บทที่ 3

สร้างเครื่องมือ "ELECTROL"

3.1 สร้าง AIR CORE

3.1.1 การพัน COIL ชนิด AIR CORE

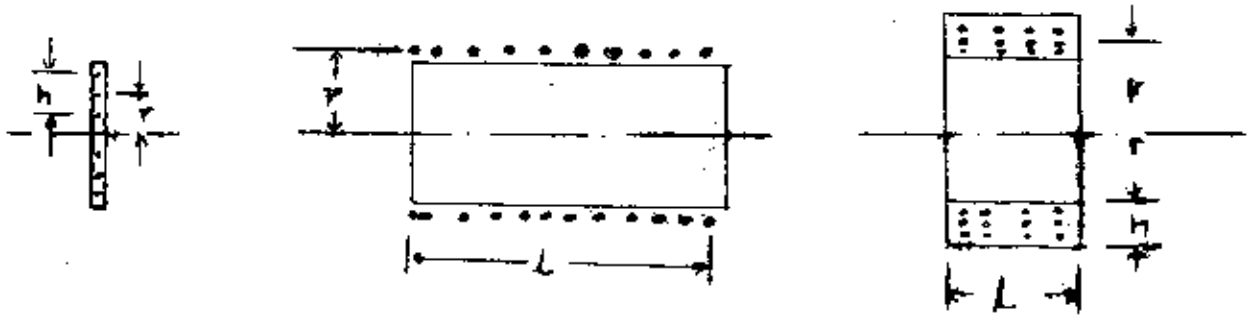
COIL ที่ใช้ใน COUPLING CIRCUITS เป็นแบบ INDUCTIVE AIR CORE โดยแบ่งออกเป็น 3 CORES ด้วยกัน คือ CORE NO.1, NO.2 และ CORE NO.3 CORE NO.1 ประกอบด้วย COILS L11, L21, L51 และ Lp1 CORE NO.2 ประกอบด้วย L12 L22, L52 และ Lp2 CORES ทั้งสองนี้พันเหมือนกัน และมี INDUCTANCE เท่ากันตามลำดับ จากรูปที่ 2.4 L5 คือ L51 ต่ออันดับกับ L52 ส่วน CORE NO.3 ประกอบด้วย L3 และ L4 เพื่อใช้ FEED BACK ของ signal เข้าทาง GRID ของ OSCILLATOR ตารางที่ 3.1 เป็นค่าของ INDUCTANCE ที่พันอยู่บน CORES ทั้งสามดังกล่าว

ตารางที่ 3.1 INDUCTANCE ของ AIR CORES

CORE NO.	INDUCTANCE IN MILLIHENRIES
1.	L11 = 2.00 ; L21 = 2.25 L51 = 1.00 ; Lp1 = 1.00
2.	L12 = 2.00 ; L22 = 2.25 L52 = 1.00 ; Lp2 = 1.00
3.	L4 = 0.25 ; L3 = 0.20

3.1.2 หลักการสร้าง AIR CORE [1]

การพัน COIL ที่ใช้นี้มีสองชนิดด้วยกันคือ เป็นแบบ SINGLE LAYER COIL และแบบ MULTIPLE LAYER COIL ตามรูปที่ 3.1 (b) และรูปที่ 3.1 (c) ส่วนรูปที่ 3.1 (a) เป็นแบบ FLAT COIL ไม่มีใช้ในการสร้างเครื่องมือนี้



(a) Flat Coil (b) Single Layer Coil (c) Multiple Layer Coil

รูปที่ 3.1 ชนิดของ AIR CORES

ค่าของ INDUCTANCE มีค่าต่าง ๆ กันตามสมการดังต่อไปนี้

(a) FLAT COIL $$L = \frac{r^2 n^2}{8r + 11h} \quad \text{..... (3.1)}$$

(b) SINGLE LAYER COIL $$L = \frac{r^2 n^2}{9r + 10l} \quad \text{..... (3.2)}$$

(c) MULTIPLE LAYER COIL $$L = \frac{0.8\, r^2 n^2}{6r+9l+10h} \quad \text{..... (3.3)}$$

