

## บทที่ 10

## วงจร อาร์-ซี เอ็กโพเนนเชียลสวิทช์

## ( R-C Exponential Sweep Circuits)

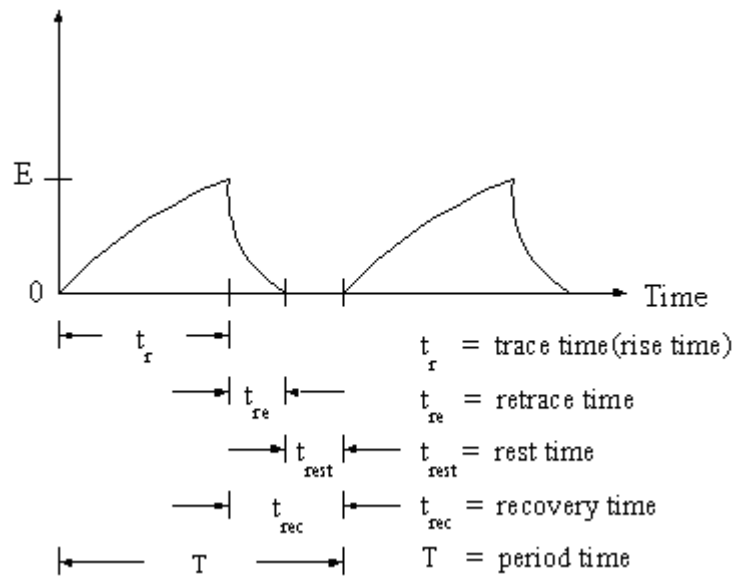
## 7.1 คุณสมบัติของวงจร อาร์-ซี เอ็กโพเนนเชียลสวิทช์

วงจรสวิทช์ (sweep Circuits) เป็นวงจรซึ่งทำให้กระแสหรือหรือแรงดันมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับเวลาที่เปลี่ยนไป ดังนั้นบางครั้งจึงถูกเรียกว่า “Linear – time – base generator” โดยที่หากเป็นวงจรที่สร้างสัญญาณแรงดัน จะถูกเรียกว่า “Voltage – time – base generator” หรือวงจรที่สร้างสัญญาณแรงดัน จะถูกเรียกว่า “Current – time – base generator” ลักษณะสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรมี แสดงดังในรูปที่ 7.1 จากรูปที่ 7.1 นี้จะเห็นว่าวงจรสวิทช์ ประกอบขึ้นด้วยส่วนประกอบพื้นฐานสองส่วนคือช่วงเวลา trace time และช่วงเวลา recovery time และสำหรับ recovery time ยังประกอบด้วยส่วนพื้นฐาน 2 ส่วนคือ recovery time และ rest time อาจจะมีค่าเป็นศูนย์ได้ ซึ่งในกรณีเช่นนี้ recovery time ก็คือ retace time นั่นเอง

