

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

เรื่อง

การออกแบบวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สร้างด้วยมอสเทคโนโลยี

หัวหน้าโครงการ

นายวันชัย ธีรวิรุจ

RCH

TK

7867

๑๕๘๖๕

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 28198

วัน, เดือน, ปี..... 23 ก.ค. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรไจเรเตอร์ที่สร้างด้วยมอสเทคโนโลยี

On the design of CMOS-based gyrator circuit

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยสร้างจากมอสเฟต (MOSFET) ซึ่งอาศัยหลักการของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส วงจรที่ได้ออกแบบขึ้นสามารถเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำได้ทั้งชนิดที่ต่ออยู่กับกราวด์ (GROUNDED) และขดลวดเหนี่ยวนำชนิดลอยตัว (FLOATING) ในการออกแบบวงจรได้ใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิด N-CHANNEL และ P-CHANNEL ที่เป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดร่วมกับความต้านทานสองตัวและตัวเก็บประจุหนึ่งตัว วงจรที่ออกแบบขึ้นสามารถยืนยันได้ด้วยผลการทดลองและใช้โปรแกรม PSpice ซึ่งได้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่คาดการณ์ไว้มาก

Abstract

In this paper, a circuit that can realize grounded and floating inductance by using MOSFET is presented. The realization methods made use of a voltage to current converter. It employ a small number of components. Which comprises n-channel, p-channel MOS enhancement-mode, two resistors and one capacitor. The experiment results and the simulation results using PSpice program analysis circuit are in close agreement with the theoretical prediction.

1. บทนำ

ปัจจุบันมอสเฟต (MOSFET : Metal - Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) หรือเรียกสั้น ๆ ว่ามอส (MOS) ได้เข้ามามีบทบาทในการสร้างวงจรรวมแบบอนาล็อก (Analog Integrated Circuit) เนื่องจากโครงสร้างของมอสใช้พื้นที่น้อยสามารถสร้างให้มีจำนวนดีไวส์ (Device) ต่อชิปได้มากเป็นผลให้สามารถเพิ่มฟังก์ชันและประสิทธิภาพการทำงานให้ชิปได้มากและมอสยังมีข้อดีคือมีความสมมาตร (Bilaterally Symmetric) ของขาซอร์ส (Source) และขาเดรน (Drain) คือมีคุณสมบัติเหมือนกันสามารถแทนกันได้และมอสยังมีโครงสร้างที่ทำให้ความต้านทานทางอินพุตสูง กำลังสูญเสียต่ำ ไม่มีการแผ่รังสีทางอุณหภูมิ (Thermal-Runaway) และใช้แทนตัวต้านทานได้สะดวกเป็นต้น

โครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นโดยใช้มอสทั้งชนิด P-CHANNEL (PMOS) และ N-CHANNEL (NMOS) แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (Enhancement-Mode) โดยกำหนดการทำงานให้อยู่ในช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) และกำหนดศักดาที่ขาซอร์สกับฐานรอง (V_{SB} : Source-Bulk Voltage) เท่ากับศูนย์ และในการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำนี้ อาศัยหลักการจากวงจรไจเรเตอร์ร่วมกับหลักการของวงจรศักดาควบคุมกระแส โดยในการออกแบบจะใช้วงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) ร่วมกับความต้านทานที่ทำหน้าที่เปลี่ยนศักดาให้เป็นกระแส และวงจรที่ได้ออกแบบขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งลักษณะขดลวดเหนี่ยวนำของการต่ออยู่กับกราวด์และขดลวดเหนี่ยวนำชนิดลอยตัว (Floating) โดยสามารถนำไปใช้เป็นวงจรฟิลเตอร์ วงจรออสซิลเลเตอร์เป็นต้น และโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำ ๆ ค่าของอินดักแตนซ์

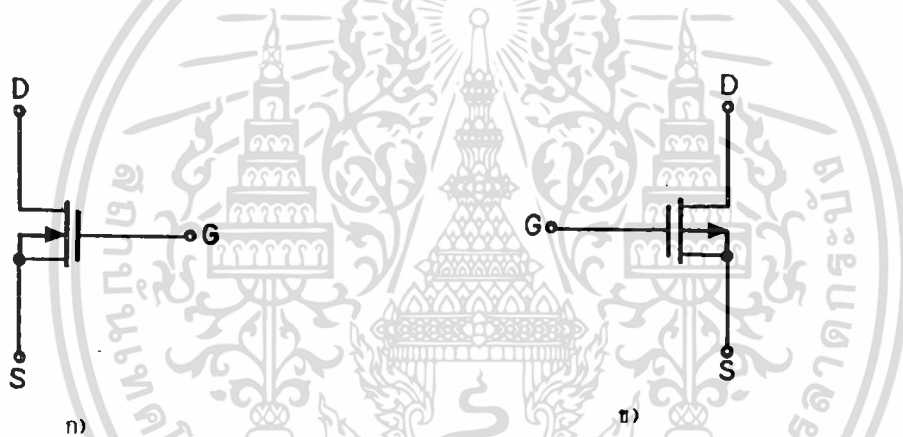
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(inductance) มาก จะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่เป็นผลให้เปลืองเนื้อที่และมีน้ำหนักมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นการใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำจึงมีประโยชน์มาก

