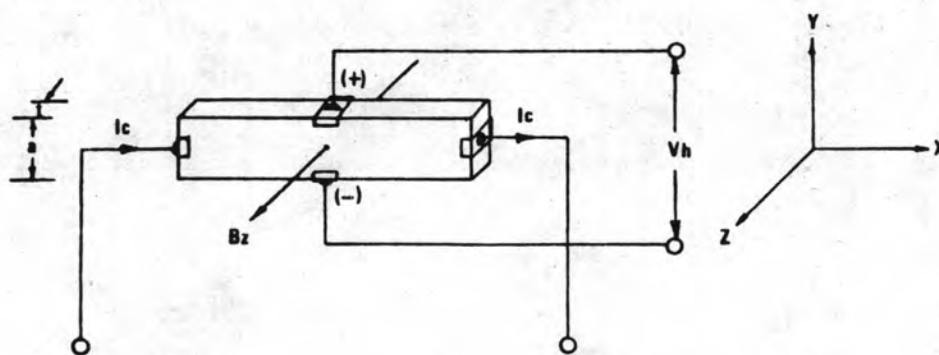


ทฤษฎีและการวิเคราะห์เพื่อออกแบบฮอลล์เอฟเฟกต์ควอเตอร์านสควเซอร์

3.1 คำนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทฤษฎีและการศึกษาวิเคราะห์เพื่อสร้างตัวคณสัญญาของกระแสและแรงดันกระแสสลับ โดยใช้อุปกรณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์เป็นอุปกรณ์สำคัญ รวมทั้งปัญหาและแนวทางในการแก้ความผิดพลาดต่างๆ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และอื่นๆ

3.2 ทฤษฎีและโครงสร้างของฮอลล์-เอฟเฟกต์ (HALL-EFFECT THEORY AND CONSTRUCTION) (6,7,10)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์

จากรูปที่ 3.1 แสดงการเกิดความต่างศักย์ของฮอลล์ สมมติว่าแผ่นสารกึ่งตัวนำกระแสไหลผ่านในทิศทางตามแนวแกน X วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่ทิศทางตามแนวแกน Z พาหะ (CARRIER) ที่นำกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำจะตกแรงโดยสนามไฟฟ้า E_x ในแนวแกน X ให้มีความเร็ว U_x วิ่งไปตามแนวแกน X โดยที่พาหะที่มีประจุบวกเช่น โฮล (HOLE) ในสารกึ่งตัวนำแบบที (P-TYPE SEMICONDUCTOR) ก็วิ่งไปในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้า แต่ถ้าเป็นพาหะที่มีประจุลบ เช่น อิเล็กตรอน (ELECTRON) ในแผ่นสารที่สมมติเป็นตัวนำทางไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด

เอ็น (N-TYPE SEMICONDUCTOR) พาหะที่มีประจุลบจะวิ่งในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้า ดังนั้น เมื่อนำแผ่นสารตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านไปวางในสนามแม่เหล็ก \vec{B}_z ซึ่งมีทิศทางตามแนวแกน Z ก็เสมือนปล่อยให้พาหะที่นำประจุวิ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว \vec{U}_x และมีทิศทางตามแนวแกน X จึงเกิดแรงลอเรนซ์ (LORENTZ FORCE) กระทำต่อพาหะเนื่องจากสนามแม่เหล็กดังสมการ (3.1)

$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{U}_x \times \vec{B}_z \quad (3.1)$$

หรือขนาดของแรงลอเรนซ์จะมีค่า

$$F_L = e \cdot U_x \cdot B_z \quad (3.2)$$

เมื่อ F_L คือขนาดของแรงลอเรนซ์ (MAGNITUDE OF LORENTZ FORCE)

e คือประจุของอิเล็กตรอน (ELECTRON CHARGE)

U_x คือความเร็วของอิเล็กตรอน (ELECTRON VELOCITY) ตามแนวแกน X

ทิศทางของแรงลอเรนซ์ F_L จะเป็นไปตามกฎสกรูเกลียวขวา (RIGHT-HAND SCREW RULE) ดังนตามรูปที่ 3.1 แรงนี้มีทิศทางลงตามแนวแกน Y(-) หมายความว่าอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะตัวนำประจุลบของแผ่นสารตัวนำจะถูกแรงลอเรนซ์ผลักลงมาสะสมบริเวณขอบตัวนำด้านล่าง ทำให้ขอบด้านล่างของตัวนำมีประจุลบจำนวนมาก จึงเกิดความต่างศักย์คร่อมแผ่นสารกึ่งตัวนำตามแนวแกน Y เราจะเรียกความต่างศักย์นี้ว่าแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์ (HALL VOLTAGE) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ V_h มีขั้ว (POLARITY) ดังแสดงในรูป 3.1

ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีประจุลบสะสมมากขึ้นแต่เนื่องจากความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นทำให้มีสนามไฟฟ้าต้านการวิ่งของอิเล็กตรอนซึ่งจะมาสะสมที่ขอบด้านล่าง ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนที่จะวิ่งมาสะสมขอบด้านล่างจะลดน้อยลงตามลำดับ จนในที่สุดจะอยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งแรงลอเรนซ์ F_L กับแรงที่เกิดจากสนามความต่างศักย์ของฮอลล์ V_h จะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือจะไม่มอิเล็กตรอนลงมาสะสมขอบด้านล่างเพิ่มอีก จึงทำให้ V_h คงที่เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก B_z และกระแสที่ไหลผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำคงที่

ถ้าให้ E_h เป็นสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ของขั้วล เราจะได้ความสัมพันธ์

$$E_h = \frac{V_h}{a} \quad (3.3)$$

เมื่อ a คือความกว้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูป 3.1 แรงไฟฟ้าจากความต่างศักย์ V_h หรือสนามไฟฟ้า E_h ซึ่งกระทำต่อพาหะที่นำประจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำจะหาได้จากสมการ (3.4)

$$F_y = e \cdot E_h \quad (3.4)$$

เมื่อ F_y คือแรงจากสนามไฟฟ้า E_h ซึ่งมีขนาดเท่ากับแรงลอเรนซ์ F_L เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้น จากสมการ (3.1) และ (3.4) จะได้

$$\begin{aligned} e \cdot E_h &= e \cdot U_x \cdot B_z \\ \text{เพราะฉนั้น} \quad E_h &= U_x \cdot B_z \end{aligned} \quad (3.5)$$

