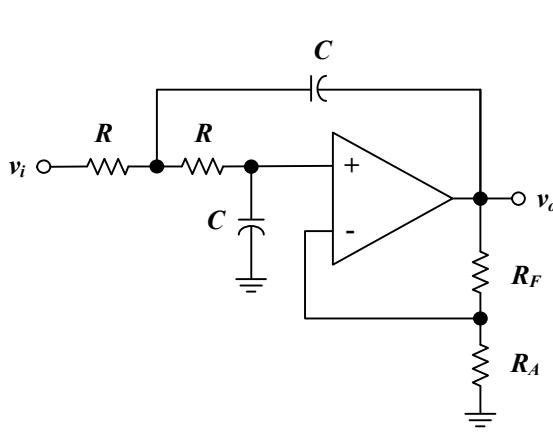


ผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านตัวอันดับสี่ ด้วย LTspice

ตัวอย่างการออกแบบ

ตัวอย่างที่ 2 จะออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำ Butterworth อันดับสี่ และมีความถี่ตัดผ่านที่ 1 kHz แต่กำหนดให้ใช้ค่า $R_1 = R_2 = R$ และ $C_1 = C_2 = C$ ซึ่งจะทำให้วงจรกรองอันดับสองมีความสัมพันธ์ดังนี้

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ $\left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$ และค่า $R_1 = R_2 = R$ และ $C_1 = C_2 = C$



ผลตอบสนองเชิงความถี่

$$A_{LF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{1}{1 + j\omega RC \left(2 - \frac{R_F}{R_A}\right) + (j\omega)^2 (RC)^2}$$

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$

ความถี่ตัดผ่าน $\omega_C = \frac{1}{RC}$

ตัวประกอบคุณภาพ $\frac{1}{Q} = 2\zeta = 2 - \frac{R_F}{R_A}$

การกำหนดในลักษณะนี้ทำให้การคำนวณของ ω_C และ ζ ของวงจรกรองเป็นอิสระต่อกัน

จากตารางที่ 1 Normalized Butterworth polynomial อันดับสี่

$$(s^2 + 2\zeta_1 s + 1)(s^2 + 2\zeta_2 s + 1) = (s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.87478s + 1)$$

ดังนั้น วงจรกรองผ่านต่ำมี $\zeta_1 = 0.3827$ และ $\zeta_2 = 0.9239$ สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับ
ดังนั้นเราจะได้ สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 และตัวที่ 2

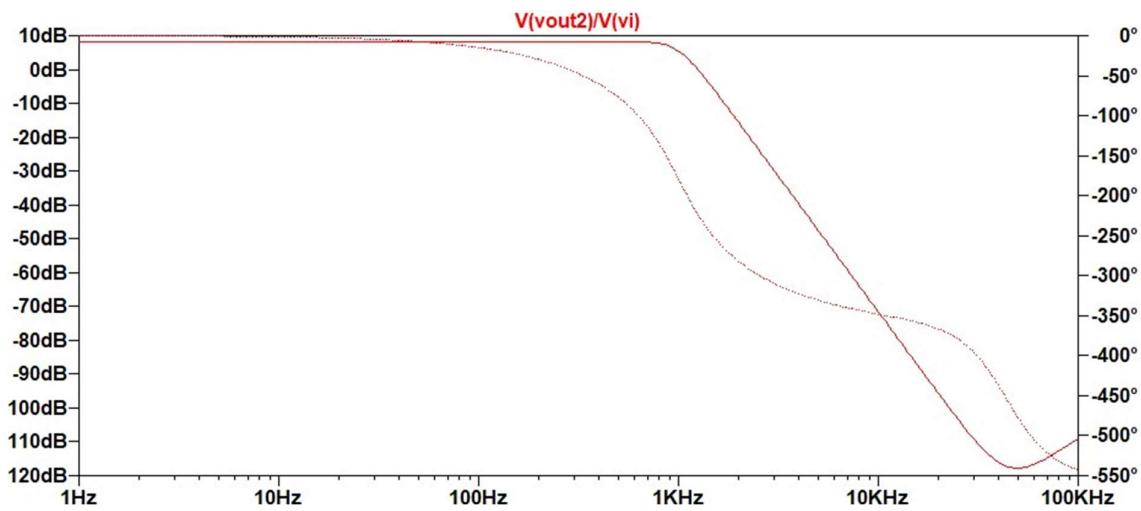
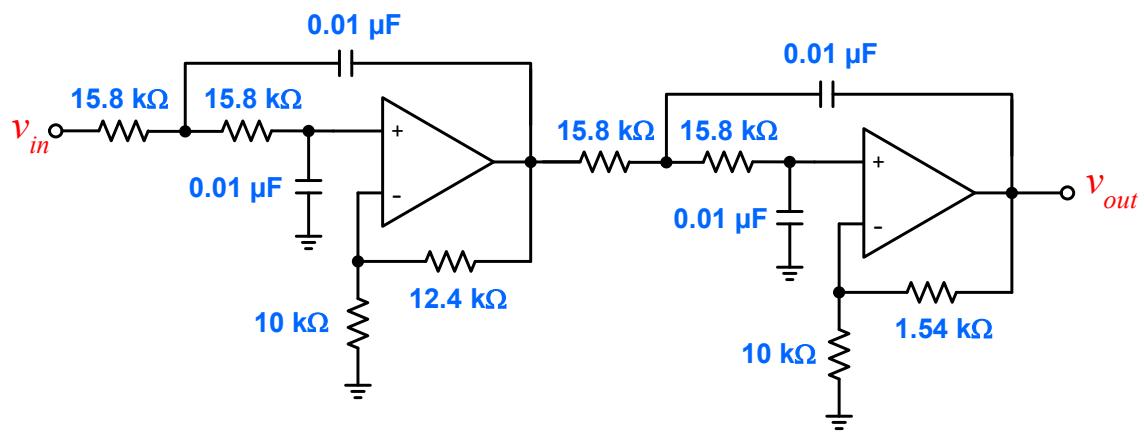
$$\omega_C = \frac{1}{RC} = 6.2832 \text{ krad/s} \text{ และ } 2\zeta = 2 - \frac{R_F}{R_A}$$