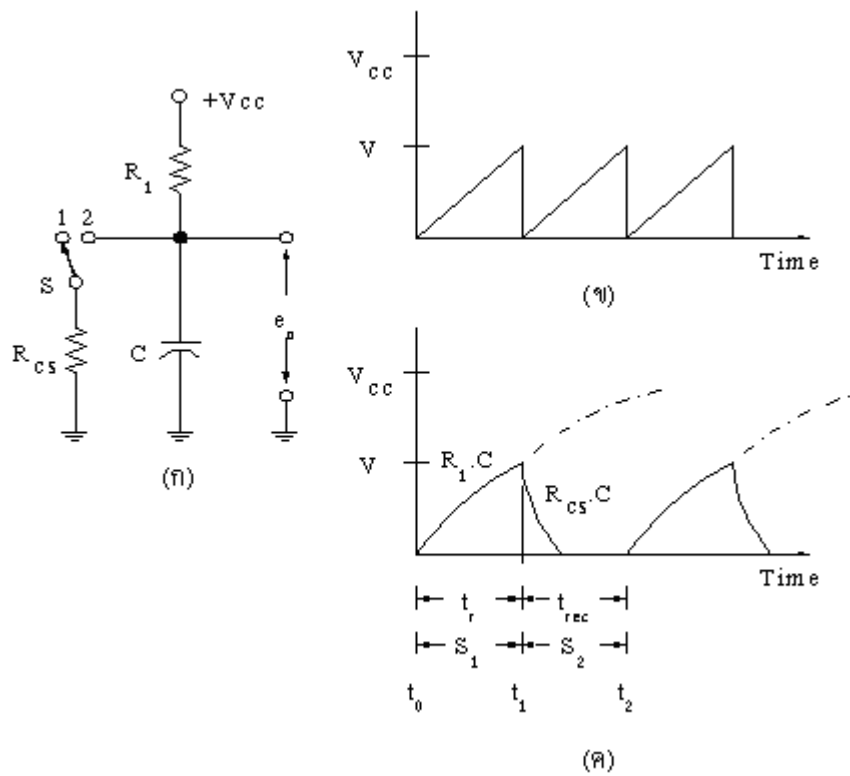
## 7.1.1 หลักการทำงาน

เพื่อง่ายต่อการเข้าใจการทำงานของวงจรประเภทนี้ เราจะพิจารณาวงจรอย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 (ก) ซึ่งเป็นวงจรสวิทช์แบบ อาร์-ซี เอ็กโพเนนเชียล โดยอาศัยการเก็บประจุ (Charging) ช่องตัวเก็บประจุ โดยผ่านตัวความต้านทานรูปที่ 14.2 (ก) สมมติว่าที่เวลา  $t_{-0}$  สวิตช์ S อยู่ที่ตำแหน่ง 2 ดังนั้นตัวเก็บประจุ C จะไม่ทำการเก็บประจุ เมื่อเวลา  $t_{+0}$  สวิตช์ S ถูกปรับไปที่ตำแหน่ง 1 ดังนั้นตัวเก็บประจุ C จะเริ่มเก็บประจุ โดยกระแสไหลผ่านตัวความต้านทาน  $R_L$  ทำให้มีแรงดันตกคร่อมกระทั่งถึงค่า  $+V_{CC}$  โวลต์ ในขณะที่เวลา  $t_{+1}$  เมื่อสวิตช์ S อยู่ที่ตำแหน่ง 2 ตัวเก็บประจุ C ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมอยู่จะเริ่มคายประจุออก โดยมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ S และตัวความต้านทาน  $R_{CS}$  โดยปกติค่า  $R_{CS} \ll R_L$  ดังนั้นตัวเก็บประจุ C จึงมีเวลาพอที่จะคายประจุได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 14.2 (ค) และถ้าหากค่าความต้านทาน  $R_{CS}$  มีค่า  $\sim 0$  แล้วตัวเก็บประจุ C จะสามารถคายประจุออกในเวลาอันรวดเร็ว ( $\sim 0$ ) ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ได้ลักษณะของแรงดันที่เอาต์พุตมีรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย ดังรูปที่ 14.2 (ข) ซึ่งเราเรียกว่า “คลื่นรูปฟันเลื่อย” ซึ่งถูกนำไปใช้งานในเครื่องรับโทรทัศน์

7.1.2 ลักษณะรูปคลื่นของวงจร



รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะรูปร่างของสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรสวิตช์



รูปที่ 7.2 (ก) แสดงวงจรสวิตช์แบบ อาร์-ซี เอ็ทโพเนนเชียลอย่างง่าย ๆ

(ข) แสดงคลื่นรูปฟันเลื่อยและ (ค) แรงดันสวิตช์

คุณสมบัติในการเป็นเชิงเส้นของคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตจะมีค่าน้อยข้อมขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณส่วนที่ C ทำหน้าที่เก็บประจุและถูกวัดออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ระหว่างอัตราส่วนของเวลาที่ตัวเก็บประจุ C ใช้ในการเก็บประจุ และค่าเวลาคงที่ของวงจร จากรูปที่ 14.3 ช่วงเวลาที่สวิตช์ S ปิดวงจร ตัวเก็บประจุ C จะเริ่มเก็บประจุโดยมีกระแสไหลผ่านตัวความต้านทาน R และหากการเก็บประจุดำเนินต่อไปจนกระทั่งมีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C เท่ากับแรงดัน  $V_{CC}$  แล้วจะพิจารณาได้ว่า