ถ้าให้ J_x เป็นความเข้มของกระแสไฟฟ้า (CURRENT DENSITY) ตามแนวแกน X และ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของแผ่นสารกึ่งตัวนำตามแนวแกน X จะได้

$$J_x = \frac{I_c}{A} = \frac{I_c}{at} \quad (3.6)$$

เมื่อ I_c เป็นกระแสไฟฟารวม (TOTAL CURRENT) ตามแนวแกน X ซึ่งจะเรียกว่ากระแสควบคุม (CONTROL CURRENT) และ t เป็นความหนาของแผ่นสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูป 3.1 ถ้าให้ n เป็นความหนาแน่นของพาหะ (MAJORITY CARRIER DENSITY) ความเข้มของกระแสไฟฟ้าจะหาได้จาก

$$J_x = e \cdot n \cdot U_x \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.6) และ (3.7) จะได้

$$e \cdot n \cdot U_x = \frac{I_c}{at}$$

เพราะฉนั้น

$$U_x = \frac{I_c}{at} \cdot \frac{1}{en} \quad (3.8)$$

แทนค่า U_x จากสมการ (3.8) ลงในสมการ (3.5) จะได้

$$E_h = \frac{1}{en} \cdot \frac{I_c}{at} \cdot B_z \quad (3.9)$$

และจากสมการ (3.3) และ (3.9) จะได้

$$V_h = \frac{1}{en} \cdot \frac{I_c}{t} \cdot B_z \quad (3.10)$$

หรือ

$$V_h = \frac{R_h \cdot I_c \cdot B_z}{t} \quad (3.11)$$

เมื่อ $R_h = 1/en$ ซึ่งจะเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (HALL COEFFICIENT) และจาก ELECTRON MOBILITY $\mu_n = \frac{1}{en\rho}$ เมื่อ ρ คือค่าความต้านทาน (RESISTIVITY) ดังนั้นจะได้

$$R_h = \frac{1}{en} = \mu_n \cdot \rho \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.11) ถ้า V_h มีหน่วยเป็น mV, B มีหน่วยเป็น V.sec/m² (หรือ TESLA), I_c มีหน่วยเป็น mA และ t มีหน่วยเป็น m ดังนั้นจะได้ R_h มีหน่วยเป็น m³/A.sec และเนื่องจาก R_h ถือว่าคงที่สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำอนึ่งๆ ดังนั้นจากสมการ (3.12) อาจเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$V_{ho} = K_{bo} \cdot I_c \cdot B \quad (3.13)$$

เมื่อ V_{ho} คือแรงดันวงจรมืดของแผ่นสารกึ่งตัวนำมีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์ (mV) และ K_{bo} คืออัตราส่วน $\frac{R_h}{t}$ ซึ่งจะมีค่าคงที่สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำอนึ่งๆ เราจะเรียก K_{bo} ว่าค่าความไวสัญญาณวงจรมืด (OPEN-CIRCUIT SENSITIVITY) ของแผ่นสารกึ่งตัวนำอนึ่งๆ จากสมการ (3.13) จะได้ K_{bo}

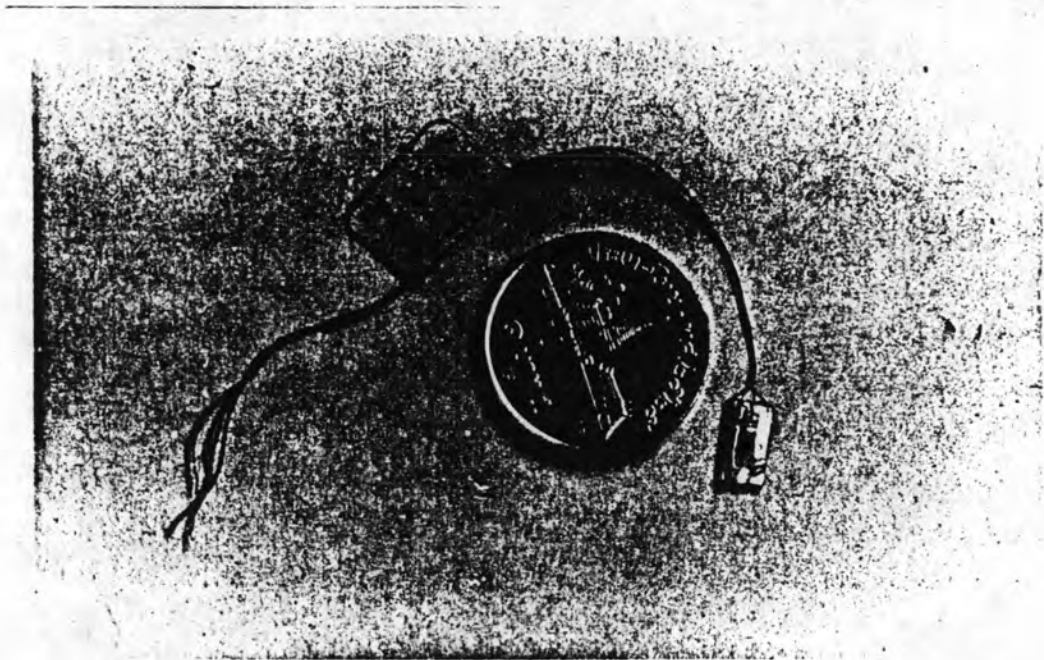
มีหน่วยเป็น V/A.T ดังแสดงในสมการ (3.14)

$$K_{bo} = \frac{V_h}{I_c \cdot B} \quad (3.14)$$

จากสมการ (3.13) จะเห็นว่าค่าความต่างศักย์ของฮอลล์แปรผันตามผลคูณของค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก B (MAGNETIC FLUX DENSITY) และกระแสไฟฟ้าควบคุม I_c ที่ไหลผ่านแผ่นสารของฮอลล์ และเมื่อแผ่นสารของฮอลล์สามารถให้อาพทพทซึ่งเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า เราจึงอาจเรียกแผ่นสารของฮอลล์ว่า ฮอลล์เยนเนอเรเตอร์ (HALL-GENERATOR)

3.3 คุณสมบัติของแผ่นสารของฮอลล์ (PROPERTIES OF THE HALL ELEMENT) (4,6)

ในระยะหลังๆนี้ได้มีการพิจารณานำสารกึ่งตัวนำมาทำแผ่นสารของฮอลล์ สารกึ่งตัวนำจำพวก เยอรมันเนียม (GERMANIUM-Ge), ซิลิกอน (SILICON-Si), อินเดียมอาร์เซไนด์ (INDIUM ARSENIDE-InAs) และอินเดียมแอนติโมนิไนด์ (INDIUM ANTIMONIDE-InSb) มีข้อดีเกี่ยวกับความไวต่อสัญญาณ (SENSITIVITY), เสถียรภาพด้านอุณหภูมิ (THERMAL STABILITY) และคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป แต่กระบวนการผลิตใหม่ๆทำให้สามารถจำกัดผลของอุณหภูมิ (THERMAL EFFECTS) และการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานอินพุท (INPUT RESISTANCE) ที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กค่าต่างๆให้ต่ำลง ที่สำคัญที่สุดคือการพัฒนากระบวนการผลิตแบบ DEPOSIT COATING ทำให้อายุของฮอลล์มีขนาดเล็กลง และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (GALVANOMAGNETIC SENSITIVITY) เพิ่มมากขึ้น รูป 3.2 แสดงขนาดของฮอลล์เยนเนอเรเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้เปรียบเทียบกับขนาดของเหรียญบาท