ในที่นี้ เลือก $C = 0.01 \mu\text{F}$ ทำให้เราได้ $R = 15.92 \text{ k}\Omega \approx 15.8 \text{ k}\Omega$

สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 $\zeta_1 = 0.3827$ เราจะได้ $\frac{R_F}{R_A} = 1.2346$ เลือก $R_A = 10 \text{ k}\Omega$ จะได้ $R_F = 12.4 \text{ k}\Omega$

สำหรับวงจรกรองตัวที่ 2 $\zeta_2 = 0.9239$ เราจะได้ $\frac{R_F}{R_A} = 0.1522$ เลือก $R_A = 10 \text{ k}\Omega$ จะได้ $R_F = 1.54 \text{ k}\Omega$

ดังนั้นวงจรกรองอันดับสี่ที่ได้จะเกิดจากการกรองอันดับสอง 2 วงจรมาต่ออนุกรมกัน ลำดับของการต่อไม่มีความสำคัญสามารถสลับตำแหน่งกันได้



ผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสี่ ด้วย LTspice

การทดลอง

คุณสมบัติจำเพาะ (specification) ของวงจรขยายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

คุณสมบัติจำเพาะของวงจรขยายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจเพื่อใช้ในการทดลองของโมดูลนี้ ได้แก่

- แหล่งจ่ายไฟของวงจร $\pm 9 \text{ V}$
- อัตราขยาย $300\text{--}1,000$ เท่า
- แบนด์วิดท์ $0.5\text{--}100 \text{ Hz}$
- Input impedance $> 1 \text{ M}\Omega$
- Common mode rejection ratio (A_{dm}/A_{cm}) ไม่ต่ำกว่า 60 dB

ให้นิสิตออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านแอบ ที่มีอัตราขยาย $50\text{--}120$ เท่า แบนด์วิดท์ $0.5\text{--}100 \text{ Hz}$ โดยกำหนดให้วงจรกรองผ่านแอบประกอบด้วย

- 1) วงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่งแบบไวด์ มีความถี่ตัดผ่าน = 0.5 Hz
- 2) วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองหรือสูงกว่า มีความถี่ตัดผ่าน = 100 Hz
- 3) ให้กลุ่มที่ 1 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 60 เท่า
ให้กลุ่มที่ 2 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 70 เท่า
ให้กลุ่มที่ 3 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 80 เท่า
ให้กลุ่มที่ 4 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 90 เท่า
ให้กลุ่มที่ 5 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 100 เท่า
ให้กลุ่มที่ 6 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 110 เท่า
ให้กลุ่มที่ N สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย $(5 + N)*10$ เท่า
- 4) นำวงจรทั้งสองส่วนมาต่ออนุกรมกัน ให้ภาคแรกเป็นวงจรกรองผ่านสูง และภาคที่สองเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ

สิ่งที่กำหนดให้

- ใช้อ็อกซิ่ปแอมป์เบอร์ TL064 จำนวน 1 ตัว (ภายในการประกอบด้วยอ็อกซิ่ปแอมป์จำนวน 4 ตัว)
- ค่าความเก็บประจุที่ใช้ในวงจร คือ $10\text{--}1000 \text{ nF}$
- ค่าความต้านทานที่ใช้ $1\text{--}1000 \text{ k}\Omega$ (ค่าแนะนำ คือ $10\text{--}1000 \text{ k}\Omega$)
- แหล่งจ่ายไฟตรง $\pm 9 \text{ V}$ ให้ใช้เป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจร
- Breadboard (พิยาภานใช้เนื้อที่อย่างประหยัด)

ใบงานประกอบการทดลอง เรื่อง วงจรกรองสัญญาณ

ชื่อ นามสกุล นาขรนบดี กรีโนพยาร์ รหัสนิสิต 6430149421 ตอนเรียนที่ 2 กลุ่มที่ 5

ชื่อ นามสกุล นาขกนกศร อนันต์กุณยวัฒน์ รหัสนิสิต 6430032121

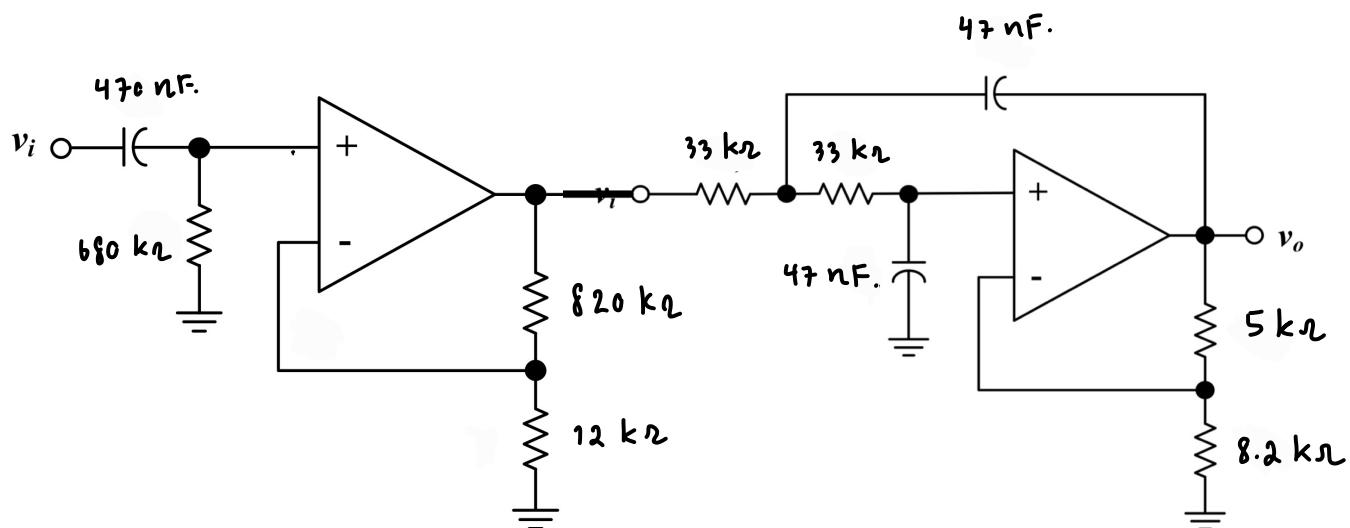
ชื่อ นามสกุล นาพญาณรัชดา นำง่วรพันธุ์ รหัสนิสิต 6430084221

ลายเซ็นอาจารย์ผู้ตรวจ ALT

สิ่งที่ต้องส่ง

รูปวงจร (Schematic diagram) ของวงจรกรองผ่านແບບ

ระบุค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อวงจรจริงทุกดัว



คำอธิบายวงจร (วงจรประกอบด้วยวงจรย่อยของไรบัง แสดงการคำนวณของอัตราขยาย และวิธีการ
ออกแบบมาพอเข้าใจ)

$$\text{อัตราขยาย} = (5+5) \times 10 = 100 \text{ เท่า}$$

$$\underline{\text{LPF order 2}} , R_2 = R_3 = R \quad || \Rightarrow C_2 = C_3 = C$$

$$s^2 + 2\zeta s + 1 = s^2 + 2\zeta s + 1$$

$$\zeta = \sqrt{2}/2$$

$$\frac{1}{Q} = 2 - \frac{R_F}{R_A} = 2\zeta = \sqrt{2}$$

$$\frac{R_F}{R_A} = 0.5858$$

$$\text{กำหนด } R_F = 5 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{แล้ว } R = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_A = \frac{5}{0.5858} = 8.5353 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{แล้ว } R = 8.2 \text{ k}\Omega$$