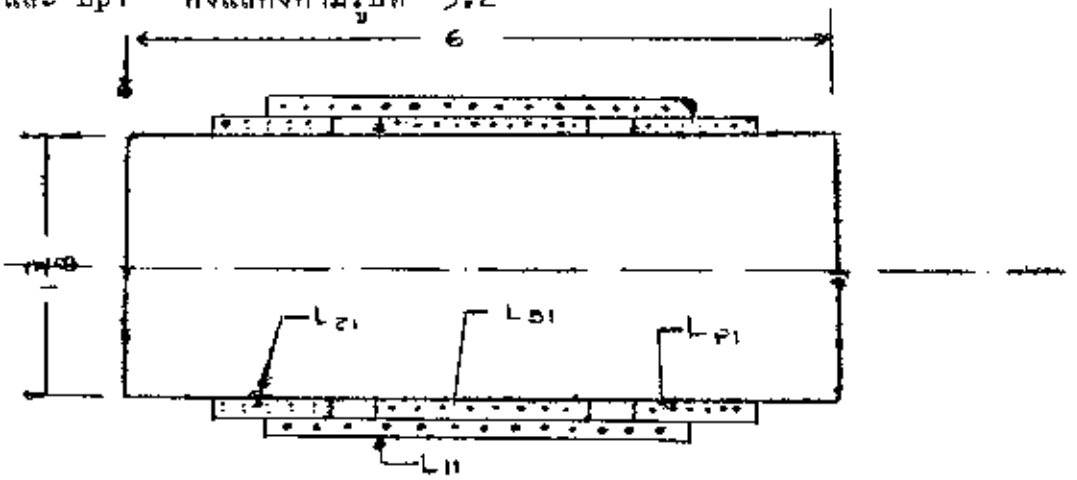
L = INDUCTANCE เป็น MICRO-HENRY
R = MEAN RADIUS ของ COIL เป็น INCHES
l = ความยาวของ COIL " INCHES
h = ความหนาของ COIL " INCHES

---

(1) TERMAN, Frederic Emmouse, Radio Engineers' Handbook pp.53 - 64.

3.1.3 ตำแหน่งของ COILS

AIR CORE NO.1 และ NO.2 ใช้ PAPER TUBE เป็นแกน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1\frac{3}{8}$ นิ้ว และยาวประมาณ $3\frac{1}{2}$ นิ้ว ตำแหน่งของ INDUCTANCE L11, L21; L51 และ Lp1 ดังแสดงตามรูปที่ 3.2



SCALE 1 : 1

รูปที่ 3.2 AIR CORE ของ CORE NO.1 และตำแหน่งของ INDUCTANCE

COILS เหล่านี้พันแบบ MULTIPLE LAYER COIL ใช้ CONDUCTOR NO.32 และใช้ PAPER กั้นระหว่างชั้นหนึ่ง ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้กระแส LEAK ระหว่างชั้นได้

วิธีพัน COIL ตอนแรกพัน COIL L21, L51 และ Lp1 ซึ่งอยู่ชั้นในก่อน คำนวณหา INDUCTANCE ตามสูตรของสมการ (3.2) และ (3.3) ไว้ให้ค่าสูงกว่าที่ต้องการ แล้วจึงทำการวัด INDUCTANCE ด้วย IMPEDANCE BRIDGE ถ้าค่า INDUCTANCE มากกว่าที่ต้องการ ก็ลดจำนวนรอบลงจนได้ค่า INDUCTANCE ตามต้องการ ตามตารางที่ 3.1

ส่วน CORE NO.2 ตำแหน่งของ INDUCTANCE เหมือนกันกับของ CORE NO.1 ทุกประการ

ตัวอย่าง การพัน COIL L11 = 2 MILLIMENRIES ; MULTIPLE LAYER COIL

CONDUCTOR NO.32 มี DIAMETER = 0.02 นิ้ว

$$r = \frac{1.35}{2} + 0.02 \times 2 = 0.715 \text{ นิ้ว}$$

$l = 2.00$ นิ้ว

$h = \frac{4}{100} \times 2 = 0.80$ นิ้ว

$n = 3 \times 125 = 375$ รอบ

(3.3) $$L11 = \frac{0.8 \times (0.715)^2 (375)^2}{6 \times 0.715 + 9 \times 2.00 + 10 \times 0.08}$$ MICRO-HENRY

$$= \frac{0.80 \times (0.51)\ (140,000)}{4.28 + 18 + 0.80}$$ "

$$= \frac{0.80 \times 0.51 \times 1.4 \times 10^5}{23.08}$$ "

$\therefore$ L11 = 2.47 MILLI-HENRIES

CORE NO.3 ใช้ Fiber tube เป็นแกน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว ยาว $1\frac{1}{2}$ นิ้ว พัน COIL L4 และ L3 COUPLING กันอย่างละครึ่ง