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต ซึ่งอาศัยหลักการทำงานของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส โดยทั่วไปวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำมักจะสร้างจากดีไวซ์จำพวกออปแอมป์ [1] (Operational Amplifier) OTA [2] (Operational Transconductance Amplifier) และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ [3] เป็นต้น ในโครงการนี้จะเสนอการออกแบบวงจรขึ้น โดยมีผลการทดลองและการเลียนแบบวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี

2. ทฤษฎีและการทำงานของมอสเฟต (MOSFET)

มอสเฟต (MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) เป็นทรานซิสเตอร์สามไฟฟ้า ซึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (Enhancement mode) ทั้งชนิด P-CHANNEL และ N-CHANNEL โดยกำหนดให้ศักดาระหว่างขาซอร์สกับฐานรอง เท่ากับศูนย์นั่นคือต่อขาซอร์สกับฐานรองร่วมกัน [4] และสามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดเมื่อซอร์สกับฐานรองต่อกันโดยรูป ก) ชนิด MOS ข) ชนิด PMOS

ในการใช้งานกำหนดให้มอสทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) ดังนั้นจะแสดงสมการกระแสเฉพาะบริเวณอิ่มตัวเท่านั้น และการที่จะทำให้มอสเฟตทำงานในช่วงอิ่มตัวได้นั้นจะต้องไปอัสวงจรให้ศักดาระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส (V_{GS}) มีค่ามากกว่าแรงดันวิกฤต (Threshold Voltage : V_T) นั่นคือ

$$0 < V_{GS} - V_T \leq V_{DS} \quad (1)$$

ดังนั้นสมการกระแสของช่วงอิ่มตัวจะได้

$$i_D = \beta \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญนิยามได้ดังนี้

β	=	$(U_o C_{ox}) \cdot W/2L = K W/2L$	
U_o	=	สภาพความคล่องตัว (Surface Mobility)	$\text{Cm}^2/\text{V-sec}$
C_{ox}	=	ออกไซด์คาปาซิแตนซ์ (Oxide Capacitance)	F/Cm^2
W	=	ความกว้างของแชนเนล (Channel width)	meter
L	=	ความยาวของแชนเนล (Channel length)	meter
K	=	ทรานสคอนดักแตนซ์ (Transconductance Parameter)	amp/Volt^2

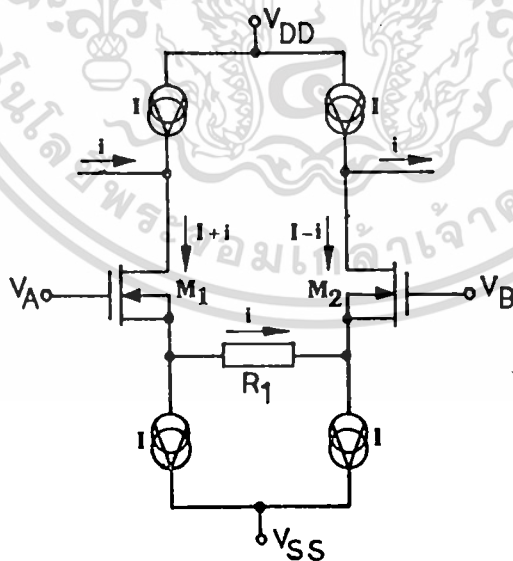
และจากสมการที่ (2) เราสามารถหาค่าของ V_{GS} ได้คือ

$$V_{GS} = (i_D/\beta)^{1/2} + V_T \quad (3)$$

3. หลักการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

3.1 วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสโดยใช้มอสเฟต

โดยปกติการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ มักจะสร้างจากหลักการของวงจรแปลงอิมพีแดนซ์ทั่วไป (Generalized Impedance Converter) หรือวงจรไจเรเตอร์ (Gyrator) ซึ่งการออกแบบเป็นวงจรรวม นิยมออกแบบโดยใช้ศักดาควบคุม หรือกระแสควบคุม ซึ่งในบทความนี้จะออกแบบโดยใช้ศักดาควบคุม โดยอาศัยวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสโดยมีหลักการดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสโดยใช้มอสเฟต