$$\therefore A_{V2} = \left(1 + \frac{R_F}{R_A} \right) = 1 + \frac{5 \text{ k}\Omega}{8.2 \text{ k}\Omega} = 1.6098$$

$$\omega_c = 2\pi(f_{\text{LPF}}) = \frac{1}{\sqrt{R_2 C_2 R_3 C_3}}$$

$$RC = \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})} = 1.591 \times 10^{-3}$$

$$\text{ให้ } C = 47 \text{ nF} \rightarrow \text{แล้ว } C \text{ มาก } 47 \text{ nF.}$$

$$R = 33.851 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{แล้ว } R \text{ มาก } 33 \text{ k}\Omega$$

HPF order 1

$$RC_1 = \frac{1}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi(0.5)} = 0.318$$

กำหนด $R_1 = 676 \text{ k}\Omega \rightarrow$ เลือกให้ R ขนาด $680 \text{ k}\Omega$

$C_1 = 470 \text{ nF.} \rightarrow$ เลือกให้ C ขนาด 470 nF.

$$Av_1 \cdot Av_2 = 100$$

$$Av_1 = \frac{100}{1.6098} = 62.12$$

$$62.12 = 1 + \frac{R_F}{R_A}$$

$$\frac{R_F}{R_A} = 61.12$$

กำหนด $R_F = 820 \text{ k}\Omega \rightarrow$ เลือกให้ R ขนาด $820 \text{ k}\Omega$

$R_A = \frac{820 \text{ k}\Omega}{61.12} = 13.42 \text{ k}\Omega \rightarrow$ เลือกให้ R ขนาด $12 \text{ k}\Omega$

ผนตัวที่ใช้งานกับปุ่มไปหน้า Gain หมายความว่า ความถี่ต่ำกว่า

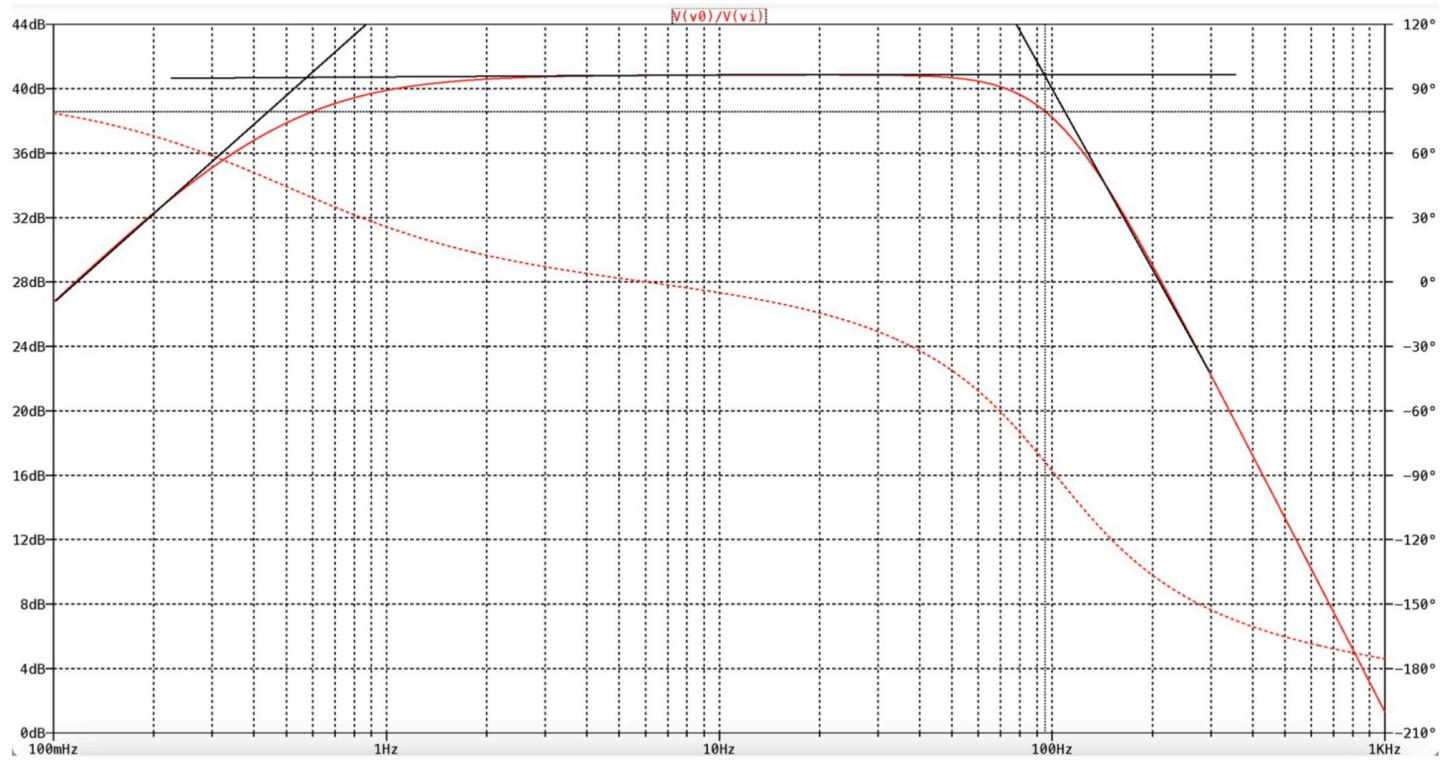
$$Av_1 = 1 + \frac{820}{12} = 69.33 \quad \left. \right\} \quad \text{Gain} = 111.62$$