$$I = \frac{Q}{t} \text{ และ } Q = C \cdot e_C$$

$$I = \frac{C \cdot e_C}{t}$$

แต่  $I = \frac{V_{CC}}{R}$

ดังนั้น  $\frac{V_{CC}}{R} = C \cdot e_C$

$$e_C = \frac{V_{CC} \cdot t}{R \cdot C} = \frac{V_{CC} \cdot t}{\tau}$$

โดยที่  $t = \tau = RC$

$$e_C = V_{CC}$$

แต่ในทางปฏิบัติ ตัวประจุ C จะเก็บประจุ และมีแรงดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นไปยังค่า  $V_{CC}$  โดยเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$e_C = E \left( 1 - e^{-t/RC} \right)$$

$$e_C = V_{CC} \left( 1 - e^{-t/RC} \right)$$

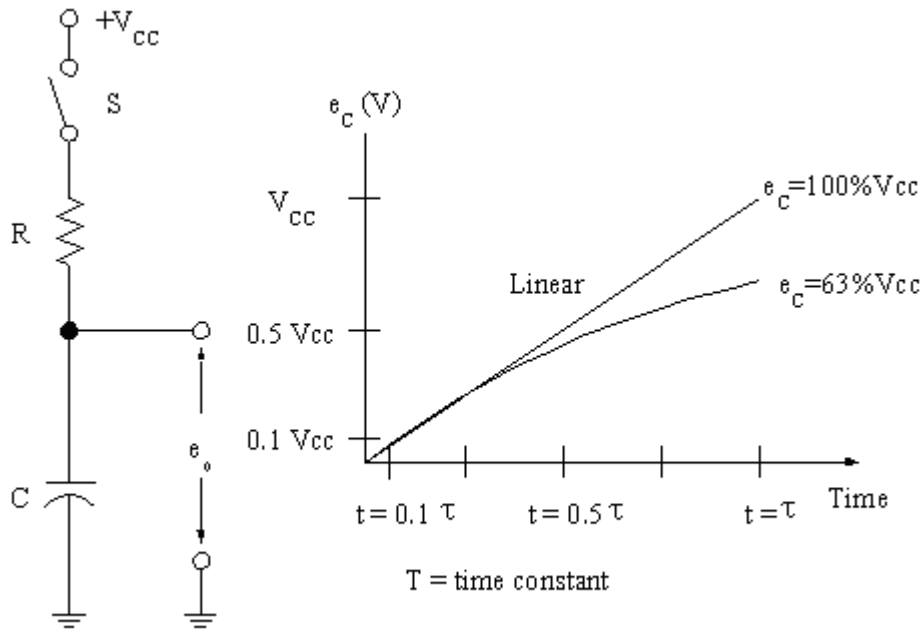
เมื่อ  $t = t = RC$

$$e_C = V_{CC} - V_{CC} \cdot e^{-1}$$

$$= V_{CC} - \frac{V_{CC}}{2.718}$$

$$= 0.63 V_{CC}$$

หรือ  $e_C = 63 \% V_{CC}$



รูปที่ 7.3 แสดงวงจรสวิตช์แบบ อาร์-ซี เอ็กโพเนนเชียล

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่า  $0.1 V_{CC}$  เมื่อเวลาผ่านไป  $t = 0.1 t$  โดยแสดงให้เห็นได้ดังนี้