3.1.4 COIL SPECIFICATION

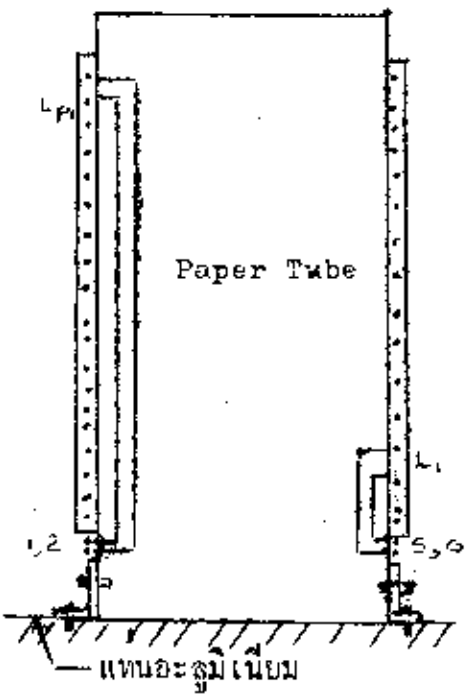
เพื่อเป็นการสะดวกในการต่อ COILS กับส่วนอื่น ๆ ของ CIRCUITS จึงเขียนตัวเลขเรียงกันตามลำดับจาก 1,2,3 .....จนถึง 8 ไว้ที่ฐานของแกนขดลวด โดยปล่อยปลายขดลวดแต่ละชุดออกมาข้างนอกดังรูปที่ 3.3 ตัวเลขที่ใช้กำกับปลายของขดลวดมีดังนี้

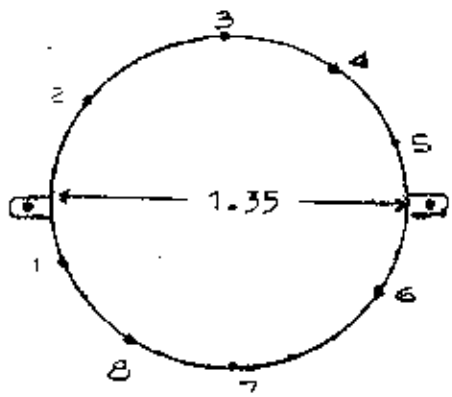
CORE NO.1 และ NO.2

Lp1, Lp2	ตำแหน่งบนสุด	กำกับด้วยเลข	1, 2
L51, L52	" กลาง	"	3, 4
L21, L22	" ล่าง	"	5, 6
L11, L12	" ชั้นนอก	"	7, 8

CORE NO.3

L3	ตำแหน่งชั้นนอก	กำกับด้วยเลข	1, 2
L4	" ชั้นใน	"	3, 4





ฐานของแกนขดลวด

รูปที่ 3.3 แสดงถึงตำแหน่งปลายขดลวดและตัวเลขกำกับของ CORE NO.1 และ NO.2

3.1.5 INDUCTANCE MEASUREMENT

ค่าของ INDUCTANCE ของ COILS ที่พันบน CORE ดังกล่าวสามารถวัดค่าได้โดยใช้ IMPEDANCE BRIDGE ที่อยู่ใน ELECTRONIC LAB. ของแผนกไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ นอกจากนั้นยังใช้วัดค่า RESISTANCE และ Q ด้วย ตารางที่ 3.2 เป็นผลจากการวัด inductance, resistance และ Q ที่ frequency 1 Kc.