จากรูปที่ 2 เป็นวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส โดยใช้มอสเฟตสองตัวร่วมกับความต้านทานหนึ่งตัว การทำงานเมื่อให้ศักดาที่จุด A และ B ทำให้เกิดกระแส i ไหลผ่าน R_1 และถ้าต่อโหลดไปใช้งานที่จุด X, Y เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลให้กระแสที่ i ไหลออกจากจุด Y และไหลเข้าที่จุด X โดยสามารถหาค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (Transconductance) ที่จุด A, B ได้โดยพิจารณาจากวงจร ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$V_{AB} = V_{GS1} - V_{GS2} + iR_1 \quad (4)$$

จากสมการที่ (3) จะได้

$$V_{AB} = (i_{D1}/\beta_1)^{1/2} + V_{T1} - (i_{D2}/\beta_2)^{1/2} - |V_{T2}| + iR_1 \quad (5)$$

และสามารถหาความต้านทานที่จุด A, B ได้จาก

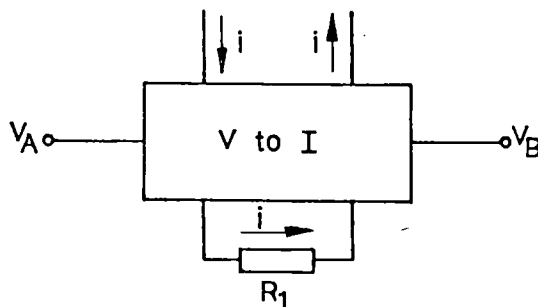
$$R_{AB} = \partial V_{AB} / \partial i \quad (6)$$

$$R_{AB} = \left[\frac{L}{2K'W} \right]^{1/2} \left[\frac{1}{(I+i)^{1/2}} + \frac{1}{(I-i)^{1/2}} \right] + R_1 \quad (7)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าทรานสคอนดักแตนซ์ได้จาก $G_{AB} = 1/R_{AB}$

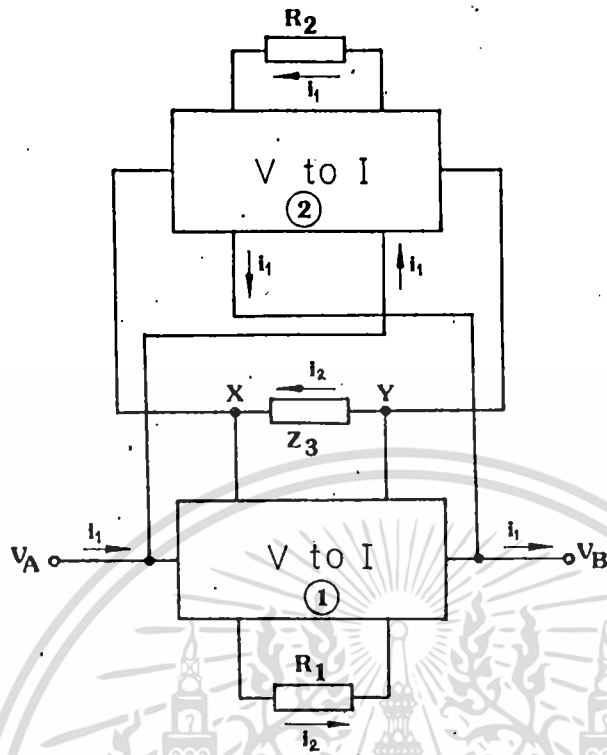
$$G_{AB} = \frac{1}{(L/2K'W)^{1/2} \left[1/(I+i)^{1/2} + 1/(I-i)^{1/2} \right] + R_1} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) ค่าของ G_{AB} ขึ้นอยู่กับ I และ $1/R_1$ และจะเห็นว่าถ้าเราสามารถนำกระแสที่ได้จากจุด X, Y ของรูปที่ 2 ไปทำให้เกิดเป็นศักดาและนำศักดาที่ได้ไปควบคุมการเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสชุดที่ 2 และนำกระแสที่เอาที่พุทของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสชุดที่ 2 ป้อนกลับมายังศักดาอินพุทของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสชุดที่ 1 ก็จะเป็นไปตามหลักการของวงจรแปลงอิมพีแดนซ์ทั่วไป หรือวงจรโจเรเตอร์ซึ่งถ้าเราแทนวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสของรูปที่ 2 ด้วยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3 แล้วเราสามารถเขียนไดอะแกรมของวงจรแปลงอิมพีแดนซ์ทั่วไปได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมอย่างง่ายของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสของรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงไดอะแกรมของวงจรแปลงอิมพีแดนซ์ทั่วไปโดยใช้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสสองชุด

จากวงจรรูปที่ 4 เราพิจารณาโดยประมาณจะเห็นว่าจากวงจรเมื่อเราจ่ายศักดาที่จุด A, B วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสในชุดที่ 2 จะเกิด i_2 ไหลผ่าน R_1 ตามทิศทางดังรูปที่ 4 ตามคุณสมบัติของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสในรูปที่ 2 เป็นผลให้เกิดกระแส i_2 ไหลออกจากจุด Y ผ่าน Z_3 เป็นผลให้เกิดศักดา ณ จุด XY ตามทิศทางดังรูปที่ 4 และจะไปควบคุมวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสในชุดที่ 1 เป็นผลให้เกิดกระแส i_1 ไหลผ่าน R_2 จากคุณสมบัติของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสในรูปที่ 2 เป็นผลให้เกิดกระแส i_1 ไหลเข้าที่จุด A และไหลออกที่จุด B ดังนั้นเราสามารถวิเคราะห์โดยพิจารณาจากกระแส i ตามรูปที่ 4 ได้ดังนี้คือ

$$V_{AB} = i_3 R_1 \quad (9)$$

$$V_{XY} = i_2 Z_3 \quad (10)$$

$$V_{XY} = i_1 R_2 \quad (11)$$

จากสมการที่ (9) และ (10) จะได้

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad (12)$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{XY} = \frac{V_{AB}Z_3}{R_1} \quad (13)$$

จากสมการที่ (11) และ (13) จะได้

$$i_2R_2 = \frac{V_{AB}Z_3}{R_1}$$

เพราะฉะนั้น

$$Z_{AB} = \frac{V_{AB}}{I_1} = \frac{R_2R_1}{Z_3} \quad (14)$$

จากสมการที่ (13) จะเห็นว่าถ้าเราให้ $Z_3 = 1/sC$ เมื่อ $s = j\omega$ จะได้

$$Z_{AB} = sCR_2R_1 \quad (15)$$

เนื่องจากว่า $Z_L = sL$ ดังนั้นจากสมการที่ (15) จะได้ว่าอิมพีแดนซ์ที่จุด AB จะเป็นค่าอินดักแตนซ์ ดังนั้นจะได้ขดลวดเหนี่ยวนำตามสมการ (16)

$$L_{eq} = CR_1R_2 \quad (16)$$

ดังนั้นตามหลักการในรูปที่ 4 สามารถจะเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำได้

3.2 วงจรเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นโดยใช้มอสเฟต

ดังนั้นเราสามารถออกแบบวงจรตามหลักการรูปที่ 4 สามารถเขียนวงจรโดยใช้หลักการของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส โดยแทนวงจรในรูปที่ 2 เราจะได้วงจรเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตดังรูปที่ 5

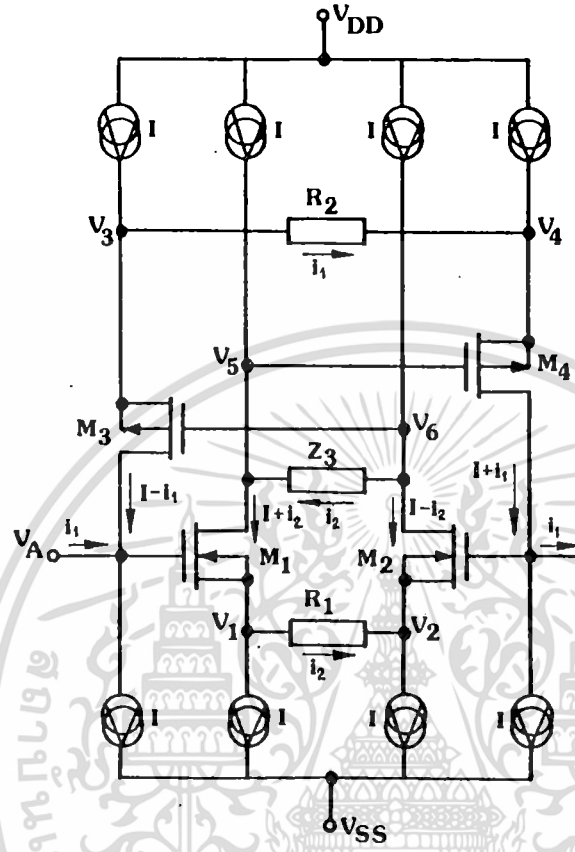
จากวงจรพิจารณาได้ดังนี้คือ จะใช้วงจรขยายผลต่างทำหน้าที่เปลี่ยนศักดาเป็นกระแสซึ่งมี 2 ชุดด้วยกันคือ M_1 และ M_2 จะทำหน้าที่เปลี่ยนศักดาที่จุด AB เป็นกระแส i_1 ไหลผ่าน R_1 ส่วน M_3 และ M_4 จะเปลี่ยนศักดาที่ตกคร่อม Z_3 เป็นกระแส i_1 ไหลผ่าน R_2 โดยมอสเฟตทุกตัวจะไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I ดังรูป