จาก

$$e_c = V(1 - e^{-t/RC})$$

$$0.1 V_{CC} = V_{CC}(1 - e^{-t/RC})$$

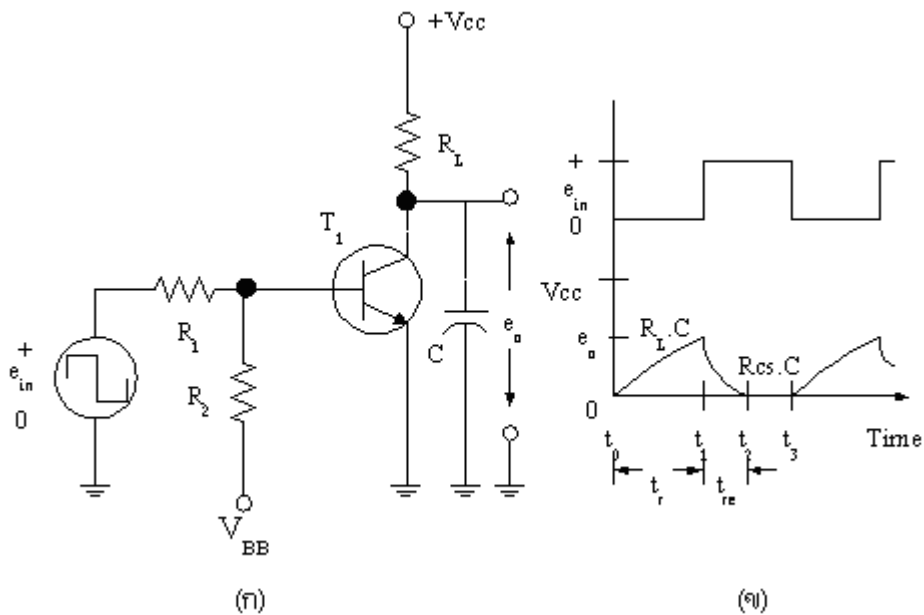
$$e^{+t/RC} = 1.11$$

$$t = RC \frac{\log_{10} 1.11}{\log_{10} e} = \frac{0.045 RC}{0.434}$$

$$= 0.1035 RC$$

$$t = 0.1 RC = 0.1\tau$$

รูปที่ 7.3 แสดงวงจรสวิตช์แบบ อาร์-ซี เอ็กโพเนนเชียล ซึ่งนิยมนำไปใช้งานจริง ๆ โดยใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่แทนสวิตช์  $S$  ของวงจรในรูปที่ 7.2 และตัวความต้านทาน  $R_{CS}$  มีถูกแทนด้วยค่าความต้านทานของทรานซิสเตอร์  $T_1$  ขณะทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัว



รูปที่ 7.4 แสดงวงจรสวิตช์ที่นิยมใช้งาน

### 7.1.3 การนำวงจรไปประยุกต์ใช้งาน

จากวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.4 จะเห็นว่าประกอบด้วยวงจรกลับสัญญาณ (inverter circuit) ซึ่งมีตัวเก็บประจุ C ต่อขนานกับคอลเล็กเตอร์และลงกราวด์ ดังนั้นที่เวลา  $t_{+0}$  เมื่อไม่มีสัญญาณที่อินพุตทรานซิสเตอร์  $T_1$  จะไม่ทำงาน และอยู่ในสภาพ OFF ตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุเพื่อให้แรงดันคอคกร้อมมีค่าสู่  $V_{CC}$  โดยทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวความต้านทาน  $R_L$  เมื่อสัญญาณบวกถูกป้อนเข้าทางอินพุตที่เวลา  $t_{+1}$  ทรานซิสเตอร์  $T_1$  ทำงานและอยู่ในภาวะอิ่มตัว ตัวเก็บประจุ C จะคายประจุผ่านทรานซิสเตอร์

ขนาดของแรงดันเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาซึ่งทรานซิสเตอร์หยุดทำงานอยู่ในภาวะ OFF เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าว เป็นเวลาซึ่งตัวเก็บประจุ C ทำการเก็บประจุ ค่าของขนาดแรงดันนี้อาจหาได้โดยการคำนวณจากสมการการเก็บประจุของตัวเก็บประจุดังที่กล่าวมาแล้ว

สำหรับเวลาซึ่งตัวเก็บประจุใช้ในการคายประจุ ก็เช่นเดียวกันอาจคำนวณหาได้จากสมการคายประจุของตัวเก็บประจุได้เช่นกัน ซึ่งการคายประจุของตัว C ในวงจรที่ 7.4 เป็นการคายประจุผ่านตัวทรานซิสเตอร์ขณะทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัวซึ่งเขียนได้เป็น  $R_{CS}$  และค่านี้จะเป็นตัวกำหนดกระแสของการคายประจุด้วย