ตารางที่ 3.2 ผลจากการวัด inductance, resistance และ Q ของ COILS

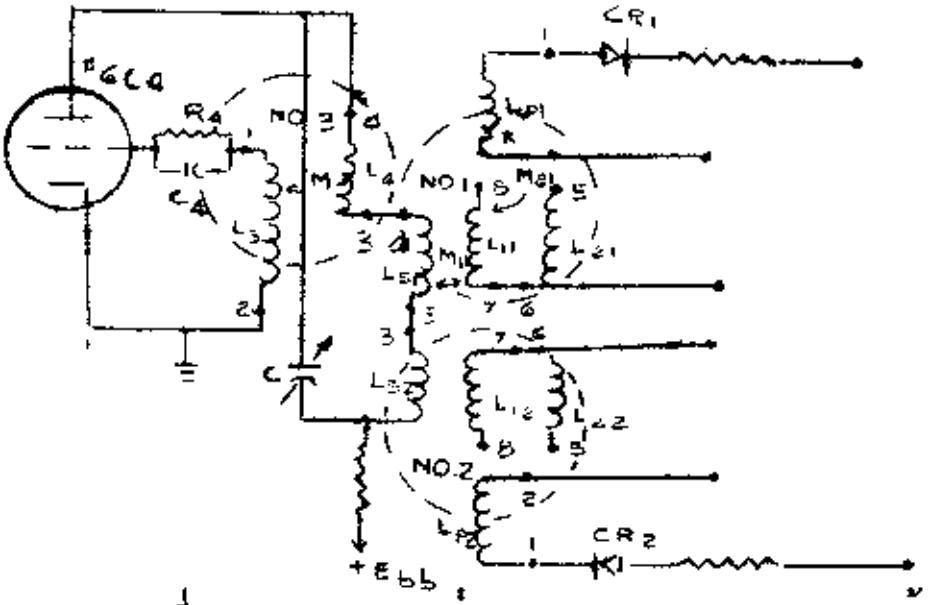
CORE NO.	INDUCTANCE (MILLIHENRIES)	RESISTANCE (OHMS)	Q	REMARKS
1	Lp1 = 1.00	5.60	0.62	วัดระหว่าง 1 - 2
	L51 = 1.00	5.84	0.80	" 3 - 4
	L21 = 2.25	8.90	1.70	" 5 - 6
	L11 = 2.00	12.60	0.85	" 7 - 8
2				
	Lp2 = 1.00	5.75	0.60	" 1 - 2
	L52 = 1.00	6.20	0.80	" 3 - 4
	L22 = 2.25	8.50	1.70	" 5 - 6
	L12 = 2.00	12.60	0.90	" 7 - 8
3	L3 = 0.20	2.50	0.30	" 1 - 2
	L4 = 0.260	7.80	0.26	" 3 - 4

3.1.6 COIL CONNECTION

การต่อ COILS เข้ากับส่วนอื่น ๆ ของ CIRCUITS ดังแสดงตามรูปที่ 3.4 COILS ที่ล้อมรอบด้วยวงกลมแต่ละวงจะพันอยู่บนแกนอันเดียวกัน จากรูปจะเห็นว่าCOILS แต่ละชุดต่างก็ Coupling ซึ่งกันและกันจะทำให้เกิด Mutaul inductance ดังนี้

CORE NO.3

M = Mutual inductance ระหว่าง L3 กับ L4



รูปที่ 3.4 แสดงการต่อปลายขดลวดของ COILS เข้ากับส่วนต่าง ๆ ของ Circuits.

CORE NO.1

M11 = MUTUAL inductance ระหว่าง L51 กับ L11

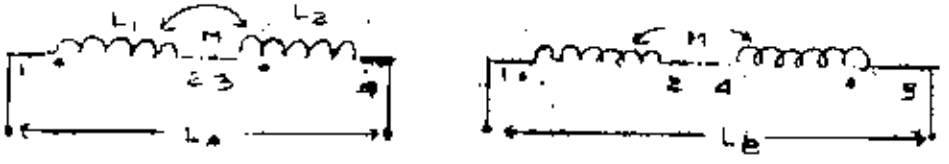
M21 = MUTUAL inductance " L11 " Lp1

M31 = MUTUAL inductance " L11 " L21

CORE NO.2

ในทำนองเดียวกัน M12, M22 และ M32 เป็น MUTUAL inductance ของ COIL L52 กับ L12, L12 กับ Lp2 และ L12 กับ L22 ตามลำดับ

3.1.7 MUTUAL INDUCTANCE MEASUREMENT



(a) Flux ตามกัน (b) Flux สวนกัน

รูปที่ 3.5 การต่อ COILS เพื่อใช้วัด Mutual Inductance

เมื่อต่อ COIL L_1 และ L_2 SERIES กันจะทำให้เกิด FLUX ตามกันตามรูปที่ 3.5(a) ถ้า INDUCTANCE ที่วัดได้เป็น L_A

$$L_A = L_1 + L_2 + 2M \quad \text{.....(3.4)}$$

และถ้าต่อให้ FLUX สวนกันตามรูปที่ 3.5 (b) วัดค่า INDUCTANCE ได้ L_B

$$L_B = L_1 + L_2 - 2M \quad \text{.....(3.5)}$$

จากสมการ (3.4) และ (3.5) จะหาค่าของ M ได้เมื่อวัด INDUCTANCE L_1, L_2, L_A และ L_B ด้วย IMPEDANCE BRIDGE วัด Mutual Inductance ได้ดังแสดงตามตารางที่ 3.3

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่า Mutual Inductance

ต้องการหาค่า M ของ CORE NO.3 ซึ่งมี L_3 และ L_4 COUPLING กัน INDUCTANCE L_4 = 0.264 Millihenry; L_3 = 0.20 Millihenry.