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดของ HALL-GENERATOR TYPE SV110-II ของ SIEMENS ที่ใช้ในการวิจัย

จากสมการ (3.11) และ (3.12) จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ CARRIER MOBILITY ของสารกึ่งตัวนำ ตาราง 3-1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ Si และ Ge กับสารพวก INTERMETALLIC COMPOUND อื่นๆ ได้แก่ InSb, InAsP และ InAs จากตารางที่ 3.1 นี้จะเห็นว่า InSb มี MAJORITY CARRIER MOBILITY สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ InAsP, Ge และ Si ตามลำดับซึ่ง ELECTRON MOBILITY ของสารพวก INTERMETALLIC COMPOUND จะมากกว่าของ Ge อยู่ประมาณ 10 ถึง 20 เท่า และจากสมการ (3.12) และ (3.13) เราได้

$$K_{bo} = \frac{R_h}{t} = \frac{\rho \cdot \mu_n}{t} \quad (3.15)$$

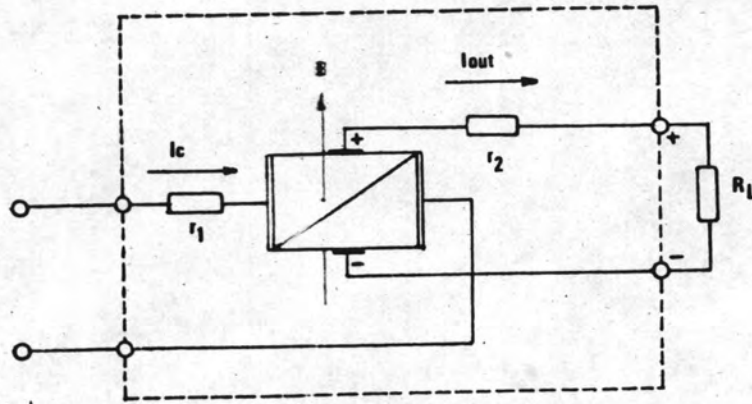
นั่นก็คือ เมื่อค่าของ μ สูงขึ้นจะได้อาคความไวสัญญาณ (SENSITIVITY) ของแผ่นสารของฮอลล์สูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลในการเลือก HALL-GENERATOR ที่ทำจากสารพวก INTERMETALLIC COMPOUND มาใช้เป็นตัวควบคุมสัญญาณแทนพวก Ge หรือ Si อย่างไรก็ตามเนื่องจาก Ge และ Si มีราคาต่ำกว่าสารพวก INTERMETALLIC COMPOUND มากดังนั้นในบางกรณีจึงเลือกใช้พวก Si หรือ Ge แทน เช่นในวงจรที่ไม่ต้องการค่าความไวสัญญาณวัดสูงนักและมีค่าโวลตจอิมพีแดนซ์สูงมากๆ

MATERIAL	ENERGY GAP (eV)	MOBILITY (ที่ 300° K) (m / V.sec)	
		ELECTRON	HOLE
Si	1.10	0.14	0.05
Ge	0.68	0.38	0.19
InAs	0.35	2.00	0.02
InAsP	----	3.50	----
InSb	0.18	7.00	0.12

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า CARRIER MOBILITY ของสารกึ่งตัวนำ

3.3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออุปกรณ์ฮอลล์เอฟเฟ็ค (TEMPERATURE DEPENDENCE OF HALL-EFFECT DEVICE)

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อฮอลล์เอฟเฟ็คเป็นเนอเรียเตอร์ส่วนมากแล้วจะไม่เป็นเชิงเส้น (NONLINEAR) มีผลทำให้ค่าแรงดันเอาพุทของฮอลล์เปลี่ยนแปลง ซึ่งเนื่องมาจากสองแฟคเตอร์คือ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ แรงดันวงจรเปิดของฮอลล์ กับสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (TEMPERATURE COEFFICIENT) β และผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานภายในซึ่งอยู่ในรูปของสมการความต้านทานภายในของแผ่นสารของฮอลล์ (HALL INTERNAL RESISTANCE- r) กับสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ α



รูปที่ 3.3 วงจรเทียบเคียงของ ฮอลล์เซ็นเซอร์ แสดงวงจรอินพุต, เอาท์พุทและความต้านทานภายในคานอินพุทและเอาท์พุท (CONTROL-SIDE AND HALL-SIDE INTERNAL RESISTANCE)

ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ β และ α มีหน่วยเป็น $\%/^{\circ}\text{K}$ สามารถนิยามได้ด้วยสมการ (3.16)

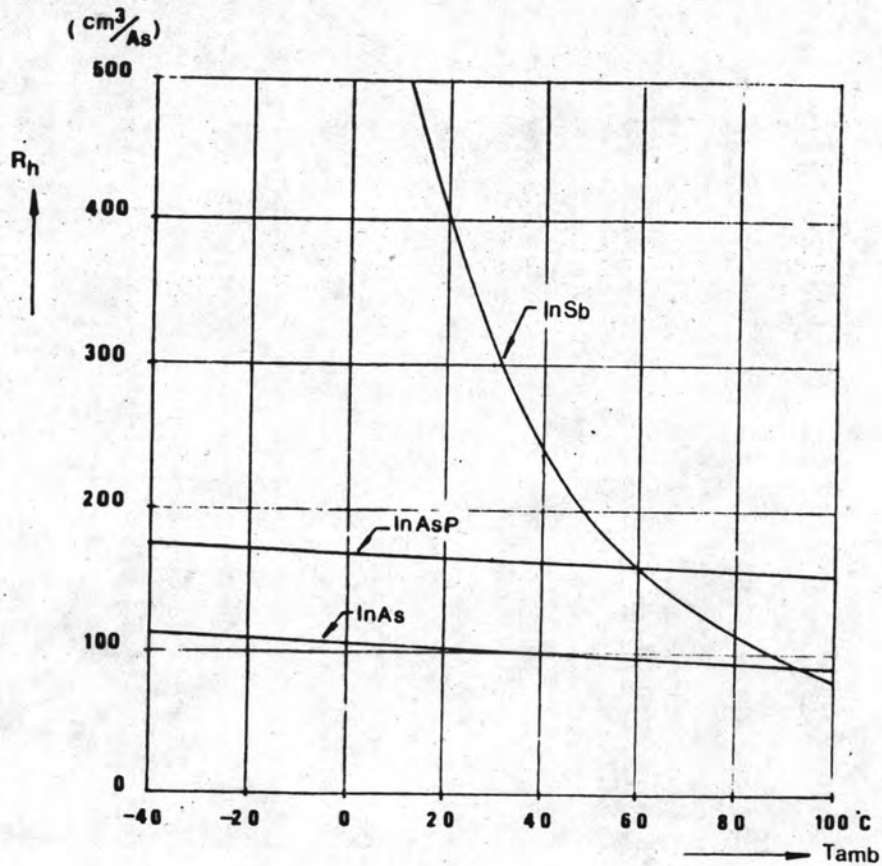
และ (3.17)

$$\beta = \frac{100}{V_{ho}(T_0)} \cdot \frac{\Delta V_{ho}}{\Delta T} \quad (3.16)$$

$$\alpha = \frac{100}{r \cdot (T_0)} \cdot \frac{\Delta r}{\Delta T} \quad (3.17)$$