การทำงานเมื่อให้ศักดาที่จุด AB โดยให้จุด A มีศักดาเป็นบวกเมื่อเทียบกับจุด B จะทำให้เกิดกระแส i_2 ไหลผ่าน R_1 เป็นผลให้เกิดกระแสเดรนของ $M1$ เป็น $I+i_2$ และกระแสเดรนของ $M2$ เป็น $I-i_2$ และจะเห็นว่า Z_3 ต่ออยู่ที่ขาเดรนทั้งสองของ $M1$ และ M_2 ทำให้กระแสผ่าน Z_3 (กระแสไม่ไหลเข้าขาเกตของ $M3$ เนื่องจากคุณสมบัติของมอสเฟตมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก) เป็นผลให้เกิดศักดาตกคร่อม Z_3 ซึ่งเป็นศักดาไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ป้อนให้กลับวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสชุดที่ 2 โดยทิศทางที่กระแสไหลเข้า Z_3 จะเป็นบวก ดังนั้นทำให้เกทของ M_3 ได้ศักดาบวกเมื่อเทียบกับ M_4 เป็นผลทำให้กระแสไหลผ่าน R_2 โดยไหลจากขาซอร์สของ M_3 ไปยังขาซอร์สของ M_4 เป็นผลให้กระแสเดรน M_3 เป็น $I-i_1$ นั่นคือเสมือน i_1 ไหลเข้าที่จุด A นั่นเอง และขณะเดียวกัน



รูปที่ 5 แสดงวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต (MOSFET)

กระแสเดรน M_4 จะเป็น $I+i_1$ เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสที่ I บังคับกระแสให้ไหลออกจากจุด B ผ่านแหล่งจ่ายกระแสที่เท่ากับ I ดังนั้นจะเกิดกระแสไหลออกจากจุด B เท่ากับ i_1 ดังนั้นเสมือนกับมีกระแส i_1 ไหลเข้าที่จุด A และไหลออกที่จุด B นั่นเองและเราสามารถพิจารณาผลของศักดาและกระแสที่จุด AB เพื่อหาอิมพีแดนซ์ของวงจรได้จากวงจร พิจารณาที่จุด AB จะได้

$$V_A - V_B = V_{GS1} - V_{GS2} + V_1 - V_2 \tag{17}$$

และจากวงจร $V_1 - V_2 = i_2 R_1$ ดังนั้น

$$V_{AB} = V_{GS1} - V_{GS2} + i_2 R_1 \tag{18}$$

พิจารณาที่จุด V_3 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{SG3} + V_6 = V_{SG4} + V_5 + i_1 R_2$$

$$V_6 - V_5 = V_{SG4} - V_{SG3} + i_1 R_2 \quad (19)$$

เมื่อ

$$V_6 - V_5 = i_2 Z_3 \quad \text{ดังนั้น}$$

$$i_2 Z_3 = V_{SG4} - V_{SG3} + i_1 R_2$$

$$i_2 = \frac{V_{SG4}}{Z_3} - \frac{V_{SG3}}{Z_3} + \frac{i_1 R_2}{Z_3} \quad (20)$$

แทน (20) ใน (18)

$$V_{AB} = V_{GS1} - V_{GS2} + \frac{R_1 R_2 i_1}{Z_3} + \frac{R_1 V_{SG4}}{Z_3} - \frac{V_{SG3} R_1}{Z_3} \quad (21)$$

จากสมการ (3) และ (21) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{i_{D1}}{\beta_1}} + V_T - \sqrt{\frac{i_{D2}}{\beta_2}} - V_T + \frac{R_1}{Z_3} \sqrt{\frac{i_{D4}}{\beta_4}} + |V_T| - \sqrt{\frac{i_{D3}}{\beta_3}} - |V_T| + i_1 R_2 \quad (22)$$

โดยที่

$$\beta_1 = K'_1 W_1 / 2L_1 \quad (23.1)$$

$$i_{D1} = I + i_2 \quad (23.2)$$

$$i_{D2} = I - i_2 \quad (23.3)$$

$$i_{D3} = I - i_1 \quad (23.4)$$

$$i_{D4} = I + i_1 \quad (23.5)$$

จาก (22) และ (23) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{I+i_2}{\beta_1}} + V_T - \sqrt{\frac{I-i_2}{\beta_2}} - V_T + \frac{R_1}{Z_3} \sqrt{\frac{I+i_1}{\beta_4}} + |V_T|$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\sqrt{\frac{I-i_1}{\beta_3}} - |V_T| + \frac{i_1 R_1 R_2}{Z_3} \quad (24)$$