โดยทั่วไปวงจรกลับสัญญาณจะถูกออกแบบเพื่อให้ค่าของกระแสเบสซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในภาวะอิ่มตัวมีค่าน้อย ๆ และค่า  $R_{CS}$  อาจมีค่าราว 25  $\Omega$  ซึ่งค่านี้จะมีผลต่อค่า retrace time ซึ่งโดยปกติควรจะให้มิต่ำ ๆ ดังนั้น ค่า  $R_{CS}$  จึงอาจถูกปรับปรุงให้มีค่าต่ำราว 2  $\Omega$  โดยที่ค่า  $R_{CS}$  ของทรานซิสเตอร์นี้จะมีค่ามากขึ้นอยู่กับค่าของกระแสเบส เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานและอยู่ในภาวะ ON ตัวเก็บประจุ C จะเริ่มต้น

คายประจุผ่านทรานซิสเตอร์ขนาดของกระแสคอลเล็กเตอร์ ก็จะขึ้นอยู่กับกระแสเบส โดยปกติพิจารณาว่าหากกระแสของการคายประจุมีค่ามากกว่ากระแสของการเก็บประจุเป็น 5 เท่าแล้ว ถือได้ว่าค่า  $R_{CS}$  เป็นค่าต่ำ

ซึ่งเราเรียกว่า วงจรกำเนิดสัญญาณ “คลื่นรูปฟันเลื่อย” ซึ่งถูกนำไปใช้งานในเครื่องรับโทรทัศน์ ในการสแกนลำอิเล็กตรอนบนหน้าจอโทรทัศน์

## 7.2 พารามิเตอร์ของวงจร อาร์-ซี เอ็กโพเนนเชียลสวิทช์

### 7.2.1 ค่าความต้านทานของทรานซิสเตอร์ขณะทำงานในภาวะอิ่มตัว

อาจประมาณค่าได้โดยการใช้กฎของโอห์ม เช่น ถ้าหากสมมติว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อของซิลิกอนทรานซิสเตอร์ มีค่า  $V_{CEsat} \approx 0.3V$  แล้วดังนั้น

$$R_{CS} \cong \frac{V_{CEsat}}{I_{CSat}}$$

โดยที่  $R_{CS}$  = ค่าความต้านทานของทรานซิสเตอร์ขณะทำงานในภาวะอิ่มตัว ( $\Omega$ )

$V_{CEsat}$  = แรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ขณะทำงานในภาวะอิ่มตัว (V)

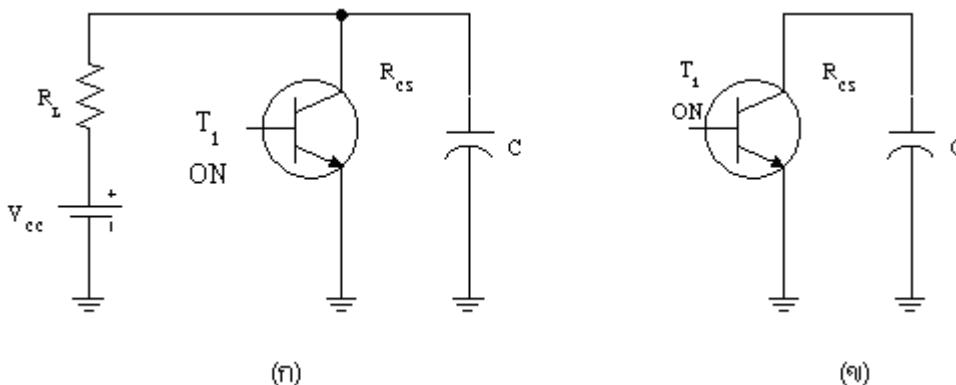
$I_{CSat}$  = กระแสคอลเล็กเตอร์ขณะทำงานในภาวะอิ่มตัว (mA) ที่เวลา  $t_{+1}$

เราอาจเขียนรูปวงจรในรูปที่ 7.4 ได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (ก)

ซึ่งแสดงให้เห็นเส้นทางการไหลของกระแสขณะที่ตัวเก็บประจุ C กำลังคายประจุผ่านทรานซิสเตอร์ เนื่องจากความต้านทานของรอยต่อทรานซิสเตอร์นี้มีค่าต่ำมาก ดังนั้นกระแสจึงไม่ผ่านโหลด  $R_L$  ทำให้เราสามารถเขียนวงจรจากรูปที่ 7.5 (ก) ได้ใหม่เป็นรูปที่ 7.5 (ข) กล่าวคือไม่พิจารณาค่าของ  $R_L$