ตามปกติของผลของค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (TEMPERATURE COEFFICIENT) β และ α จะให้มาโดยบริษัทผู้ผลิต ฮอลล์เซ็นเซอร์

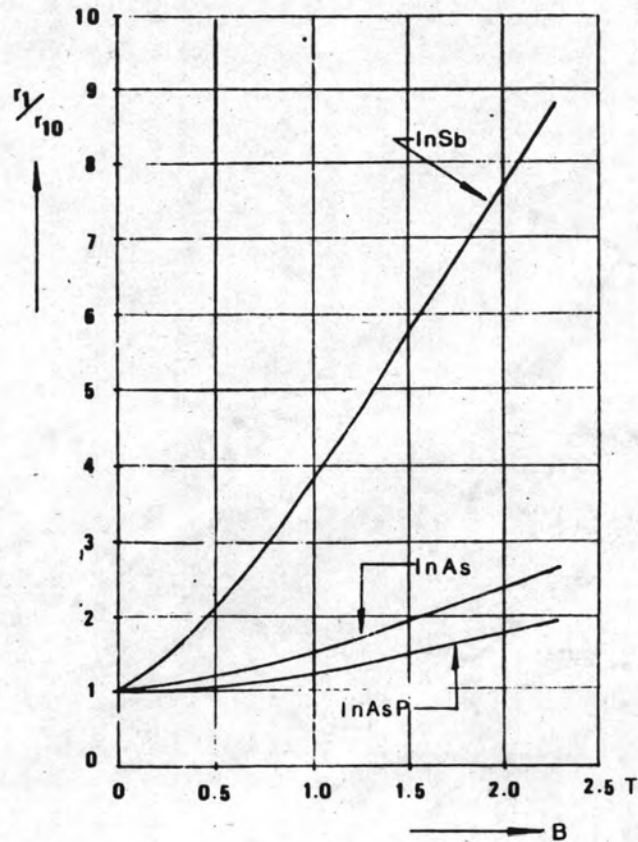
จากสมการ (3.11) จะเห็นว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_h) เปลี่ยนแปลงจะเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุทของฮอลล์ รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ทำจากสาร InSb, InAsP และ InAs



รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า R_h เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อม (AMBIENT TEMPERATURE) T_{amb} ของสารกึ่งตัวนำ InSb, InAsP และ InAs

3.3.2 ผลของสนามแม่เหล็กที่ต่อค่าความต้านทานภายในของ ฮอลล์เซ็นเซอร์ (8,10)

จากการทดลอง ฮอลล์เซ็นเซอร์ซึ่งมีความต้านทานที่เหมาะสมต่อขั้วทางด้านขั้ว
 เอาท์พุท (HALL-SIDE TERMINAL) เพื่อให้ได้ค่าแรงดันเอาท์พุทเป็นเชิงเส้น พบว่าเมื่อจ่ายกระแส
 ควบคุม I_c เข้าทางด้านขั้วกระแสควบคุมของฮอลล์เซ็นเซอร์ (CONTROL-SIDE TERMINAL)
 โดยแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ (CONSTANT VOLTAGE SOURCE) ค่าความต้านทานอินพุท r_1 จะเพิ่ม
 ขึ้นเมื่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก B เพิ่มขึ้น ทำให้กระแส I_c ลดลงเป็นผลให้ค่าแรงดันเอาท์พุท
 ของฮอลล์ลดลงจากค่าที่ควรจะเป็น

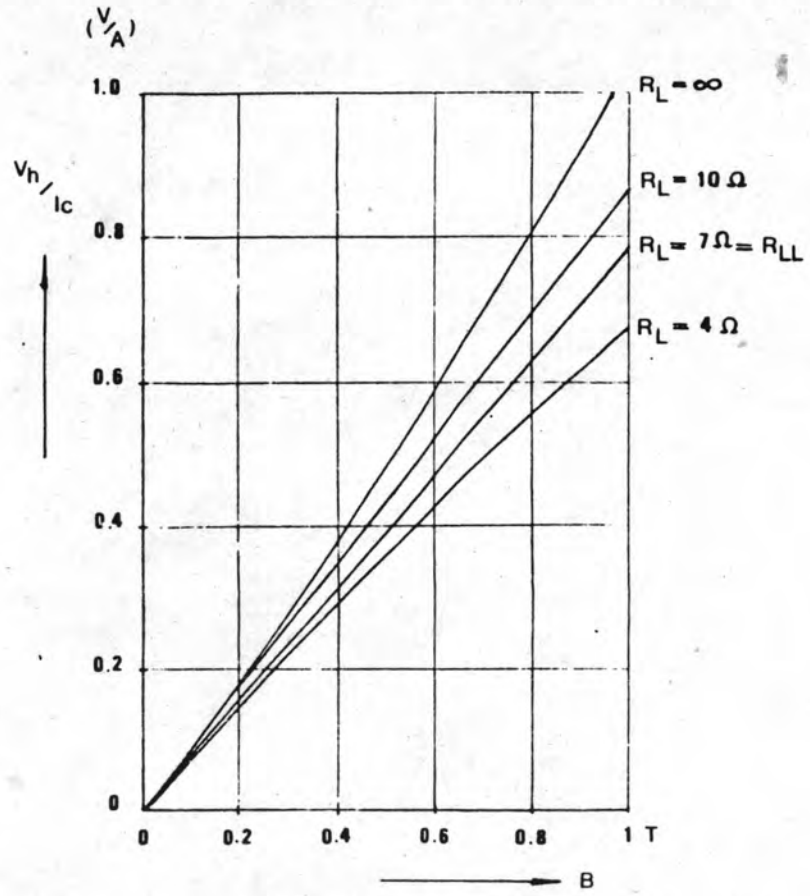


รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในของฮอลล์เซ็นเซอร์ เนื่องจากสนามแม่เหล็ก