เมื่อ $V_{T1} = V_{T2}$ และ $V_{T3} = V_{T4}$ ดังนั้น

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{I+i_2}{\beta_1}} - \sqrt{\frac{I-i_2}{\beta_2}} + \frac{R_1}{Z_3} \left[\sqrt{\frac{I+i_1}{\beta_4}} - \sqrt{\frac{I-i_1}{\beta_3}} \right] + \frac{i_1 R_1 R_2}{Z_3} \quad (25)$$

ฉะนั้นกำหนดให้ $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4$ สามารถหา Z_{in} ที่จุด AB ได้ดังนี้คือ

$$Z_{in} = \frac{\partial V_{AB}}{\partial i_1} = \frac{R_1}{2\beta Z_3} \left[\sqrt{\frac{\beta}{(I+i_1)}} + \sqrt{\frac{\beta}{(I-i_1)}} \right] + \frac{R_1 R_2}{Z_3} \quad (26)$$

$$Z_{in} = \frac{R_1}{2\sqrt{\beta} Z_3} \left[\frac{1}{(I+i_1)^{1/2}} + \frac{1}{(I-i_1)^{1/2}} \right] + \frac{R_1 R_2}{Z_3}$$

จาก $\beta = \frac{K'W}{2L}$ ดังนั้น

$$Z_{in} = \frac{R_1}{Z_3} \sqrt{\frac{L}{2K'W}} \left[\frac{1}{(I+i_1)^{1/2}} + \frac{1}{(I-i_1)^{1/2}} \right] + \frac{R_1 R_2}{Z_3} \quad (27)$$

ดังนั้นสมการที่ (27) ถ้าเราให้ $Z_3 = 1/sC$ เราจะได้ค่าของอินดักแตนซ์ที่ไม่มีเทอมของความต้านทาน ดังนั้นค่าขดลวดเหนี่ยวนำเสมือน (Equivalent Inductance : L_{eq}) ที่มีความแม่นยำสูงและค่าขดลวดเหนี่ยวนำเสมือนแสดงได้ดังนี้คือ

$$L_{eq} = R_1 C_3 \sqrt{\frac{L}{2K'W}} \left[\frac{1}{(I+i_1)^{1/2}} + \frac{1}{(I-i_1)^{1/2}} \right] + R_1 R_2 C_3 \quad (28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 28 จะเห็นว่าเมื่อเราป้อนแรงดันที่จุด A และ B จะทำให้เกิดค่ากระแส i_1 ที่เหมาะสมที่สามารถหาค่าของอินดักแตนซ์และขดลวดเหนี่ยวนำได้ จะต้องมียุคในช่วง $-I < I_1 < I$ ถ้า i_1 มีค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าวนี้ จะไม่สามารถหาค่าได้ และจะเห็นค่าของ L_{eq} สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_2 และ C_3 โดยให้ค่า R_1 เป็นค่าคงตัว

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองทำในวงจร RL

การทดลองโดยใช้โปรแกรม PSpice [5] เพื่อยืนยันผลการทดลองกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (28) โดยจากการทดลองได้ใช้วงจร RL ต่ออนุกรมดังแสดงในรูปที่ 6 โดยรูป 6(ก) ต่อขดลวดเหนี่ยวนำแบบลอยตัว และรูปที่ 6(ข) ต่อขดลวดเหนี่ยวนำกับกราวด์โดยกำหนดให้ $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_3 = 100 \text{ pF}$ และ $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ และป้อนสัญญาณแรงดันไซน์ขนาด $1 \text{ V}_{p.p}$ ทดลองเปลี่ยนค่าความถี่ ตั้งแต่ $1 \text{ Hz} - 1 \text{ MHz}$ จะได้ผลตอบสนองของศักดาที่เอาท์พุทของวงจรรูปที่ 6(ก) และ (ข) ที่เปลี่ยนตามความถี่ ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ วัดค่าความถี่คัทออฟ (Cutoff Frequency) $f_c = 13.5 \text{ kHz}$ ดังนั้นจะได้ค่าของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรรูปที่ 6 (ก) และ (ข) ได้จาก

$$L_{eq} = R_L / 2\pi f_c = 11.7 \text{ mH} \quad (29)$$

ทดลองวัดค่ากระแส $i_1 = 81.95 \text{ }\mu\text{A}$ และนำค่า i_1 , R_1 , R_2 และ C_3 แทนในสมการที่ (28) ได้ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ $L_{eq} = 11.01 \text{ mH}$ จะเห็นว่าจะได้ค่าใกล้เคียงกันมาก