### 7.2.2 การออกแบบวงจร

ตัวอย่างแสดงการออกแบบวงจรประเภทนี้แสดงได้โดยสมมติว่าต้องการออกแบบวงจร ดังในรูปที่ 7.4 ซึ่งมีคุณสมบัติดัง  $t_r = 50 \mu sec = 4v$  โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็น



รูปที่ 7.5 แสดงวงจรขณะตัวเก็บประจุคายประจุออก

ซิลิกอนชนิด NPN มีค่า  $h_{FEmin} = 20$  และค่า  $I_{CBO} = 10A$  แหล่งจ่ายศักดากระแสตรงมีค่า 10 และสมมติว่ากระแส Initial-Charging 10 mA ทำให้  $V_{BEoff} = -0.5 V$ .  $e_{in}$  คือพัลส์บวกของ 10 V.

### วิธีออกแบบ ทำตามลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เมื่อค่า  $R_1$  ซึ่งได้ใช้ค่า Initial capacitor-Charging current มีค่าตามที่กำหนด
2. ใช้สมการของการเก็บประจุของตัว C หาค่าความจุไฟฟ้า
3. เขียนสมการโหนดจากรูปวงจร ON-Circuit ของวงจรกลับสัญญาณในเทอมของ  $R_1$  และ  $R_2$
4. เขียนสมการโหนดจากรูปวงจร OFF-Circuit ของวงจรกลับสัญญาณในเทอมของ  $R_1$  และ  $R_2$
5. แก้สมการที่อยู่ในข้อ 3 และ 4 หาค่า  $R_1$  และ  $R_2$

$$\text{ดังนั้น} \quad R_1 = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R} = \frac{10 - 0.3}{10 \text{ mA}} = \frac{9.7}{10 \text{ mV}} = 970 \Omega$$

เราใช้ค่า 1 k $\Omega$

$$\text{จาก} \quad e_C = E - (E - E_{\infty}) \mathcal{E}^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad 4 = 10 - (E - E_{\infty}) \mathcal{E}^{\frac{-50 \times 10^{-6}}{1 \times 10^3 \cdot C}}$$

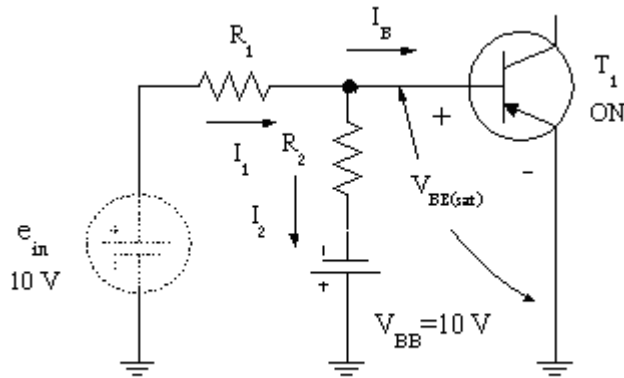
$$4 = 10 - \frac{9.7}{\frac{+50 \times 10^{-9}}{C}}$$

$$\mathcal{E}^{\frac{+50 \times 10^{-9}}{C}} = \frac{9.7}{6} = 1.617$$

$$C = \frac{50 \times 10^{-9} \log_{10} \mathcal{E}}{\log_{10} 1.617}$$

เราใช้  $C = 0.1 \mu F$  แทน

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FEmin}} = \frac{10 \text{ mA}}{20} = 0.5 \text{ mA}$$