$$Av_2 = 1.61$$

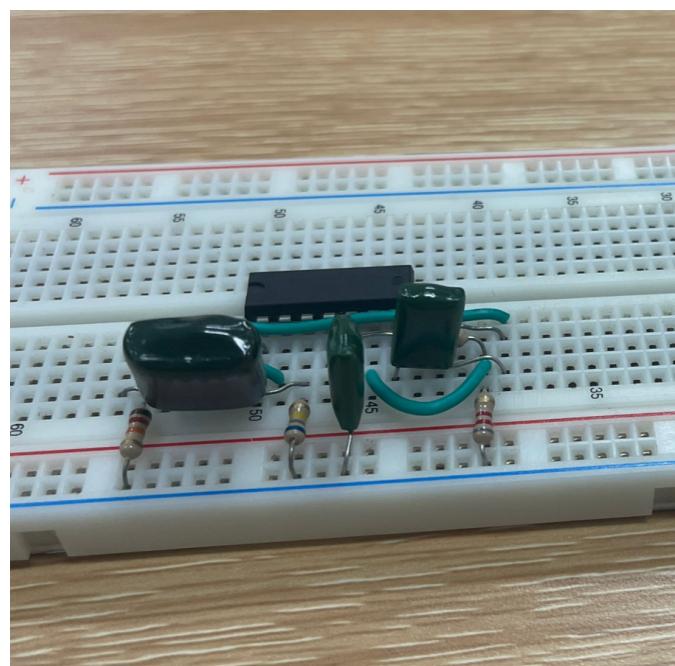
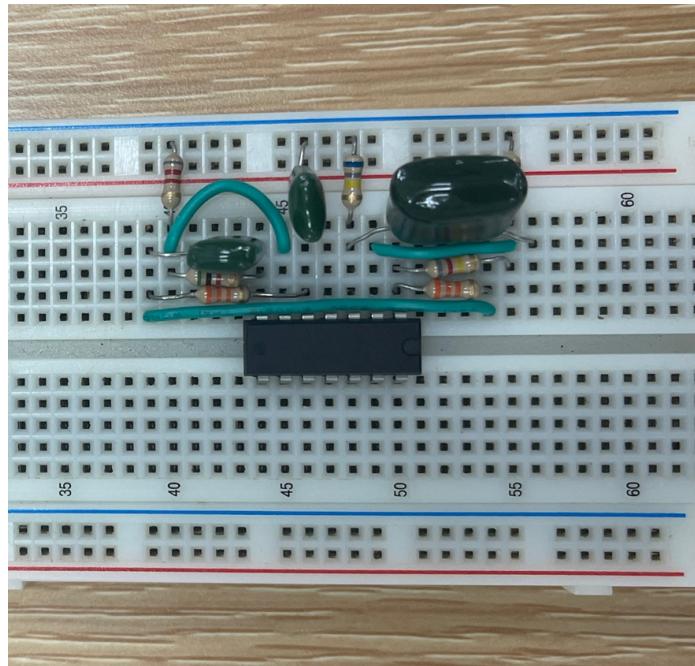
$$\text{LPF : } 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{(33k)(47n)(33k)(47n)}} = 102.61 \text{ Hz.}$$

$$\text{HPF : } 2\pi f = \frac{1}{(680k)(47n)} = 0.498 \text{ Hz}$$

ผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) ด้วยโปรแกรม LTSpice
(แสดงการวัดความถี่ตัดผ่าน โดยการใช้เส้นตรงใกล้เคียงลงบนกราฟที่ได้จากการจำลอง ดู
ภาคผนวกด้านหลังเอกสารประกอบ)