(ก) ต่อขดลวดเหนี่ยวนำแบบลอยตัว

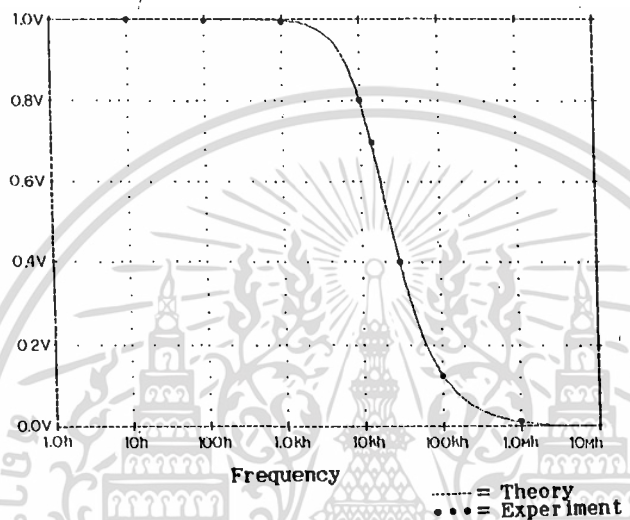
(ข) ต่อขดลวดเหนี่ยวนำกับกราวด์

รูปที่ 6 แสดงวงจรอนุกรม RL ทั้งสองชนิด

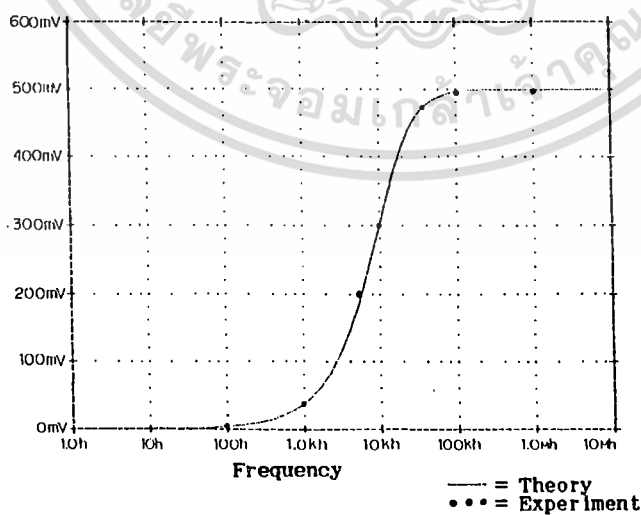
ทดลองเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_2 และตัวเก็บประจุ C_3 เพื่อหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแบบขึ้น ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 9

4.2 การทดลองในวงจรกรองผ่านแถบ

การทดลองโดยใช้ CMOS เบอร์ MC14007 ของบริษัทโมโตโลลาร์มาสร้างเป็นวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยต่อเป็นวงจรกรองผ่านแถบ (Band-Phase Filter) ใช้ RLC [6] ต่อนุกรมดังรูปที่ 10 และการทดลองเปรียบเทียบกับโปรแกรม PSpice โดยใช้ $V_{DD} = 10\text{ V}$, $V_{SS} = 10\text{ V}$ และใช้วงจรกระแสคงตัว I ชนิดคาสโคด (Cascode Current Source) เพราะมีค่าความต้านทานเอาต์พุตสูง [7] บ้อนสัญญาณไซน์ขนาด 1 V_{P-P}

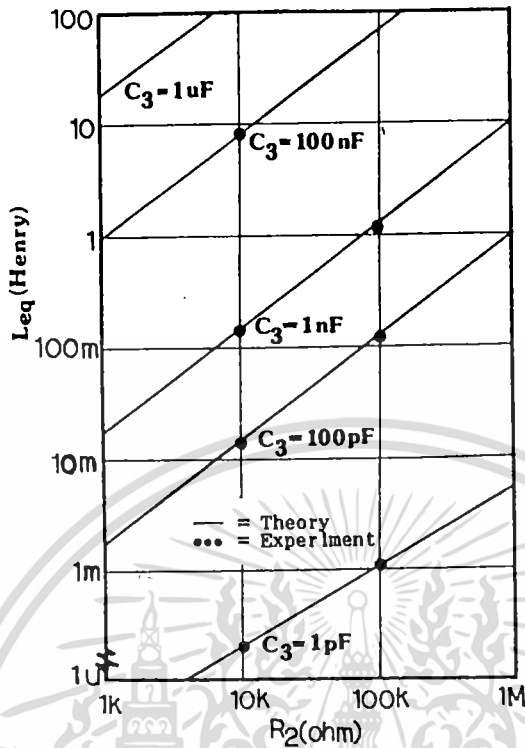


รูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองความถี่ของศักดาที่เอาต์พุตของวงจรรูปที่ 6(ก)



รูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองความถี่ของศักดาที่เอาต์พุตของวงจรรูปที่ 6(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