รูป 3.5 เป็นเส้นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน r_1/r_{10} (r_{10} คือค่าความต้านทานภายในอินพุต r_1 ที่ค่า $B=0$) ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B ของฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ทำจากสารต่างชนิดกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่ากระแส I_c คงที่อาจทำได้โดยการใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ (CONSTANT CURRENT SOURCE) จ่ายกระแส I_c ให้กับ ฮอลล์เซ็นเซอร์ ผลที่ได้คือค่าของกระแสควบคุมที่ไหลผ่าน ฮอลล์เซ็นเซอร์จะคงที่ตลอดเวลาไม่ว่าค่า r_1 จะเปลี่ยนแปลงไปเท่าใดก็ตาม นั่นคือ I_c จะคงที่ตลอดทุกๆค่าของ $B=0$ จนถึง B

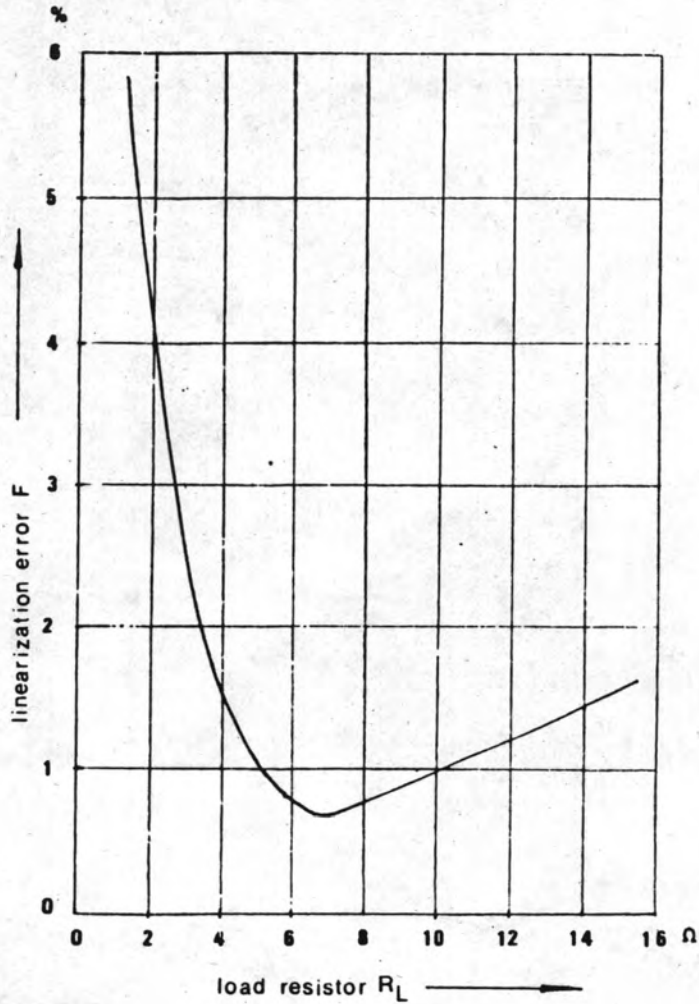
3.3.3 ค่าความต้านทาน โหลดที่เหมาะสมของสัญญาณเอาต์พุตในย่านสนามแม่เหล็ก B โคจร (8, 10)

จากการทดลองพบว่า ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุต (LINEARIZATION OF OUTPUT SIGNAL) ในย่านสนามแม่เหล็ก B ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ จนถึงค่า B โคจร จะมีความสัมพันธ์กับความต้านทาน โหลด r_2 ในขอลลเย็นเนอเรเตอร์ซึ่งทำจากสารต่างชนิดกัน หรือมีขนาดโครงสร้างต่างกันจะมีค่าความต้านทาน โหลดที่เหมาะสมค่าหนึ่งซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นมากที่สุด (OPTIMUM LINEARITY) ซึ่งในที่นี้เราจะให้สัญลักษณ์เป็น R_{LL} (OPTIMUM TERMINAL LOAD RESISTANCE FOR LINEARIZATION) รูป 3.6 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุตของขอลลซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B เมื่อมีค่ากระแสควบคุม I_c คงที่ ทดค่าความต้านทาน โหลด R_L ค่าต่างๆ ของขอลลเย็นเนอเรเตอร์ จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง V_h และ I_c (I_c คงที่) จะมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดที่เฉพาะค่าความต้านทาน โหลด R_{LL} และรูป 3.7 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น F_{lin} (LINEARIZATION ERROR) ของแรงดันไฟฟ้าของขอลลกับความต้านทาน โหลดค่าต่างๆ



รูปที่ 3.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าของขอลลในฟังก์ชันของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B ทดค่าความต้านทาน โหลดค่าต่างๆ

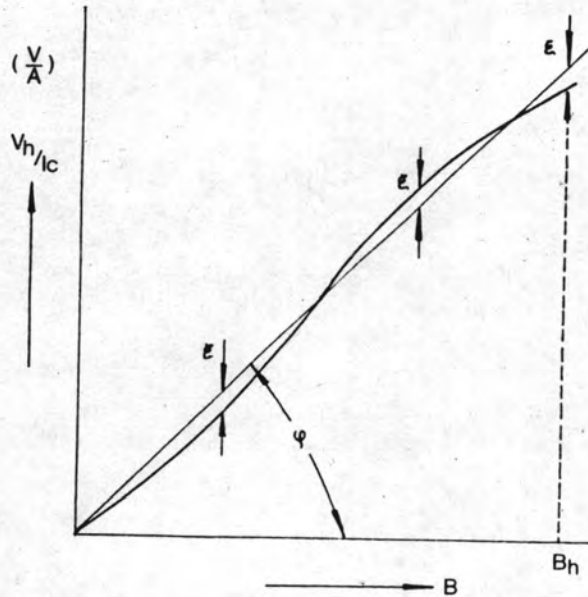
ของฮอลล์เซ็นเนอเรเตอร์ (SIEMENS TYPE FA24 HALL-GENERATOR)



รูปที่ 3.7 แสดงเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเชิงเส้นของฮอลล์เซ็นเนอเรเตอร์ (SIEMENS TYPE FA24 HALL-GENERATOR)

พิจารณาสมการ (3.14) เส้นกราฟในรูป 3.6 ก็คือค่าความไวสัญญาณ (SENSITIVITY) ของฮอลล์เซ็นเนอเรเตอร์นั่นเอง และเส้นกราฟที่ค่า $R_L = \infty$ ก็คือค่าความไวสัญญาณวงจรเปิด K_{bo} (OPEN-CIRCUIT SENSITIVITY) และเราจะเรียกเส้นกราฟที่ค่า $R_L = R_{LL}$ ว่าค่าความไวสัญญาณแมตซ์เชิงเส้น (LINEAR-MATCHING SENSITIVITY)