ให้นิสิตต่อวงจรลงบน breadboard ตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วแสดงรูปถ่ายวงจรบน
breadboard ให้การเข้มต่ออย่างชัดเจน



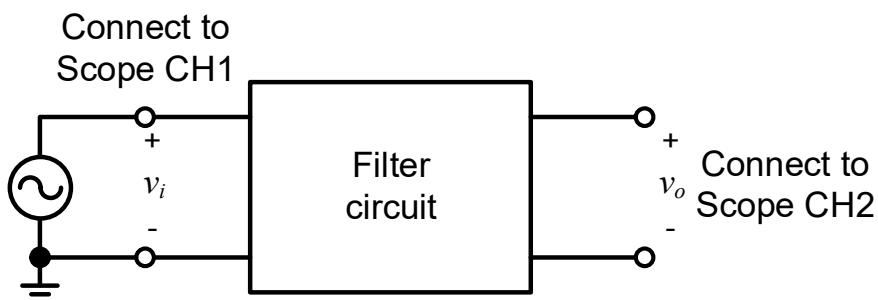
การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านແກບ มีรูปประกอบการวัด

กำหนดให้ป้อนสัญญาณไซน์ที่ทราบความถี่และขนาด เป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรกรองแล้ววัดสัญญาณขาออกของวงจรกรอง ดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อความสะดวกกำหนดให้วัดขนาดของสัญญาณขาเข้าและขาออกของวงจรกรอง โดยใช้ค่าอยอดถึงยอด คำนวณอัตราขยายจากค่าอยอดของสัญญาณขาออกและขาเข้า

$$Gain = \frac{|v_{out}|}{|v_{in}|}$$

หมายเหตุ:

- 1) ในการใช้ DSO (digital storage oscilloscope) วัดสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ของ DSO ต้องตั้งการเชื่อมโยงแบบ DC (direct coupling) เพื่อให้การวัดค่าอัตราขยายมีความถูกต้องที่ความถี่ต่ำมาก หากตั้งเป็นแบบ AC ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ต่ำจะมีค่าลดต่ำลงเนื่องจากมีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ต่อระหว่างขั้วเข้ากับวงจรภายในตัวเครื่อง DSO
- 2) ในการใช้งาน DSO ควรตรวจสอบอัตราคุณของ probe ให้ถูกต้อง ในการนี้ทั่วไปตัวคุณของ probe คือ 1
- 3) ในการทดลองที่แต่ละความถี่ ควรเลือกสัญญาณขาเข้าให้มีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้ ที่ สัญญาณขาออกจากการยังคงเป็นรูปสัญญาณไซน์ เพื่อให้การคำนวณค่าอัตราขยายมีความแม่นยำ
- 3) ออปแอมป์เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต้องการแหล่งจ่ายไฟภายนอกเพื่อตัวอปแอมป์ ออปแอมป์ TL064 ต้องการแหล่งจ่ายไฟบวกและลบ ใน datasheet ของ TL064 แหล่งจ่ายไฟบวก คือ Vcc+ และแหล่งจ่ายไฟลบ คือ Vcc- ให้ต่อขั้วเหล่านี้เข้าขึ้วมาก และ ลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง



รูปที่ 8: การต่อวงจรเพื่อทดลองวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรอง

ให้บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองลงในตาราง และวัดกราฟในหน้าตัดไป

f (Hz)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
v_{in} (mV _{pp})	80	80	80	80	80	80	80	80	80
v_{out} (mV _{pp})	320	3200	4,1600	5,1600	6,000	6,400	7,200	7,400	7,600
Gain	4	40	57.5	70	75	80	90	92.5	95