เมื่อเอา terminal 1 ต่อกับ terminal 3 ได้ FLUX ตามกันได้ L_A

$L_A = L_3 + L_4 + 2M = 0.705$ .....(3.6) และ terminal 2 ต่อกับ terminal 3 ได้ FLUX สวนกันได้ L_B

$L_B = L_3 + L_4 - 2M = 0.250$ .....(3.7)

จาก (3.6) 0.705 จาก (3.7) - 0.464

-0.464 $+0.250$

$2M = 0.241$ $-2M = -0.224$

$M = 0.1205$ $M = 0.112$

$$\text{Average } M = \frac{0.1205 + 0.112}{2} = 0.116 \text{ Millihenry}$$

ตารางที่ 3.3 วัด INDUCTANCE เพื่อใช้หาค่า Mutual Inductance

INDUCTANCE วัดเป็น MILLIHENRIES

CORE NO.	L_A	L_B	L_1	L_2	AVERAGE MUTUAL INDUCTANCE	Remarks
1	3.70	1.982	$L_{11}=2.00$	$L_{51}=1.00$	$M_{11}=0.43$	ขด 3 กับ 8; FLUX ตาม
	4.62	1.742	$L_{11}=2.00$	$L_{p1}=1.00$	$M_{21}=0.720$	ขด 1 กับ 8; FLUX ตาม
	4.70	3.23	$L_{11}=2.00$	$L_{21}=2.25$	$M_{31}=0.37$	ขด 5 กับ 7; FLUX ตาม
2	4.62	2.54	$L_{12}=2.00$	$L_{52}=1.07$	$M_{12}=0.518$	ขด 4 กับ 7; FLUX ตาม
	5.00	2.55	$L_{12}=2.00$	$L_{p2}=1.00$	$M_{22}=0.612$	ขด 2 กับ 7; FLUX ตาม
	5.18	2.87	$L_{12}=2.00$	$L_{22}=2.25$	$M_{32}=0.577$	ขด 5 กับ 8; FLUX ตาม
3	0.705	0.250	$L_4=0.264$	$L_3=0.20$	$M=0.116$	ขด 1 กับ 3; FLUX ตาม

3.2 สร้าง OSCILLATOR

ในการสร้าง VACUUM TUBE OSCILLATOR เพื่อให้ OUT PUT Voltage ออกมาเป็น Sinusoidal wave หลอดจะทำงานที่ operating point ตาม condition ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 สมการ (2.7) คือ

$$g_m \geq \frac{M_{RC}}{MH - L} \quad \text{- - - - - - - - - (3.8)}$$

การวัดค่า RESISTANCE, INDUCTANCE และ MUTUAL INDUCTANCE จากหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว จะเป็นประโยชน์ในการหาว่า OSCILLATOR จะ OSCILLATE หรือไม่

3.2.1 CHARACTERISTICS ของหลอด 6C4 (1)

OSCILLATOR ที่สร้างนี้ใช้หลอด RCA NO. 6C4 เป็นแบบ POWER TRIODE ซึ่งสามารถใช้เป็น Class C rf. amplifier ได้ มี CHARACTERISTICS ที่สำคัญดังนี้ คือ

Heater Voltage (ac/dc)	6.3 volts
Heater Current	0.15 ampere

Class A_1 Amplifier

Maximum Ratings (Design center Values):

Plate Voltage	300 max. Volts.
Plate Dissipation	3.5 max. Watts.

CHARACTERISTICS	without External Shield	with External Shield	
Plate Voltage	100	250	volts
Grid Voltage	0	-8.5	volts
Amplification Factor	19.5	17	
Plate Resistance (Approx.)	6250	7700	ohms
Transconductance	3100	2200	mhos
Plate Current	11.8	10.5	ma.
Grid Voltage (Approx.)for plate current of 10 μa.	-10	-25	volts