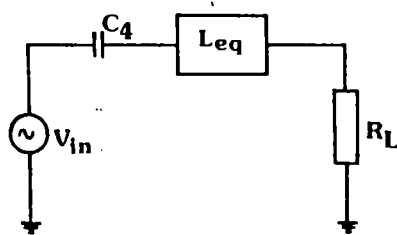


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของค่าขดลวดเหนี่ยวนำกับค่า R_2 และ C_3

โดยใช้ความต้านทาน $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_3 = 10 \text{ nF}$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ และ $C_4 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$ ทดลองเปลี่ยนค่าความถี่ ตั้งแต่ 1 Hz - 1 MHz จะได้ผลตอบสนองความถี่ของศักดาเอาต์พุตดังรูปที่ 11 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) $f_r = 467 \text{ Hz}$ ดังนั้นคำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำจาก

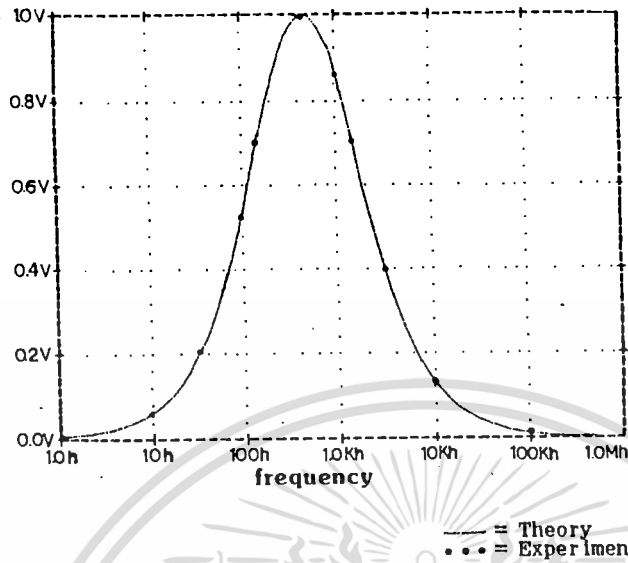
$$L_{eq} = 1/C(2\pi f)^2 = 1.16 \text{ H} \quad (30)$$

และทำการวัดกระแส $i_1 = 1.25 \text{ }\mu\text{A}$ คำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำตามสมการ (28) จะได้ $L_{eq} = 1.10 \text{ H}$ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 10 วงจรกรองผ่านแถบ (Band-Pass Filter) แบบอนุกรม RLC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 ผลตอบสนองความถี่ของคิกคาเอาต์พุทของวงจรรูปที่ 10

ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากคำนวณมาก และจะเห็นว่าแบนด์วิธ (Bandwidth) ของวงจรซึ่งหาได้จาก $BW = f_c/Q$ โดยที่ $Q = (1/R) (L/C)^{1/2}$ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก นั่นแสดงให้เห็นว่าวงจรถ่ายแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่ออกแบบขึ้นนี้เป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพมากวงจรรูปหนึ่ง

5. บทสรุป

จากการออกแบบวงจรถ่ายแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้งชนิดที่ต่ออยู่กับกราวด์และชนิดลอยตัว โดยให้ผลถูกต้องและยังสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานหรือตัวเก็บประจุจึงสามารถจะประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะเมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวมเพราะมีขนาดเล็กมากใช้งานได้สะดวก ดังนั้นผู้เขียนหวังว่าการออกแบบวงจรถ่ายแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตนี้ คงจะเป็นประโยชน์บ้างไม่มากนักก็น้อยสำหรับนักวิจัยที่สนใจในเรื่องนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.E. Van Valkenburg, "Analog Filter Design," HRW, PP. 429-455, 1982.
- [2] วิวัฒน์ กิรานนท์ และปราโมทย์ วาดเขียน "การเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำชนิดใหม่" การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 10, 2530 หน้า (1-22)-(1-29)
- [3] C. Afuso and S. Ishkawa "A Temperature-Insensitive Voltage-Controlled Inductor," IEEE J. Solid-State Circuit, pp. 540-542, Dec. 1975.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] P.R. Gray and R.G. Meyer, "Analysis and design of analog integrated circuits," Second edition, John Wiley, pp. 703-736, 1984.
- [5] M.H. Rashid, "SPICE for circuits and electronics using Pspice," Prentice Hall, inc., 1990.
- [6] U. Tietze and Ch. Schenk, "Advanced Electronic Circuits," S---VBH, PP. 108-123, 1978.
- [7] เกียรติศักดิ์ คมวัชระ และวัลลภ สุระกำพลธร, "การแปลงอิมพีแดนซ์ค่าลบชนิดลอยตัวโดยใช้ CMOS," การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10, หน้า 543-552, 2532
- [8] R. Torrance, T.R. Viswanathan and J.V. Hanson, "CMOS voltage to current transducers," IEEE Trans., vol. 32, pp. 1097--1104, 1985.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้