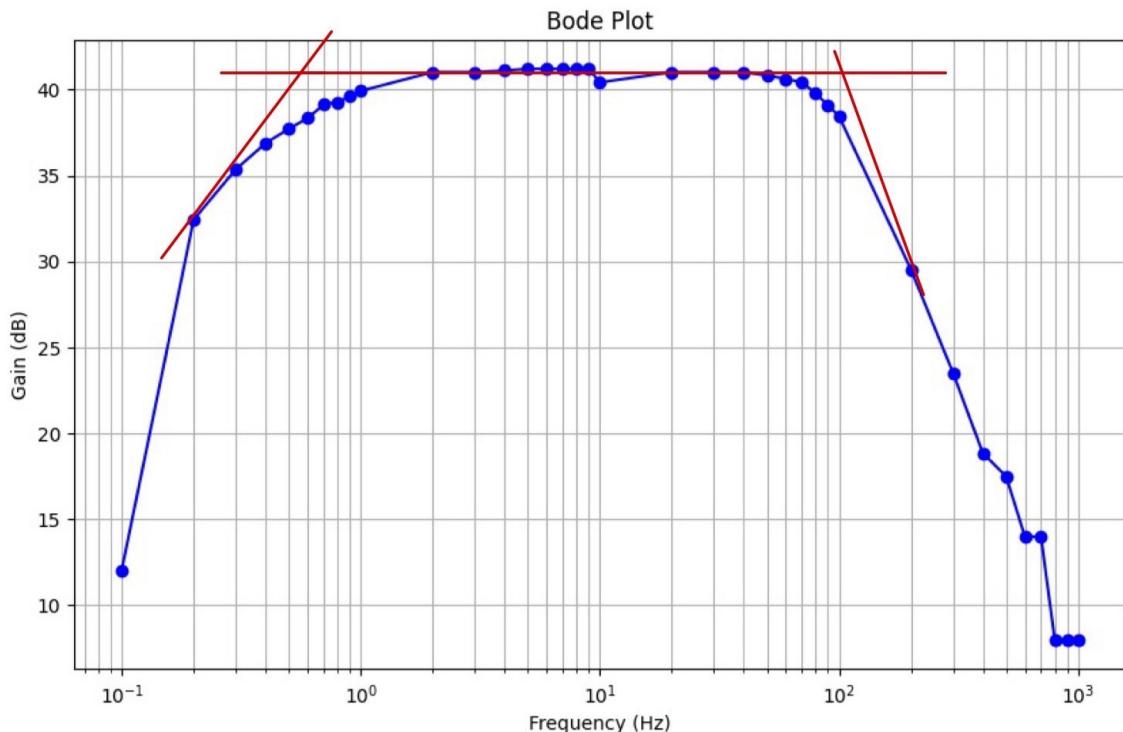
f (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
v_{in} (mV _{pp})	80	80	80	80	80	80	80	80	80
v_{out} (mV _{pp})	8,000	9,000	9,000	9,100	9,200	9,200	9,200	9,200	9,200
Gain	100	112.5	112.5	113.75	115	115	115	115	115

f (Hz)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
v_{in} (mV _{pp})	80	80	80	80	80	80	80	80	80
v_{out} (mV _{pp})	9,200	9,200	9,200	9,200	8,800	8,600	8,400	7,800	7,200
Gain	115	115	115	115	110	107.5	105	97.5	90

f (Hz)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
v_{in} (mV _{pp})	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
v_{out} (mV _{pp})	6,700	2,400	1,200	700	600	400	400	200	200	200
Gain	83.75	30	15	8.75	7.5	5	5	2.5	2.5	2.5

(นิสิตสามารถใช้โปรแกรม Excel หรือโปรแกรมอื่นช่วยวัดกราฟได้ แต่ต้องระบุข้อมูลให้ถูกต้องและครบถ้วน เช่น ชื่อแกน หน่วยของแกน)

กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรอง



(แสดงการวัดความถี่ตัดผ่าน โดยการใช้เส้นตรงใกล้เคียงลงบนกราฟ ดูภาคผนวกด้านหลังของเอกสารประกอบ)

ค่าอัตราขยาย (จากการคำนวณ) $\text{Gain} = 111.62 \Rightarrow 40.95 \text{ dB}$

ค่าอัตราขยาย (จากการจำลอง: Simulation) $\text{Gain} = 109.28 \Rightarrow 40.77 \text{ dB}$

ค่าอัตราขยาย (จากการวัด) $\text{Gain} = 115 \Rightarrow 41.21 \text{ dB}$

ค่าความถี่ตัดผ่าน (Cut-off frequency) ด้านต่ำ

ค่าจากการคำนวณ 0.448 Hz ค่าจากการจำลอง 0.561 Hz ค่าจากการวัด 0.453 Hz .