รูปที่ 7.6 แสดงวงจร ON - input circuit

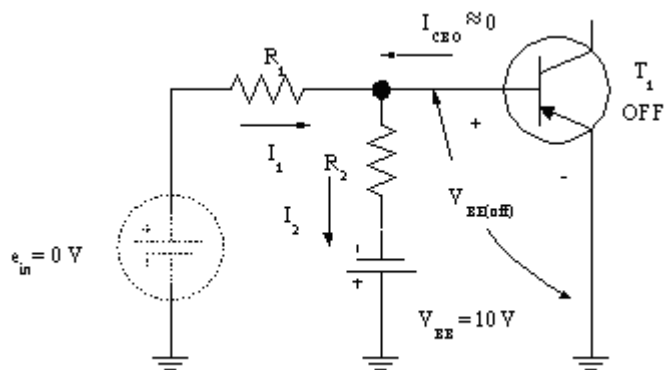
$$I_1 = I_2 + I_B$$

$$\frac{E_{R1}}{R_1} = \frac{E_{R2}}{R_2} + I_B$$

$$\frac{e_{in} - V_{BEsat}}{R_1} = \frac{V_{BEsat} - V_{BB}}{R_2} + I_B$$

$$\frac{10 - (+0.7)}{R_1} = \frac{+0.7 - (-10)}{R_2} + 0.5 \text{ mA}$$

ดังนั้นจะได้ว่า  $\frac{9.3}{R_1} = \frac{10.7}{R_2} + 0.5 \text{ mA}$  สมการ-ON



รูปที่ 7.7 แสดงวงจร OFF - input circuit



$$V_{BEoff} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_{bb}$$

$$(-0.5) = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) (-10)$$

ดังนั้น  $R_2 = 19 R_1$  สมการ-OFF

จากสมการ ON และสมการ OFF

$$\frac{9.3}{R_1} = \frac{10.7}{19R_1} + 0.5 \text{ mA}$$

$$\frac{8.74}{R_1} = 0.5 \text{ mA}$$

$$R_1 = 17.48 \text{ k}\Omega$$

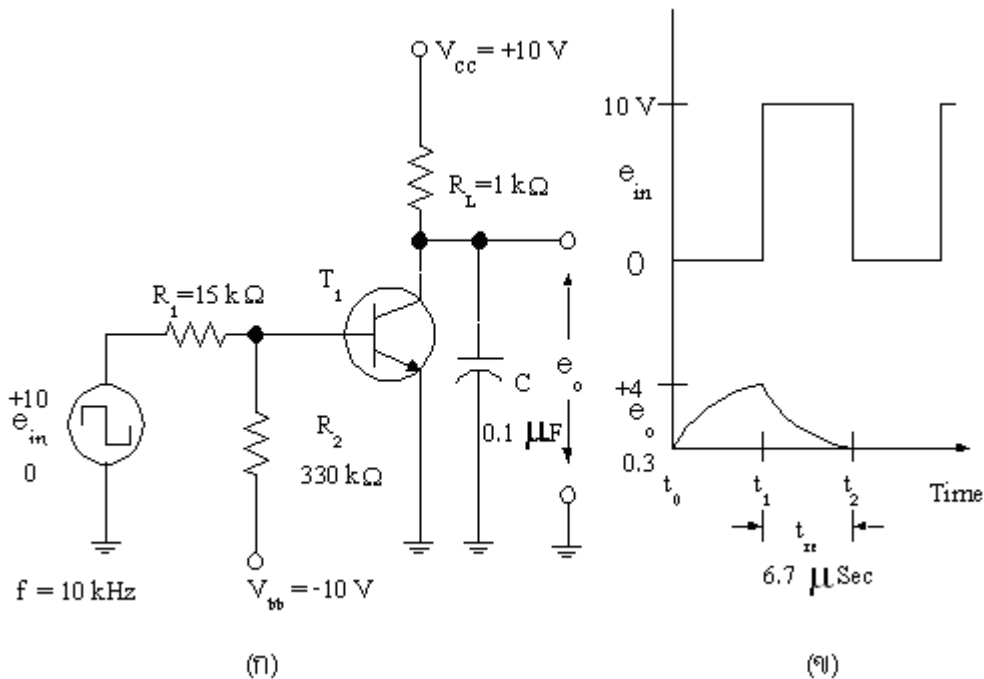
เราใช้ค่า  $15 \text{ k}\Omega$  แทน

$$R_2 = 19R_1 = 19 \times 17.48 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 332 \text{ k}\Omega$$

เราใช้ค่า  $330 \text{ k}\Omega$  แทน

ดังนั้นผลการออกแบบวงจรนี้สรุปได้ว่า  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$  ,  $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$  ,  $R_2 = 330 \text{ k}\Omega$  , ดังแสดงในรูปที่ 14.8 ซึ่งในกรณีนี้จุดประสงค์หลักของการออกแบบก็คือ เพื่อให้ค่ากระแสเบสมีค่าน้อยที่สุด ( $I_{Bmin}$ )