จากการทดลองยังพบว่า แม้ในเส้นกราฟของแรงดันเอาทพุท ของฮอลล์แมทซึ่งด้วยค่าความต้านทานโหลด: RLL ก็ยังไม่เป็นเชิงเส้นอย่างแท้จริง ในการพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้น (NONLINEARTITY) ทำได้โดยลากเส้นตรงผ่านกราฟแรงดันเอาทพุทของฮอลล์ในย่านสนามแม่เหล็กที่คงการ ($B = 0$ ถึง B_h) โดยให้ค่าประมาณของความเบี่ยงเบนสูงสุด ϵ_{max} (MAXIMUM DEVIATION) มีขนาดเท่ากันทั้งด้านบนและด้านล่างของ เส้นตรงที่ลากผ่านกราฟนั้น ดังแสดงในรูป 3.8

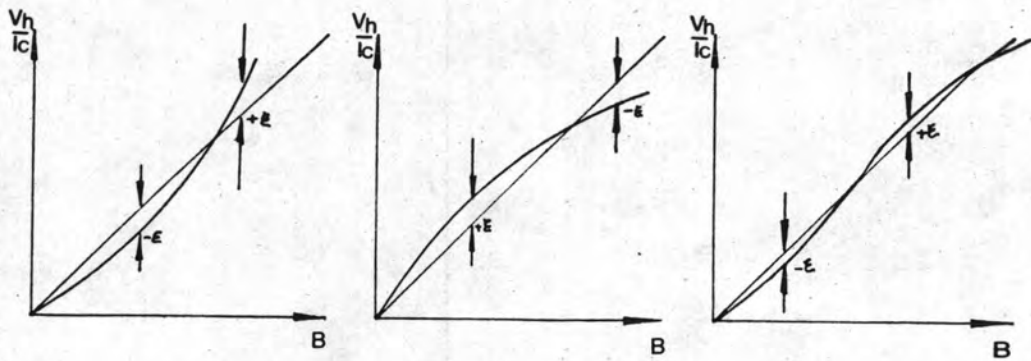


รูปที่ 3.8 แสดงเส้นอุดมคติ (IDEAL CURVE) ของอุปกรณ์ฮอลล์เอฟเฟ็คและความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น (LINEARIZATION ERROR)

ค่าคลาดเคลื่อนเชิงเส้น F_{lin} (LINEARIZATION ERROR) ในย่านที่ทำการวัดอาจหาได้จากสมการ (3.18)

$$F_{lin} = \frac{\epsilon_{max}}{K_{lin} \cdot B_h} \quad \text{เมื่อ} \quad K_{lin} = \tan \varphi \quad (3.18)$$

ค่าคลาดเคลื่อนเชิงเส้นค่าสคณจะนำมาใช้พิจารณาเพื่อกำหนดค่าของ RL ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูป 3.9⁽⁸⁾



ก) R_L สูงเกินไป ข) R_L ต่ำเกินไป ค) ค่า R_L ที่เหมาะสม

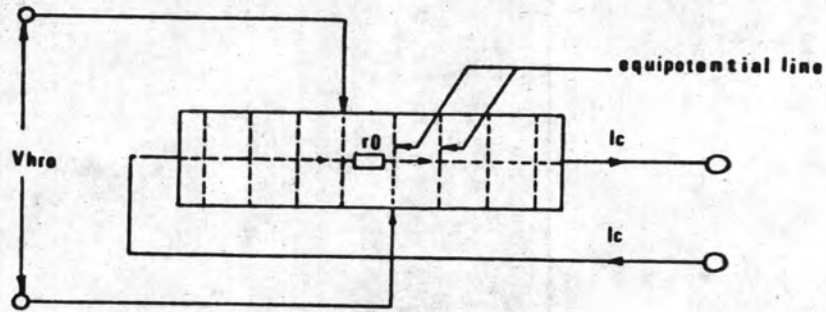
รูปที่ 3.9 การเลือกค่า R_L ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อาตพหุหาคะสมมติเป็นเชิงเส้นมากที่สุด

3.3.4 ความต้านทานซีโรคอมโพเนนท์ r_0 (ZERO COMPONENT RESISTANCE) ^(4,8)

ตามปกติแผ่นสารของฮอลล์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำจะมีขนาดเล็กมาก โดยจะถลอกแบบใหม่ทิศทางของกระแสควม I_c ไหลผ่านไปตามความยาวของแผ่นสารและมีจุดสัมผัสต่อสายนำสัญญาณเอาตพหุของฮอลล์ตรงกึ่งกลางทั้งสองด้านของแผ่นสาร แต่เนื่องจากการผลิต การต่อจุดสัมผัสเอาตพหุไม่สามารถทำให้จุดสัมผัสทั้งสองอยู่ในแนวเส้นความต่าศักย์เดียวกันได้ (EQUIPOTENTIAL LINE) จึงเสมือนมีความต้านทาน r_0 ต่ออยู่ระหว่างจุดสัมผัสทั้งสองดังแสดงในรูป 3.10 ดังนั้นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก $B=0$ ถ้าเราป้อนกระแสควม I_c เข้าทางด้านขั้วกระแสควม ก็ะปรากฏสัญญาณแรงดัน V_{hro} เนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทาน r_0 ที่ขั้วสัญญาณเอาตพหุของแผ่นสารดังสมการ (3.19)

$$V_{hro} = r_0 \cdot I_c \tag{3.19}$$

ซึ่งเราจะเรียก r_0 ว่าความต้านทานซีโรคอมโพเนนท์ (ZERO COMPONENT RESISTANCE) และเรียก V_{hro} ว่าแรงดันความต้านทานซีโรคอมโพเนนท์ของฮอลล์ (ZERO COMPONENT RESISTANCE HALL VOLTAGE)



รูปที่ 3.10 แสดงการเกิดแรงดันฮอลล์คอมโพเนนต์ของ HALL-GENERATOR ที่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $B = 0$ (เส้นความต่างศักย์ในภาพเป็นเส้นสมมุติ)

ค่าแรงดัน V_{hro} น้อยกว่าขนาดของกระแสควบคุม I_c ดังนั้นในการนำแผนสารของฮอลล์ไปใช้งานตามเครื่องมือวัดจึงจำเป็นต้องทดลองเพื่อหาค่าความต้านทาน r_0 และออกแบบวงจรภายนอกเพื่อชดเชย (COMPENSATE) ค่าแรงดัน V_{hro} นี้ให้เป็นศูนย์ที่ $B=0$

3.3.5 ฮอลล์คอมโพเนนต์อินดักแตนซ์ A_h (ZERO COMPONENT INDUCTANCE) (4, 8, 10)

จากการทดลองพบว่าสายความถี่ต่อจากจุดสัมผัสด้านขวาของแผ่นสารของฮอลล์จะอยู่ในลักษณะลูป (LOOP) ซึ่งมีขนาดพื้นที่ A_h จึงทำให้มีค่าอินดักแตนซ์เกิดขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นในกรณีของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลา จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (INDUCED VOLTAGE) ดังสมการ (3.20)