ค่าความถี่ตัดผ่าน (Cut-off frequency) ด้านสูง

ค่าจากการคำนวณ 102.61 Hz ค่าจากการจำลอง 100.20 Hz ค่าจากการวัด 100.1 Hz

สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด การคำนวณ และ การจำลอง

สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด การคำนวณ และจากการจำลอง

จากการทดสอบวิธีการแบบวงจรผ่านแกบโทนน้ำ HPF รันกับหนึ่งต่อ Cascade กับ LPF บันก์สอง เมื่อนำมาคำนวณพบว่าได้ค่า gain = 111.62 เท่า ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยจาก การ จำลองด้วย LT-Spice และ การทดสอบใน ซึ่งเกิดขึ้นจากการล็อกเกิลชีดั่ต์ตัวบันทuan และตัวเก็บประดิษฐ์ ดำเนินพัฒนาด้วยตนเองและใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB จึงทำให้ผลลัพธ์ดีมาก ลดความคล่องตัวของวงจร แต่ก็ต้องยอมรับว่า ทางด้านความดุดันของวงจรยังคงอยู่ คงต้องดำเนินดู柏德์บันทuan ให้ดีกว่านี้

% Error ของ gain จากการจำลองเทียบการคำนวณ

$$= \frac{|109.28 - 111.62|}{111.62} \times 100 = 2.096\%$$

% Error ของ gain จากการวัดเทียบการคำนวณ

$$= \frac{|115 - 111.62|}{111.62} \times 100 = 3.028\%$$

% Error ของ f_c ล้าน赫 จากการจำลองเทียบการคำนวณ

$$= \frac{|0.561 - 0.498|}{0.498} \times 100 = 12.6\%$$

% Error ของ f_c ล้าน赫 จากการวัดเทียบการคำนวณ

$$= \frac{|0.453 - 0.498|}{0.498} \times 100 = 9.03\%$$

% Error ของ f_c ล้านสูบ จากการจำลองเทียบการคำนวณ

$$= \frac{|100.2 - 102.61|}{102.61} \times 100 = 2.35\%$$

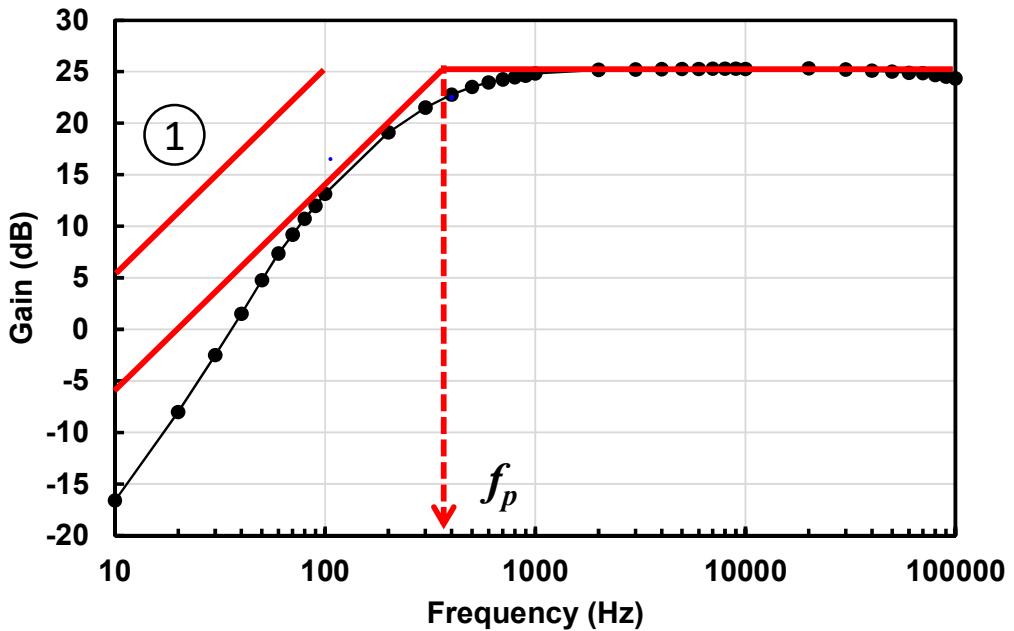
% Error ของ f_c ล้านสูบ จากการวัดเทียบการคำนวณ

$$= \frac{|100.1 - 102.61|}{102.61} \times 100 = 2.45\%$$

เอกสารอ้างอิง

- [1] Medical Instrumentation: Application and Design, John G. Webster (ed.), John Wiley & Sons 4th edition, 2009.
- [2] Active and Non-linear Electronics, Thomas F. Schubert and Ernest M. Kim (ed.), John Wiley & Sons, 1996.

ภาพผนวก การหาเส้นตรงใกล้เคียง (Asymptote) เพื่อหาความถี่ตัดผ่าน



- ① คือ เส้นอ้างอิงที่มีความชัน 20 dB/dec กรณีที่เป็นวงจรกรองอันดับสอง ความชันอ้างอิงจะเพิ่มเป็น 40 dB/dec