รูปที่ 7.8 (ก) แสดงวงจรซึ่งถูกออกแบบเรียบร้อยแล้ว

(ข) รูปร่างลักษณะของแรงดันที่อินพุตและเอาต์พุต

### 7.2.3 การปรับปรุงวงจร

เพื่อปรับปรุงวงจรให้มีคุณสมบัติดีขึ้น เราจะสมมติว่ากระแสของการคายประจุมีค่ามากกว่ากระแสของการเก็บประจุเป็น 5 เท่า ซึ่งการสมมติเช่นนี้จะทำให้ค่าของ retrace time มีค่าน้อยลงและเป็นสิ่งต้องการในการออกแบบ ดังนั้น

$$I_{C \text{ discharge}} = 5I_{C \text{ charge}} = 5 \times 10 \text{ mA} = 50 \text{ mA}$$

$$I_{C \text{ รวม}} = I_{C \text{ discharge}} + I_C$$

$$I_{C \text{ รวม}} = 50 \text{ mA} + 10 \text{ mA} = 60 \text{ mA}$$

ดังนั้นสมการ - ON จะเขียนได้เป็น

$$\frac{9.3}{R_1} = \frac{10.7}{R_2} + 3 \text{ mA}$$

และสมการ - OFF จะได้ว่า

$$R_2 = 19 R_1$$

$$\frac{9.3}{R_1} = \frac{10.7}{19 R_1} + 3 \text{ mA}$$

$$R_1 = 2.91 \text{ k}\Omega$$

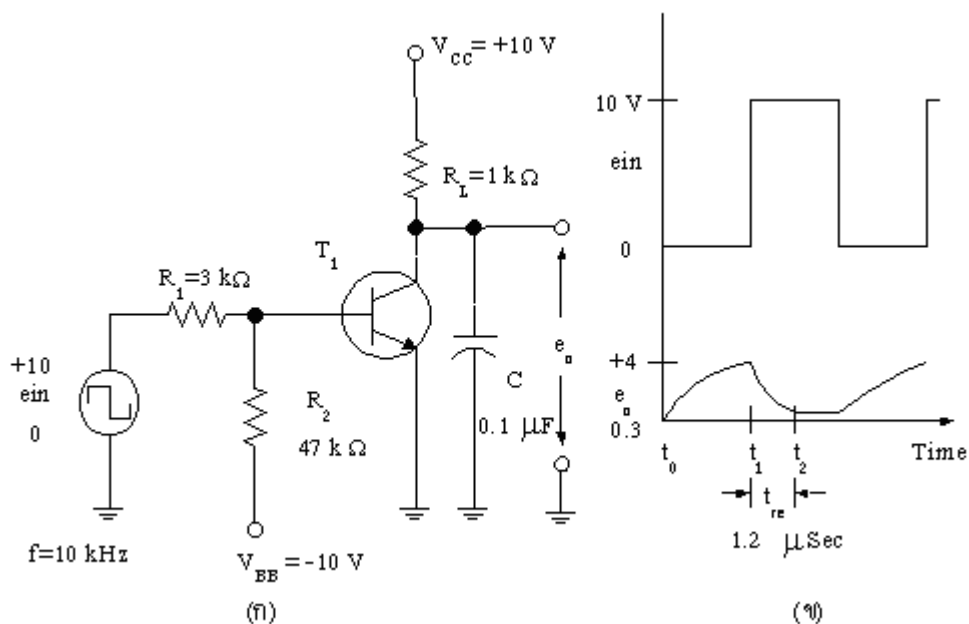
เราใช้ค่า 27 kΩ แทน

และ  $R_2 = 19 R_1$

$R_2 = 55.4 \text{ k}\Omega$

เราใช้ค่า 45 kΩ แทน

ดังนั้นวงจรปรับปรุงใหม่จึงเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 7.9 (ก.)



รูปที่ 7.9 (ก) แสดงวงจรซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้วโดย  $I_B = 6 \cdot I_{Bmin}$  และ

(ข) แสดงรูปร่างลักษณะของแรงดันที่เอาต์พุตของวงจร