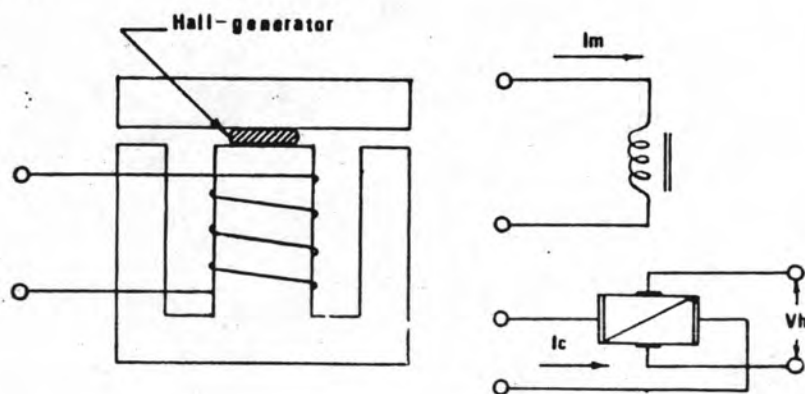
$$V_{hio} = A_h \cdot \frac{dB}{dt} \tag{3.20}$$

ขนาดคานอนพทของแผ่นสารของฮอลล์ ถึงแม้ว่าค่าของกระแสควบคุม I_c จะเป็นศูนย์ดังนั้นเราจะเรียก A_h ว่าฮอลล์คอมโพเนนต์อินดักแตนซ์ (ZERO COMPONENT INDUCTANCE) มีหน่วยเป็น cm^2 และเรียกแรงดันเหนี่ยวนำ V_{hio} ว่าแรงดันฮอลล์คอมโพเนนต์อินดักแตนซ์ (ZERO COMPONENT INDUCTANCE HALL VOLTAGE)

จากสมการ (3.20) จะเห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำ V_{h10} นี้ไม่ได้น้อยกว่าปริมาณของ Ah เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก B กับเวลาด้วย นั่นคือค่าแรงดัน V_{h10} จะเป็นฟังก์ชันของความถี่ของความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (MAGNETIC INDUCTION) การเดินสายเอาพุทของฮอลล์อย่างระมัดระวัง เพื่อให้สนามแม่เหล็กมีโอกาสตัดผ่านสายตัวนำน้อยที่สุดจะช่วยลดผลของ Ah ใหลคน้อยลง:

3.4 หลักการของฮอลล์เอฟเฟกต์ควัตตราานสควเซอร์ (HALL-EFFECT WALT TRANSDUCER)

จากสมการ (3.10) จะเห็นว่าความต่างศักย์ของฮอลล์ V_{ho} เป็นปริมาณโดยตรงกับค่าผลคูณชั่วขณะ (INSTANTANEOUS PRODUCT) ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B และกระแสควบคุม I_c ของฮอลล์เป็นเนอเรเตอร์ ดังนั้นเราจึงสามารถนำ ฮอลล์เป็นเนอเรเตอร์ มาใช้เป็นตัวคูณสัญญาณแบบแอนาล็อกเพื่อคูณปริมาณสองปริมาณ เมื่อปริมาณหนึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นสนามแม่เหล็ก และอีกปริมาณหนึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าได้ รูป 3.11 แสดงตัวคูณสัญญาณแบบฮอลล์ จะเห็นว่าความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กของแกนแม่เหล็ก (MAGNETIC CORE) จะเป็นปริมาณโดยตรงกับกระแส I_m ที่ไหลผ่านขดลวดของแกนแม่เหล็ก (จนกว่าแกนแม่เหล็กจะอิ่มตัว) ดังนั้นความต่างศักย์ของฮอลล์จะเท่ากับผลคูณของค่ากระแส I_c และ I_m กับค่าคงที่ (10, 11, 12)



รูปที่ 3.11 หลักการของตัวคูณสัญญาณแบบฮอลล์ (HALL-MULIPLIER)

จากหลักการข้างต้นพิจารณารูป 3.12 สำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีโหลดต่ออยู่ตามกระแส
 ความคม I_c ของฮอลล์เซ็นเซอร์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าในสาย V_L และสนามแม่
 เหล็กในแกนแม่เหล็กเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสโหลด I_L นั่นคือ

$$B \propto I_L$$

และ

$$I_c \propto V_L$$

จาก

$$P = V_L \cdot I_L$$

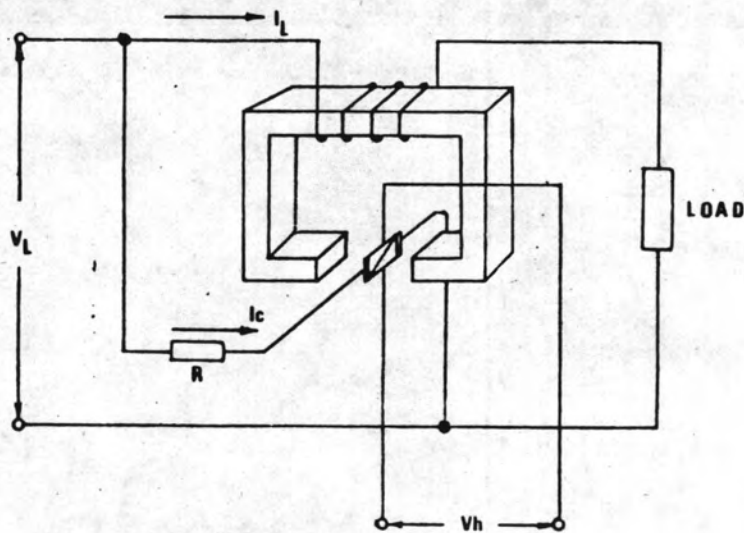
ดังนั้นจะได้

$$P \propto B \cdot I_c$$

นั่นคือจะได้แรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ใช้ไปในโหลด หรือ

$$P = K \cdot B \cdot I_c = K \cdot V_h$$

$$(3.21)$$



รูป 3.12 แสดงหลักการของฮอลล์เอฟเฟกต์วัตตราานฮอลล์ (HALL-EFFECT WATT TRANSDUCER)