(1) HARRISON, RCA Receiving Tube Manual, Technical Series RC-23 pp.201 - 202

R.F. Power Amplifier and Oscillator-Class C Telegraphy

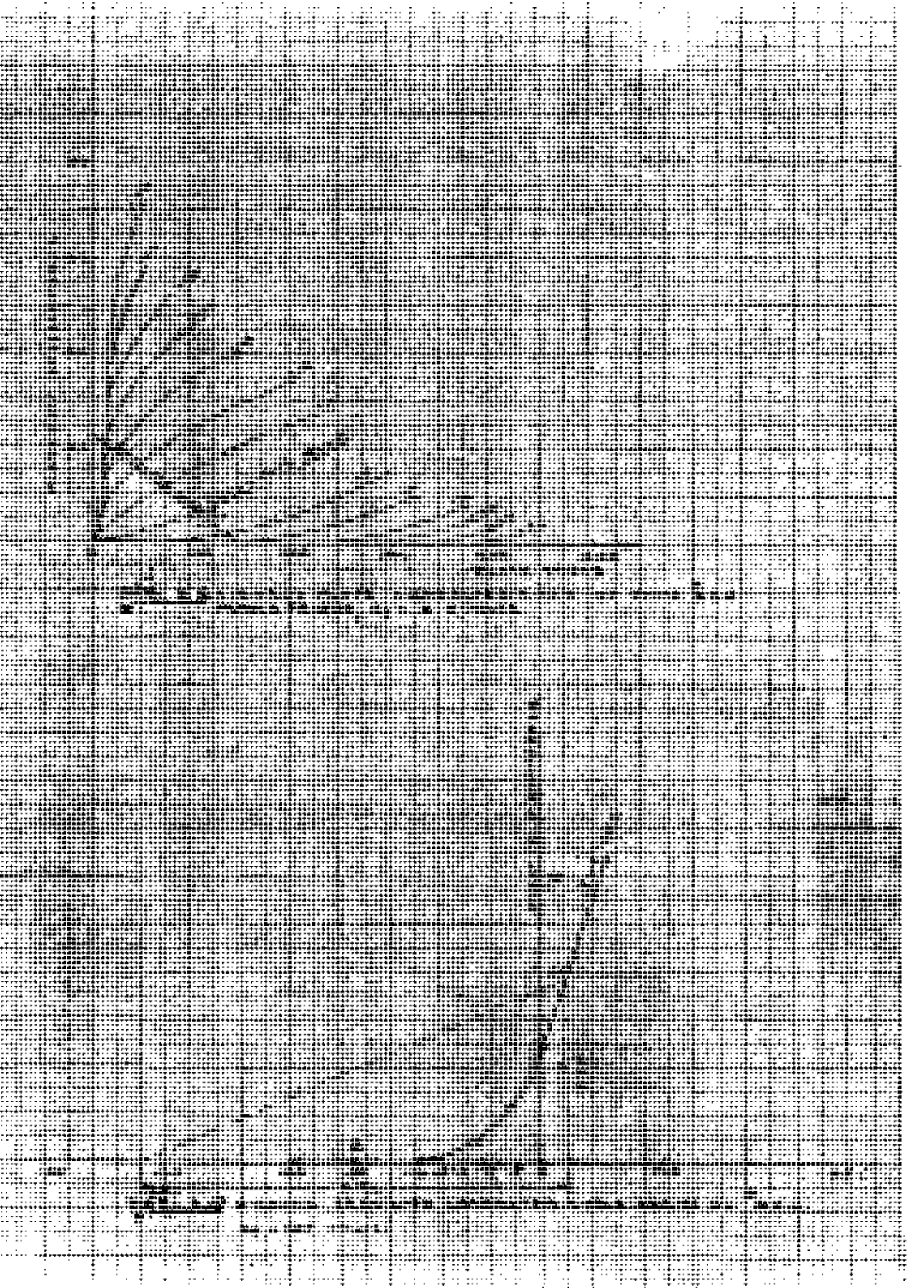
MAXIMUM RATINGS (Design - Center Values)

Plate Voltage	300 max.	volts
Grid Voltage	-50 max.	volts
Plate Current	25 max.	ma.
Grid Current	8 max.	ma.
Plate Dissipation	5 max.	Watts

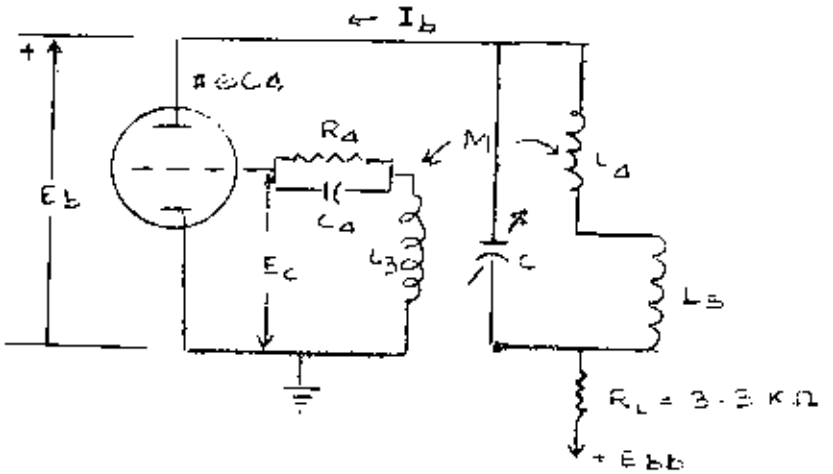
รูปที่ 3.6 เป็น AVERAGE PLATE CHARACTERISTICS ของหลอด 6C4 และ รูปที่ 3.7 เป็น Transfer Characteristics ซึ่งได้จากรูปที่ 3.6 โดยให้หลอดทำงานที่ Plate Voltage เท่ากับ 150 Volts - dc

3.2.2 OPERATING POINT ของ OSCILLATOR

การหา Operating Point ของ Oscillator ใช้หลักเดียวกันกับของ Amplifier แต่ของ Oscillator เป็น Class - C Amplifier คือ grid bias voltage อยู่เลย cutt off สำหรับหลอด 6C4 อยู่เลย - 10 volts (ดูรูปที่ 3.7) ขณะที่ Oscillate อยู่ grid signal จะต้อง swing ไปทาง positive เพื่อให้ได้ direct compoment ของ grid current ทำให้เกิด grid bias voltage ขึ้นเองโดยไม่ต้องใช้ external dc - Voltage นอกจากนั้น operating point ต้องอยู่ที่จุดที่ให้ $g_m > \frac{\mu R_L}{\mu_{M-L}}$



3.2.3 DC - LOAD LINE ของ OSCILLATOR



รูปที่ 3.8 CIRCUIT 6C4 vacuum triode amplifier with Resistance Load ขณะที่ไม่มี GRID SIGNAL

เมื่อยังไม่มี GRID SIGNAL VOLTAGE สมมติว่า RESISTANCE ของ COILS มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ 3.3 K Ω ดังนั้น LOAD ของหลอดจะมี RESISTANCE อย่างเดียวคือ 3.3 KΩ ตาม Kirchhoff's Law จะได้

$$E_b = E_{bb} - I_b R_1 \quad \text{.....(3.9)}$$

ให้ E_{bb} = 150 volts (จาก RECTIFIER)

R_1 = 3.3 KΩ

ถ้าหลอดทำงานที่ E_b = 125 volts

จาก (3.9)

$$I_b = \frac{E_{bb} - E_b}{R_1}$$

$$= \frac{150 - 125}{3.3 \times 10^3} = 7.55 \text{ ma.}$$

ถ้า $E_b = 0$ ได้ $I_b = \frac{150}{3.3 \times 10^3} = 45.5$ ma.

จากนี้เขียน DC-LOAD LINE ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 DC-LOAD LINE ตัด curve $E_c = 0$ ที่จุด Q_1 ซึ่งเป็น Quiescent Operating Point

3.2.4 DYNAMIC TRANSFER CHARACTERISTICS

จากรูปที่ 3.8 จากเส้นตรงขนานกับแกน Y ผ่านจุด Q_1 จะตัดแกน X ที่ E_b = 125 volts จากผลนี้จึงหา DYNAMICS TRANSFER CHARACTERISTICS ได้ตามตารางที่ 3.4 และ PLOT CURVE ของ I_b กับ E_c ได้ตามรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.4 หา DYNAMIC TRANSFER CHARACTERISTICS ของหลอด 6C4 เมื่อ E_b = 125 volts

E_c volts	PLATE CURRENT (I_b) MILLIAMPERES
- 10.0	0
- 5.0	2
- 2.5	6
0.0	12
+ 2.5	22
+ 5.0	32

3.2.5 CHECK CONDITION OF OSCILLATION

หลอด 6C4 จะ OSCILLATE หรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับ Transconductance ($\bar{g}_m$) ดังกล่าวแล้ว ค่า $\bar{g}_m$ นี้หาได้จาก

(1) componemt ของ circuit ที่ DESIGN ไว้ คือ μ, R, C, L, และ M

(2) DYNAMIC TRANSFER CHARACTERISTICS

ค่า $\bar{g}_m$ ที่ได้จาก (1) จะต้องมากกว่าจาก (2) หลอดจึงจะ OSCILLATE แต่อย่างไรก็ตาม $\bar{g}_m$ จากข้อ (2) เปลี่ยนไปตามค่าของ GRID BIAS ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปตามค่าของ R_4 ของ GRID BIASING CIRCUIT

1. หา $\bar{g}_m$ จากค่าต่าง ๆ ของ CIRCUIT

หลอดจะ sustained oscillation เมื่อ $\bar{g}_m = \frac{\mu RC}{\mu M - L}$

$$\bar{g}_m = \frac{\mu R C}{\mu M - L}$$

เมื่อ μ = 19.50 (จากหน้า 20)

M = 0.116 mh. (จากตารางที่ 3.3 ของ CORE NO.3)

C = 11.1 pf. (จากหน้า 16)

$L = L_4 + L_5$

$= 0.260 + (1.00 + 1.00) = 2.260$ mh.

R = 33.02 ohms (คือ R_T จากด้านบวก)

$$\bar{g}_m = \frac{19.5 \times 33.02 \times 11.1 \times 10^{-12}}{19.5 \times 0.116 \times 10^{-3} - 2.260 \times 10^{-3}}$$

$$= \frac{19.5 \times 33.02 \times 11.1 \times 10^{-12}}{0.0025 \times 10^{-3}} \quad \text{mho}$$

$\bar{g}_m$ = 2,830 μmhos

2. $\bar{g}_m$ จาก Dynamic Transfer Characteristics

Mutual conductance จาก dynamic transfer characteristics define ไว้ว่า

$$\bar{g}_m = \frac{\Delta i_b}{\Delta e_c} \quad \text{-------(3.10)}$$

ให้ oscillation เมื่อ E_b = 125 volts และ GRID BIAS (E_c) เท่ากับ - 15 volts ที่จุด Q ตาม รูปที่ 3.7 Amplitude ของ Feed back voltage (E_g) จะต้องมากกว่า ±15 VOLTS (peak to peak) จึงจะทำให้เกิด SUSTAINED OSCILLATION และเกิด self biasing ของ grid ถ้า GRID VOLTAGE มี amplitude = ± 17 VOLTS จะได้

I_b = 19×10^{-3} ampere

ΔE_c = 34 volts

$$\therefore \bar{g}_m = \frac{19 \times 10^{-3}}{34} = 559 \quad \mu\text{mhos}$$

จากนี้จะเห็นว่า $\overline{g_m}$ จากสมการ (3.10) มีค่าน้อยกว่าที่หาได้จาก $g_m = \frac{\mu_{RC}}{\mu_{M-L}}$ ดังนั้น CIRCUIT ที่ออกแบบมา มีโอกาสที่จะทำให้ oscillate ได้

3.3 สร้าง CAPACITOR PLATE

CAPACITOR PLATE สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นที่ใส่ทรายที่จะวัดหาความชื้น โดยใช้หลักที่ว่าค่าของ capacitance เปลี่ยนไปตามความชื้นที่อยู่ในทราย capacitor นี้คือ C_x และ R_x ของ CIRCUIT ในรูปที่ 2.4 ซึ่งต่อขนานกับ COIL L_{12}, C_{12} CORE NO. 2

PLATE ของ CONDENSER ทำด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ขนาด 3 x 5 ตารางนิ้ว และหนาประมาณ 0.05 นิ้ว วางห่างกันเป็นระยะทาง 1.95นิ้ว capacitorระหว่าง Plate เมื่อยังไม่มีทรายอยู่หาได้จากสมการ (2.2) คือ

$$C = 0.0885 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad \text{picofarad}$$

ε_r = 1 เป็นของอากาศ หรือ Vacuum

$A = (3 \times 2.54 \times 10)(5 \times 2.54 \times 10)$ mm^2

$= 9,700$ "

$d = 1.95 \times 2.54 \times 10$ mm

$= 49.50$ "

$\therefore \quad C = \frac{0.0885 \times 1 \times 9,700}{49.5}$ pf.

$= 17.35$ pf.

จากการทดลองนำทรายซึ่งมีความชื้นราว 0.4 PERCENT มาใส่จนเต็ม IMPACT ทรายจนแน่น วัด CAPACITANCE ด้วย UNIVERSAL BRIDGE ได้ 140 pf. วัด RESISTANCE ได้ 280 kilo-ohms และ Q = 2.60 ที่ frequency 1 kilocycle.