จากรูป 3.12 ถ้าเป็นวงจรกระแสสลับที่มีกระแสชั่วขณะไหลผ่านโหลดเป็น $i_L = I_m \cos \omega t$ ซึ่งเป็นกระแสตัวเดียวกันกับกระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็กจะได้แรงเหนี่ยวนำแม่เหล็กชั่วขณะ (INSTANTANEOUS MAGNETIC INDUCTION) เป็น

$$B_i = B_m \cos(\omega t + \delta_1) \quad (3.22)$$

เมื่อ δ_1 เป็นมุมของเฟสชิฟต์ (PHASE SHIFT) เนื่องจากฮิสเทอรีซิส (HYSTERESIS) ของแกนแม่เหล็กและ B_m เป็นค่าแรงเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงสุดเนื่องจากกระแส I_m และค่าแรงดันชั่วขณะ (INSTANTANEOUS VOLTAGE) ทครอมโหลดเป็น

$$v_L = V_m \cos(\omega t + \psi) \quad (3.23)$$

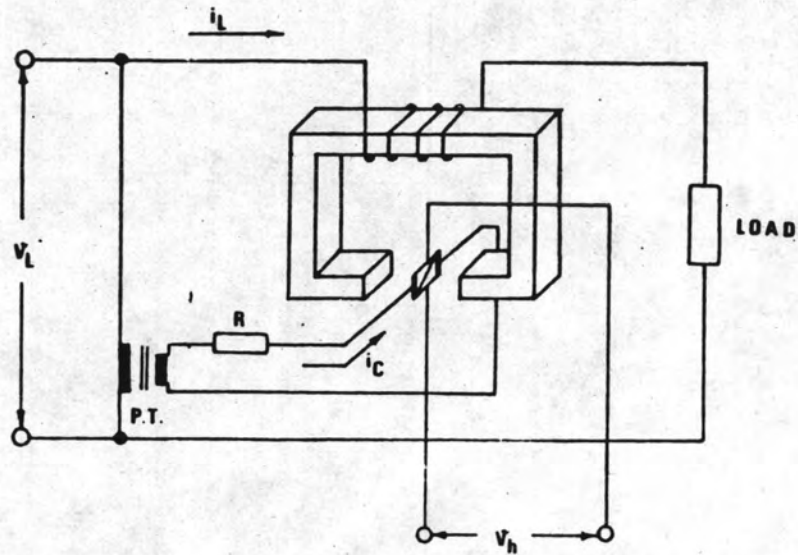
เมื่อ ψ เป็นมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสโหลด จะได้กระแสควบคุมที่ไหลผ่าน ฮอลล์เซ็นเซอร์เตอร์ เป็น

$$i_c = I_{cm} \cos(\omega t + \psi) \quad (3.24)$$

จากสมการ (3.22) และ (3.24) จะเห็นว่าถ้าให้ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะเป็นผลคูณของสองสมการนี้จะมีค่าผิดพลาดเนื่องจากความม δ_1 ซึ่งค่า δ_1 นี้ไม่สามารถขจัดออกไปได้ แต่สามารถจะขจัดเสียได้โดยการเลื่อนมุมเฟสของสมการ (3.24) ไปใหม่ค่าเท่ากับ δ_1 (6,13)

จากรูป 3.13 ถ้าเราต่อหม้อแปลงแรงดัน (POTENTIAL TRANSFORMER) ครอบมแรงดันซึ่งมีค่าตามสมการ (3.23) จะได้ค่ากระแสควบคุมของ ฮอลล์เซ็นเซอร์เตอร์ เนื่องจากแรงดันดาดตาของหม้อแปลงแรงดัน เป็น

$$i_c = I_{cm} \cos(\omega t + \psi + \delta_2) \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.13 ฮอลล์เอฟเฟกต์วัดทรานส์ฟอเมอร์ที่ใช้หม้อแปลงแรงดันชนิดเซย์เฟสซีฟท์เนื่องจากฮีสเตอร์ซีส์ของแกนแม่เหล็ก

เมื่อ δ_2 เป็นมุมเฟสเนื่องจากฮีสเตอร์ซีส์ของหม้อแปลงแรงดัน จากสมการ (3.11), (3.22) และ (3.25) จะได้

$$V_h = \frac{R_h}{t} I_{cm} \cos(\omega t + \varphi + \delta_2) \cdot B_m \cos(\omega t + \delta_1) \quad (3.26)$$

จาก $2\cos\alpha\cos\beta = \cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$

ดังนั้นจากสมการ (3.26) จะได้

$$V_h = \frac{R_h \cdot I_{cm} \cdot B_m}{t} \cdot \frac{1}{2} \left[\cos(\omega t + \varphi + \delta_2 + \omega t + \delta_1) + \cos(\omega t + \varphi + \delta_2 - \omega t - \delta_1) \right]$$

หรือ

$$V_h = K_1 I_c \cdot B \left[\cos(2\omega t + \varphi + \delta_2 + \delta_1) + \cos(\varphi + \delta_2 - \delta_1) \right] \quad (3.27)$$

เมื่อ K_1 เป็นค่าคงที่, I_c และ B เป็นค่าประสิทธิภาพของกระแสควบคุม และความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตามลำดับ

จากสมการ (3.27) จะเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮอลล์จะประกอบด้วย สอง ส่วนคือ ส่วนประกอบ AC (AC COMPONENT) คือ $K_1 \cdot I_c \cdot B \cos(2\omega t + \varphi + \delta_2 + \delta_1)$ และส่วนประกอบ DC (DC COMPONENT) คือ $K_1 \cdot I_c \cdot B \cos(\varphi + \delta_2 - \delta_1)$ และจากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าประสิทธิภาพ (EFFECTIVE POWER) จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ DC ของกำลังไฟฟ้าขณะ คำนวณจากสมการ (3.27) เมื่อ I_c และ B เป็นปริมาณโดยตรงกับค่าประสิทธิภาพของแรงดันโหลด V_L และกระแสโหลด I_L ตามลำดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮอลล์ จะมีส่วนประกอบ DC เป็น

$$V_h = K_2 \cdot V_L \cdot I_L \cos(\varphi + \delta_2 - \delta_1) \quad (3.28)$$

เมื่อ K_2 เป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าของ V_h ตามสมการ (3.28) ในทางปฏิบัติอาจหาได้โดยใช้ ตัวกรองชนิด ความถี่ต่ำผ่านกรองเอาส่วนประกอบ AC ที่เป็นสัญญาณความถี่ออกจากสมการ (3.27)

จากสมการ (3.28) ถ้าเราออกแบบให้ δ_2 มีค่าเท่ากับ δ_1 จะได้

$$V_h = K_2 \cdot V_L \cdot I_L \cos \varphi \quad (3.29)$$

นั่นคือเราสามารถปรับเทียบ (CALIBRATE) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์ V_h ตามสมการ (3.29) ให้มีค่าเป็นวัตต์ (WATT) ได้โดยตรง

จากสมการที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดในบทนี้พอสรุปได้ว่า แนวทางในการออกแบบสร้างตัวคูณสัญญาณแบบฮอลล์จะต้องคำนึงถึงการชดเชยผลของอุณหภูมิต่อ ฮอลล์เซ็นเซอร์ และการออกแบบให้มีความผิดพลาดจากเฟสชิฟต์ (PHASE SHIFT ERROR) น้อยที่สุด รวมทั้งการชดเชยค่าความผิดพลาดอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป.