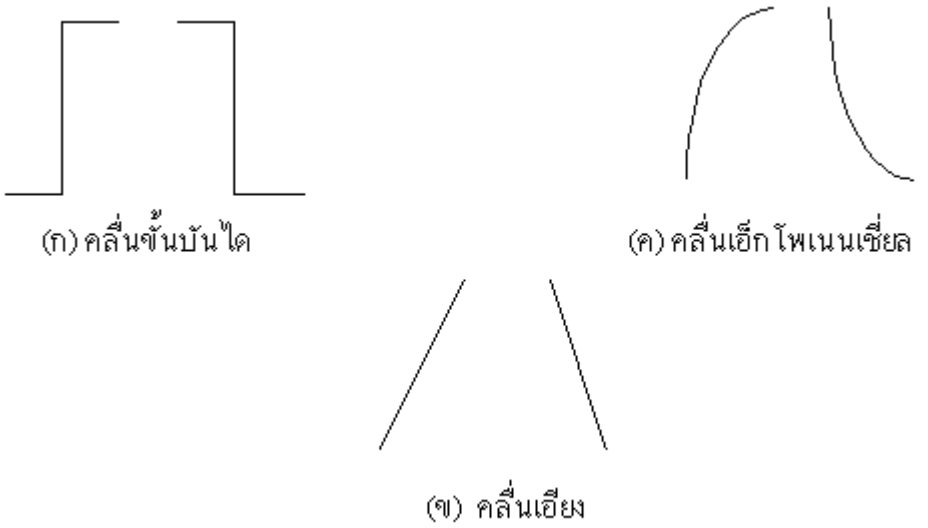
บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรูปคลื่น

1.1 ลักษณะและชนิดของรูปคลื่น

1.1.1 คำจำจัดความของรูปคลื่นแบบต่าง ๆ

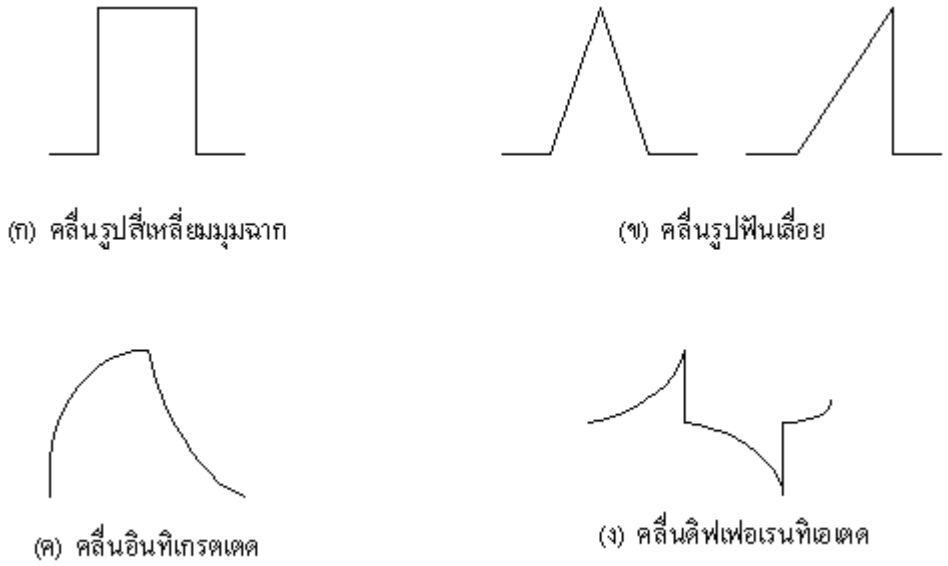
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ เช่น ไดโอด , ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพล่าร์ , ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ (FET) และสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมากสามารถถูกนำมาใช้งานเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี การนำสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้มาใช้งานเพื่อเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ปกติมักจะมีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เช่น ตัวต้านทาน , ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาประกอบร่วมกันเป็นวงจรไฟฟ้า วงจรไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า "วงจรสวิตช์ชิ่ง" (Switching circuits) ซึ่งผลการทำงานของวงจรสวิตช์นี้จะทำให้ได้สัญญาณไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นกระแสหรือแรงดันก็ได้ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นห้วง ๆ ซึ่งไม่ใช่คลื่นไซน์ (Nonsinusoidal wave) แต่เป็นลักษณะของคลื่นที่มีเหลี่ยมมีมุม โดยที่รูปคลื่นแต่ละช่วงอาจจะซ้ำกันหรือไม่ก็ได้ คลื่นไฟฟ้าดังกล่าวนี้เราเรียกว่า "พัลส์" (Pulse) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าวงจรสวิตช์ชิ่งสามารถทำหน้าที่สร้างพัลส์ของกระแสหรือแรงดันออกมาได้



รูปที่ 1.1 แสดงรูปทรงและลักษณะของคลื่นไฟฟ้า (แรงดันหรือกระแส) อย่างพื้นฐาน

พัลส์เหล่านี้เมื่อพิจารณาดูให้ดีแล้วจะเห็นว่า ส่วนใหญ่เกิดจากการประกอบของรูปคลื่นขั้นบันได (Step) , คลื่นเอียง (Ramp), หรือคลื่นเอ็กโพเนนเชี่ยล ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ก),(ข) และ (ค) ตามลำดับ รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่เรานิยมนำมาใช้งานกันมากที่สุดก็คือ รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ก). คลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular wave) นี้ก็ได้มาจากการรวมตัวกันของรูปคลื่นขั้นบันได 2 ส่วนนั้นเอง และมักถูกเรียกว่าพัลส์ หรือในกรณีของคลื่นรูปฟันเลื่อย (Sawtooth wave) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ข) ก็ได้มาจากการรวมกันของคลื่นเอียง 2 ส่วน หรืออาจเป็นการรวมกันของคลื่นเอียงหนึ่งส่วนกับคลื่นขั้นบันไดอีกหนึ่งส่วนก็ได้ นอกจากนี้คลื่นอินติเกรตเตด (Integrated) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ค) ก็คือรูปคลื่นซึ่งประกอบขึ้นมาจากคลื่นย่อยรูปเอ็กโพเนนเชี่ยล สองรูป และคลื่นดิฟเฟอเรนทิเอเตด (Differentiated) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ง) ก็คือคลื่นซึ่งประกอบขึ้นจากคลื่นย่อยขั้นบันไดและคลื่นเอ็กโพเนนเชี่ยล รวมตัวกันนั่นเอง

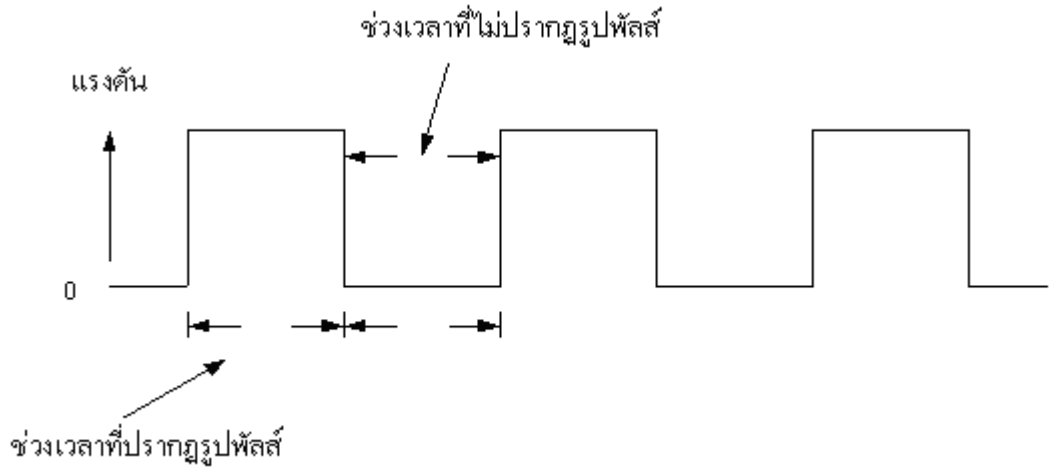
1.1.2 ประเภทของรูปคลื่นแบบต่าง ๆ



รูปที่ 1.2 แสดงรูปคลื่นลักษณะต่าง ๆ

1.1.3 คำจำกัดความของรูปคลื่นพัลส์

คลื่นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของแรงดันไฟฟ้าเรามักนิยมเรียกว่า "คลื่นจัตุรัส" (Square wave) คลื่นจัตุรัสจะมีลักษณะคล้ายคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งปรากฏอย่างต่อเนื่องเป็นช่วง ๆ โดยลักษณะพิเศษประการหนึ่งคือช่วงเวลาของพัลส์ที่ปรากฏกับช่วงเวลาของพัลส์ที่ไม่ปรากฏจะมีค่าเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 1.3 และในเรื่องนี้จะได้กล่าวถึงลักษณะคุณสมบัติ, การสร้างและการวิเคราะห์สัญญาณพัลส์รูปคลื่นจัตุรัสโดยละเอียด

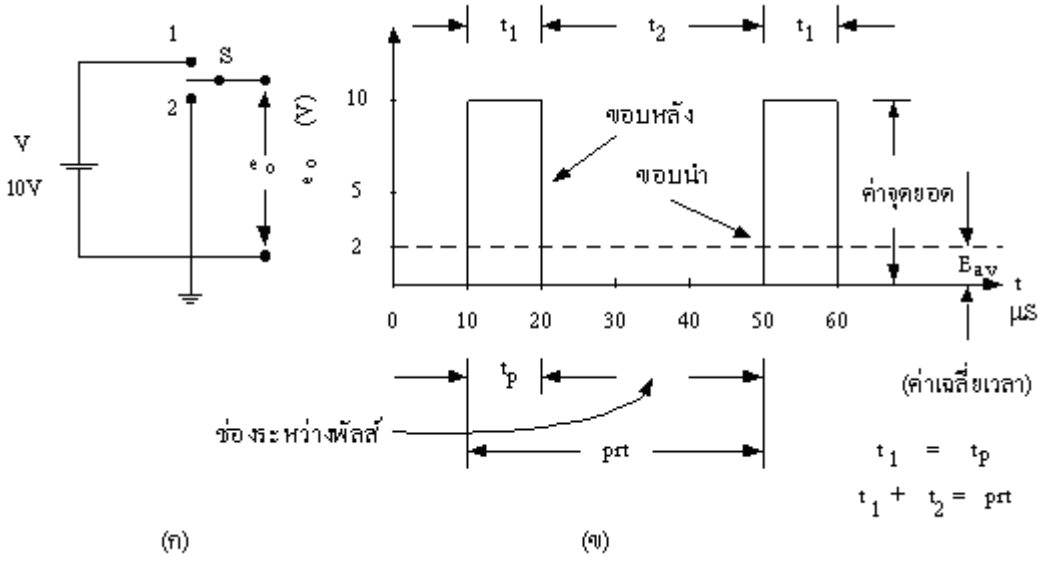


รูปที่ 1.3 แสดงรูปคลื่นจัตุรัส

1.2 พารามิเตอร์ของรูปคลื่นพัลส์

วงจรไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 1.4 (ก) เป็นวงจรที่ใช้สร้างพัลส์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ข) ในวงจรนี้จะมีระดับของแรงดันอยู่สองระดับคือ ที่ปลายออก หรือเอาต์พุตของวงจรนี้จะมีแรงดัน 10 โวลต์ เมื่อขั้วของสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง 1 และจะมีแรงดันเป็น 0 โวลต์ เมื่อขั้วของสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง 2 เมื่อพิจารณาขนาดของพัลส์นี้กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปจะเห็นได้ดังในรูปที่ 1.4 (ข) กล่าวคือขนาดของพัลส์นี้ก็คือ "จุดยอด" (Peak value) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจากศูนย์ "ขอบนำ" (Leading edge) ของพัลส์ก็จะปรากฏ และต่อมาเมื่อขนาดของพัลส์ตกลงมา ก็จะปรากฏ "ขอบหลัง" (Trailing edge) ช่วงของคลื่นระหว่างขอบนำกับขอบหลังเรียกว่า "ความกว้างของพัลส์" เขียนแทนด้วย t_p และช่วงระหว่างจุดที่เริ่มเกิดพัลส์หนึ่ง ๆ จนกระทั่งถึงช่วงที่เกิดพัลส์อื่นถัดมา เราเรียกว่า "เวลาที่พัลส์เกิดซ้ำ" (Pulse repetition time) เขียนแทนด้วย prt และพัลส์ซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันหลาย ๆ พัลส์ถูกเรียกว่า "ขบวนพัลส์" (Pulse train)

1.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นพัลส์



รูปที่ 1.4 แสดงลักษณะของพัลส์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากในทางทฤษฎี

ในขบวนพัลส์หนึ่ง ๆ จำนวนของพัลส์ที่เกิดขึ้นใน 1 วินาที เราเรียกว่า "อัตราการเกิดพัลส์ซ้ำ" (Pulse repetition rate) และเขียนแทนด้วย prr หรือบางครั้งก็ถูกเรียกว่า "ความถี่ของการเกิดพัลส์ซ้ำ" (Pulse repetition frequency) เขียนแทนด้วย prf ซึ่งมีหน่วยเป็นจำนวนรอบต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์ (Hz) จากรูปที่ 1.4 (ข) ถ้าหาก t_p หรือ t_1 มีค่าเท่ากับ t_2 แล้วพัลส์นี้ก็คือคลื่นจัตุรัส (Square wave) นั้นเอง

"อัตราการเกิดพัลส์ซ้ำ" (prr) ก็คือส่วนกลับของ "เวลาที่พัลส์จะเกิดซ้ำ" (prt) ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

$$prr = \frac{1}{prt} \quad (Hz) \qquad (1.1)$$

เมื่อ

prr คือ อัตราการเกิดพัลส์ซ้ำ (Pulse repetition rate) มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

prt คือ เวลาที่พัลส์เกิดซ้ำ (Pulse repetition time) มีหน่วยเป็น วินาที (S)

ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นใด ๆ (อาจเป็นแรงดันหรือกระแส) ก็คือส่วนซึ่งเป็น "กระแสตรง" (Direct current) ของคลื่นนั้น ๆ และการคิดหาค่าเฉลี่ย (Average value) ของแรงดันของคลื่นตามทฤษฎีในรูปที่ 1.4 (ข) ทำได้โดยการหารพื้นที่ (A_P) ของพัลส์ ด้วยค่าของเวลาที่พัลส์เกิดซ้ำ (prt) ค่าเฉลี่ยของแรงดันนี้ก็คือ ค่าซึ่งสามารถอ่านได้จากเครื่องวัดแรงเคลื่อนกระแสตรง (DC Voltmeter) ที่ใช้วัดขนาดของพัลส์

$$A_P = t_p \times E_{peak} \quad (S.V) \qquad (1.2)$$

เมื่อ

A_P คือ พื้นที่พัลส์

t_p คือ ความกว้างของพัลส์ มีหน่วยเป็น วินาที (S)

E_{peak} คือ ค่าแรงดันสูงสุดของพัลส์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

E_{av} คือ ค่าแรงดันเฉลี่ยของพัลส์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

ดังนั้น $A_P = 10 \times 10^{-6} \times 10 = 100 \times 10^{-6}$ วินาที – โวลต์

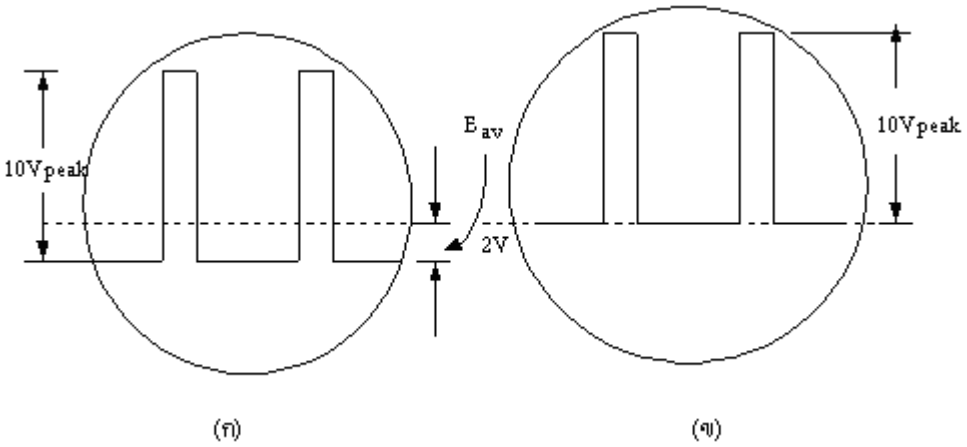
$$E_{av} = \frac{Ap}{prt} \quad (V)$$

$$E_{av} = \frac{100}{40} = 2.5 \text{ V}$$

นั้นคือค่าเฉลี่ย ของพัลส์ในรูปที่ 1.4 (ข) E_{av} คือ 2.5 โวลต์ อนึ่งพัลส์อาจจะเริ่มต้นที่ค่าแรงดันใด ๆ ก็ได้ ไม่จำเป็นต้องเริ่มจากแรงดันเป็นศูนย์เสมอไป ดังนั้นค่าตัวเลขที่ใช้หาค่า A_P ในสมการที่ 1.2 ก็คือผลรวมทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่ของพัลส์กล่าวคือเป็นผลรวมสุทธิของพื้นที่ของพัลส์ซึ่งเป็นบวกและพื้นที่ที่เป็นลบ

1.2.2 ค่าประสิทธิผลของเครื่องมือวัด

ดังนั้นในรูปที่ 1.5 (ก) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายพัลส์ในรูปที่ 1.4 (ข) ทุกประการหากแต่ระดับเริ่มต้นของพัลส์มีค่าต่างกัน รูปของพัลส์ซึ่งปรากฏบนจอของออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 1.5 (ก) เป็นรูปคลื่นขณะที่ทำการวัดแบบกระแสสลับ (Alternating current) และในรูปที่ 1.5 (ข) เป็นรูปคลื่นขณะที่ทำการวัดแบบกระแสตรง (D.C) สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในที่นี้ก็คือเส้นประที่เกิดขึ้นบนจอภาพของออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ทั้งสองกรณีในขณะที่ไม่มีการป้อนสัญญาณใด ๆ จะต้องอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของจอภาพ และการวัดขนาดของพัลส์จะต้องมีระดับเปรียบเทียบระดับหนึ่งซึ่งเป็นระดับกระแสตรง พัลส์ที่เรียกว่า "พัลส์บวก" (Positive pulse) หมายถึง ค่าของกระแสหรือแรงดันของพัลส์นั้นจะมีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับระดับศูนย์ และพัลส์ลบ (Negative pulse) หมายถึง ค่าของกระแสหรือแรงดันของพัลส์นั้นมีค่าเป็นลบเทียบกับระดับศูนย์ ดังนั้นในรูปที่ 1.5 (ก) ในขบวนพัลส์ที่ปรากฏมีทั้งพัลส์บวกและพัลส์ลบ การหาพื้นที่สุทธิของพัลส์ก็คือผลต่างของพื้นที่ของพัลส์บวกและพัลส์ลบนั้นเอง ในรูปที่ 1.6 (ก) และ (ข) กระทั้งถึง (ฉ) แสดงตัวอย่างของลักษณะของพัลส์ของแรงดันที่อาจเป็นไปได้ และระดับเปรียบเทียบของพัลส์นั้น ๆ



รูปที่ 1.5 แสดงภาพบนจอของออสซิลโลสโคปขณะทำการวัดแบบ
(ก) กระแสสลับ และ (ข) กระแสตรง

พัลส์ซึ่งมีรูปร่างเหมือนกัน อาจมีระดับเปรียบเทียบแตกกันได้ การสร้างหรือการเปลี่ยนแปลงระดับเปรียบเทียบกระแสตรงของพัลส์อาจทำได้โดยวงจรไฟฟ้าที่เรียกว่า "วงจรปรับระดับ" (Clamper circuit)

ตัวพารามิเตอร์ที่ควรรู้อีกตัวหนึ่งซึ่งใช้งานเกี่ยวกับพัลส์ก็คือ "ดิวตี้ ไซเคิล" (Duty cycle) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าจุดยอดของคลื่นพัลส์ของแรงดัน โดยทั่วไปแล้วเราจะใช้ค่า ดิวตี้ ไซเคิล ในส่วนที่เกี่ยวกับกำลังของเครื่องส่ง (Transmitter power) ซึ่งปกติจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ เราสามารถคำนวณค่า ดิวตี้ ไซเคิล ของรูปคลื่นพัลส์ของแรงดันที่แสดงในรูปที่ 1.4 (ข) ได้โดย

จากนิยาม

$$\% \text{ duty cycle} = \frac{E_{av} \times 100}{E_{peak}} \quad \% \qquad (1.4)$$

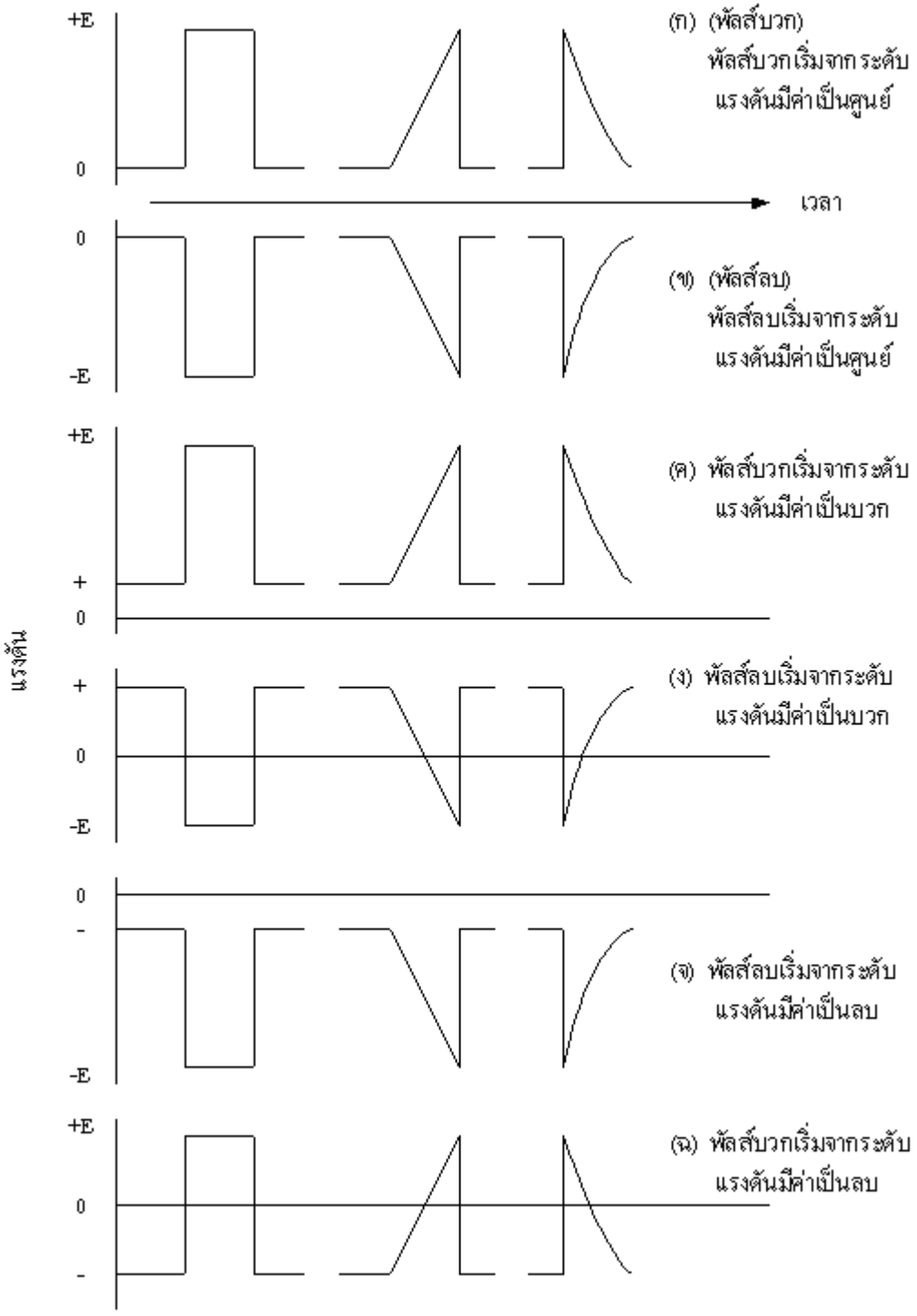
ดังนั้น $\% \text{ duty cycle} = \frac{2.5 \times 100\ \%}{10} = 25\%$

หรือ $\% \text{ duty cycle} = \frac{E_{av} \times 100\ \%}{E_{peak}} = \frac{\frac{A_p}{prt}}{E_{peak}} \times 100\ \%$

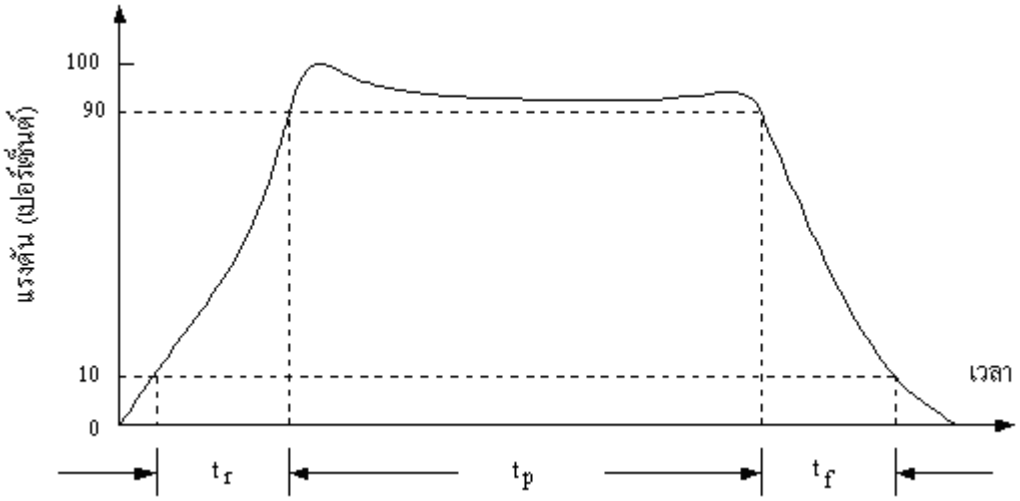
$$= \frac{\frac{t_p \times E_{peak}}{prt}}{E_{peak}} \times 100\ \% = \frac{10 \times 10^{-6} \times 100\ \%}{40 \times 10^{-6}}$$

นั้นคือ ค่าดิวตี้ ไซเคิล = 25%

คลื่นพัลส์ของแรงดันที่แสดงในรูป 1.4 (ข) เป็นรูปคลื่นที่เป็นไปตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแล้วพัลส์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากจะไม่เป็นมุมฉากที่สมบูรณ์เลยทีเดียว แต่โดยทั่วไปจะปรากฏเป็นรูปคลื่นพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 1.7 เมื่อรูปของพัลส์ไม่เป็นมุมฉากปัญหาที่จะติดตามมาก็คือการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของพัลส์จะไม่มีมาตราฐานเปรียบเทียบที่แน่นอนและเหมือนกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกฎเกณฑ์ข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตราฐานขึ้น เพื่อสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของพัลส์ที่ต่างกันได้ เช่น ในการหาค่าความกว้างของพัลส์ ก็ให้ยึดถือข้อกำหนดดังนี้คือความกว้างของพัลส์ กำหนดว่าเป็นช่วงเวลาระหว่างตำแหน่งที่พัลส์มีขนาดเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าจุดยอด (ขนาดของพัลส์)



รูปที่ 1.6 แสดงพัลส์ของแรงดันซึ่งมีขนาด E โวลต์ แต่มีลักษณะต่างกัน



รูปที่ 1.7 แสดงลักษณะของรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากในทางปฏิบัติซึ่งสร้างขึ้นได้จริง ๆ

ดังในรูปที่ 1.7 ก็คือช่วง t_p และสำหรับช่วงระยะเวลาที่พัลส์มีขนาดจาก 10 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของขนาดสูงสุดของพัลส์ เรียกว่า “เวลาไต่ขึ้น” (Rise time) เขียนแทนด้วย t_r ช่วงระยะเวลาที่พัลส์ลดลงจาก 90 เปอร์เซ็นต์ เหลือเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของขนาดสูงสุดของพัลส์ เรียกว่า “เวลาตก” (Fall time) เขียนแทนด้วย t_f หรือบางครั้งเรียกว่า “เวลาลด” (Decay time) ในตำรางบางเล่ม สัญลักษณ์ t_d อาจใช้แทนความกว้างของพัลส์ก็ได้ ว่าแต่ในที่นี้จะขอใช้ t_p เหตุที่เลือกใช้ t_p แทนความกว้างของพัลส์ก็เพราะสัญลักษณ์ t_d มักจะใช้แสดงค่าของเวลาช้า (Delay time) ซึ่งอาจทำให้สับสน

สำหรับในบางคลื่นสัญญาณของพัลส์ ค่าเวลาไต่ขึ้นและเวลาตกจะมีค่าน้อยมากซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเป็นเรื่องยากมากที่จะวัดให้ได้ค่าแม่นยำ หรือถูกต้องจริง ๆ แม้ว่าจะใช้ออสซิสโลสโคปแบบความถี่สูงก็ตาม และเมื่อความกว้างของพัลส์มีค่าน้อยมาก ๆ เวลาไต่ขึ้นและเวลาตกก็ให้ถือว่าเป็นเวลาทั้งหมดของพัลส์

1.3 ลักษณะของรูปคลื่นพัลส์และการสร้างสัญญาณ

1.3.1 ลักษณะของรูปคลื่นพัลส์

พัลส์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากอาจถูกสร้างได้หลายวิธี แต่ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นเพียงบางวิธีเท่านั้น

1. คลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือคลื่นจัตุรัสของแรงดันไฟฟ้าอาจสร้างได้โดยการป้อนสัญญาณรูปไซน์ผ่านเข้าไปในวงจรขยายประเภท A (Class A amplifier) โดยให้สัญญาณรูปไซน์เป็นตัวกระตุ้นให้วงจรขยายทำงานเกินขอบเขต (Overdriven) กล่าวคือในช่วงครึ่งแรกของสัญญาณรูปไซน์จะทำให้ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation) และช่วงครึ่งหลังของสัญญาณรูปไซน์จะทำให้ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายทำงานในย่าน คัตออฟ (Cutoff) ดังนั้นที่ทางออก (Output) ของวงจรขยายจะทำให้ได้คลื่นแรงดัน ซึ่งลักษณะที่พอจะอนุโลมได้ว่าเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก หรือคลื่นจัตุรัสและการที่คลื่นแรงดันนี้จะมีลักษณะคล้ายกับคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

หรือคลื่นจัตรัสมากน้อยเพียงใดก็ขึนอยู่กับการกำหนดจุดทำงาน (Operating point) ของทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายนั้น

2. คลื่นจัตุรัสของแรงดันอาจถูกสร้างโดยการใช้วงจรมัลติไวเบรเตอร์ (Multivibrator) แบบหนึ่งแบบใดก็ได้ ซึ่งวงจรแบบนี้ก็คือวงจรขยาย 2 ภาคมาต่อรวมกันโดยมีตัวต้านทานและตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นตัว "คัปปลิ้ง" (Coupling) หรือนิยมเรียกว่า "อาร์-ซี คัปปลิ้งแอมปลิไฟร์ (R-C coupling amplifier) และผลที่ได้จากวงจรขยายภาคแรกจะถูกป้อนเข้าที่ทางเข้า (Input) ของวงจรขยายภาคที่สองแล้วผลที่ได้จากวงจรขยายของภาคสองนี้ก็จะถูกป้อนให้ย้อนกลับไปยังทางเข้าของวงจรขยายภาคแรกอีก การทำงานของวงจรขยายนี้จะอยู่ในลักษณะทำงานเกินขอบเขต ผลก็คือทำให้ได้สัญญาณของแรงดันที่ทางออกเป็นรูปคลื่นจัตุรัสหรือคลื่นรูปสี่มุมฉาก

3. คลื่นจัตุรัสของแรงดันอาจถูกสร้างได้โดย การใช้แหล่งจ่ายแรงดันคลื่นรูปไซน์ซึ่งมีค่าความถี่หลักมูล (Fundamental frequency) ต่อขนานร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันคลื่นรูปไซน์อื่น ๆ ซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับค่าความถี่หลักคูณกับเลขคี่จำนวนเต็มใด ๆ หรือนิยมเรียกว่า "อ๊อดฮาร์โมนิค"
(Odd harmonic frequencies) ทั้งนี้ต้องทำให้คลื่นรูปไซน์ของแหล่งจ่ายต่าง ๆ มีขนาด (Amplitude) และเฟส (Phase) ที่ถูกต้อง ผลจากการรวมกันระหว่างคลื่นหลักและคลื่นฮาร์โมนิคนี้จะทำให้ได้สัญญาณของแรงดันรูปจัตุรัส ซึ่งอัตราการเกิดพัลส์ซ้ำ (prr) หรือที่เรียกง่าย ๆ ว่าความถี่ของพัลส์นี้จะมีค่าท่ากับความถี่หลัก ที่กำหนดขึ้น

1.3.2 วิธีสร้างสัญญาณพัลส์

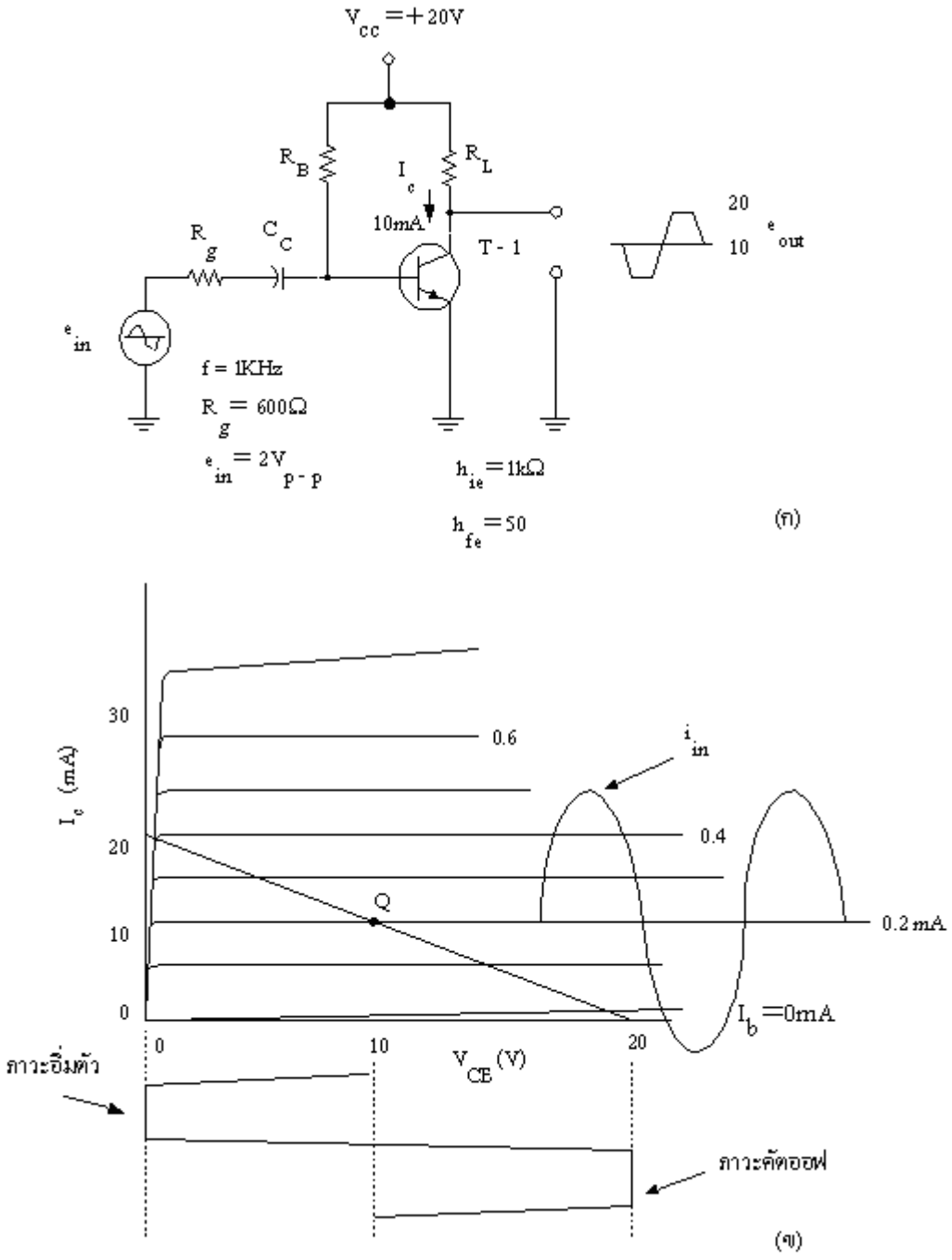
1.3.2. 1 การสร้างคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากของแรงดันโดยวิธีใช้วงจรขยายสัญญาณที่ทำงานเกินขอบเขต

คลื่นจัตุรัสของแรงดันอาจจะสร้างมาจากคลื่นรูปไซน์ของแรงดันได้ โดยการใช้วงจรขยายประเภท A ซึ่งทรานซิสเตอร์ในวงจรนั้นจะถูกทำให้มีการทำงานที่เกินขอบเขต เมื่อถูกป้อนด้วยสัญญาณรูปไซน์ กล่าวคือสัญญาณแรงดันรูปไซน์จะต้องมีขนาดมากพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายมีการทำงานอยู่ในลักษณะที่เกินขอบเขต นั้นคืออยู่ในภาวะอิ่มตัวและภาวะคัตออฟ ขณะที่แต่ละครึ่งช่วงของสัญญาณรูปไซน์ถูกป้อนเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 1.8 (ก)

รูปที่ 1.8 (ข) แสดงการทำงานของทรานซิสเตอร์ เนื่องจากสัญญาณไซน์ที่ป้อนเข้าไปในวงจรขยาย จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัวและภาวะคัตออฟ แรงดันที่ทางออกของวงจรขยายมีลักษณะคล้ายกับเป็นคลื่นรูปจัตุรัส และถ้าหากจุด Q ไม่อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ "เส้นโหลด" (Load line) คลื่นที่ได้จะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ยกตัวอย่างเช่น ในการออกแบบวงจรสวิตซ์ชิ่ง เพื่อให้ได้คลื่นจัตุรัสของแรงดันซึ่งมีความถี่ 1000 H_Z ต้องการขนาดสูงสุดของพัลส์มีค่า 20 โวลต์ จากสัญญาณไซน์ของแรงดันซึ่งมีความถี่ 1000 H_Z และมีขนาดของคลื่นระหว่างจุดยอด (Peak to peak) เป็น 2 V_{P-P} และทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายเป็นซิลิกอนทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนั้น $h_{fe} = 50$, $h_{ie} = 1{,}000\ \Omega$, I_{CO} มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ , แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่ใช้มีค่าปรับได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 โวลต์ และจ่ายกระแสได้ 250 มิลลิแอมป์

จากรูปลักษณะคุณสมบัติซึ่งแสดงในรูปที่ 1.8(ข) จะเห็นได้ว่าเพื่อให้ขนาดของพัลส์มีค่า 20 โวลต์ดังนั้น ค่า V_{cc} ในวงจรรูปที่ 1.8 (ก) จึงต้องมีค่า 20 โวลต์ด้วย ส่วนการเลือกค่าของกระแสคอลเล็กเตอร์อาจทำได้ไม่จำกัด แต่ต้องเข้าใจว่าที่ค่าของกระแสคอลเล็กเตอร์สูง ๆ ค่าอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ของวงจรจะมีค่าไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังนั้นจึงควรเลือกค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ที่ต่ำๆ



รูปที่ 1.8 แสดง (ก) วงจรขยายประเภท A ซึ่งทรานซิสเตอร์ถูกต่อไว้แบบอิมิตเตอร์ร่วมและถูกกำหนดให้มีการทำงานที่เกินขอบเขต (ข) สัญญาณคลื่นที่อินพุตและเอาต์พุตของวงจร

เพื่อให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเป็นเชิงเส้นซึ่งจะทำให้ได้คลื่นรูปจัตุรัสที่สมบูรณ์กว่า เช่น เมื่อเลือกค่าของกระแสคอลเล็กเตอร์ 10 mA. สำหรับจุด Q จุดทำงานของวงจรจากข้อกำหนดเหล่านี้ทำให้สามารถหาค่า R_L ในวงจรได้ดังนี้

$$R_L = \frac{E_{R_L}}{I_c} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} = \frac{20 - 10}{10mA} = \frac{10V}{10mA} = 1{,}000\ \Omega$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์, กระแสเบสและ h_{fe} ของทรานซิสเตอร์ เราใช้ในการกำหนดค่าที่ถูกต้องของกระแสเบสเพื่อให้กระแสคอลเตอร์มีค่า 10 mA

โดย $I_B = \frac{I_C}{h_{fe}} = \frac{10mA}{50} = 0.2\ mA$

สมมุติว่าแรงดันที่ตกคร่อมที่รอยต่อ อิมิตเตอร์-เบส มีค่าน้อยกระทั่งตัดทิ้งได้ ดังนั้นค่าที่ถูกต้องของ R_B คือ

$$R_B = \frac{V_{CC}}{I_B} = \frac{20}{0.2mA}\ 100\ k\Omega$$

นอกจากนี้แล้ว ขณะที่วงจรทำงานเกี่ยวข้องกับสัญญาณกระแสสลับ ส่วนประกอบของวงจรที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานของวงจรขณะได้รับสัญญาณกระแสสลับคือตัวต้านทาน (R_S) และตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C_C) ซึ่งทำหน้าที่คัปปลิ้งสัญญาณกระแสสลับดังนั้นค่าของ R_S และ C_C จึงต้องมีส่วนสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ของวงจรด้วย

การกำหนดค่าของ C_C อาจทำได้โดยการพิจารณาว่าค่า "รีแอคแตนซ์" X_C (Reactance) ของ C_C จะมีผลคล้ายกับความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร ขณะที่สัญญาณกระแสสลับเข้ามาทางอินพุตโดยผ่าน C_C ก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C_C ด้วย ค่าของแรงดันที่ตกคร่อม C_C ควรมีค่าน้อยมาก เพื่อให้แรงดันเกือบทั้งหมดของสัญญาณที่เข้ามาไปปรากฏที่อินพุตของวงจรขยาย

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายโดยไม่คิดค่าของ R_B ก็คือค่า h_{ie} ซึ่งเท่ากับ 1000 Ω และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของ R_B ของวงจรขยายเมื่อคิดรวมกับค่า R_B ก็คือซึ่งเกิดจากอิมพีแดนซ์ของ R_B และ h_{fe} ต่อขนานกัน ซึ่งก็จะมีค่าราว 1000 Ω นั้นเอง ดังนั้นถ้าหากค่า "รีแอคแตนซ์" X_C (Reactance)ของตัวเก็บประจุ C_C มีค่า $1/10$ เท่าหรือน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์

ของวงจรขยาย 10 เท่าแล้วค่าแรงดัน (กระแสสลับ) ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_C ก็อาจพิจารณาได้ว่ามีค่าน้อยและสามารถตัดทิ้งได้

ดังนั้น $X_C = \frac{1}{10} Z_{in} = \frac{1}{10} \times 1000 = 100\ \Omega$

$$C_C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{6.28 \times 10^3 \times 10^2} = 1.59\ \mu F$$

โดยที่ X_C คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของ C_C

Z_{in} คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรขยาย

C_C คือ ค่าความจุไฟฟ้า และ f คือค่าความถี่ของสัญญาณไซน์

จากรูปที่ 1.8 (ข) จะเห็นว่าทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้เต็มที่เมื่อขนาดกระแสอินพุต (หรือกระแสเบส) I_B มีค่าสูงถึง 0.4 mA_{p-p}หรือ 0.1414 mA_{rms} (rms :ค่ารูทมีนสแควร์) นั้นคือทรานซิสเตอร์จะทำงานในภาวะอิ่มตัวและคัทออฟได้พอดี ดังนั้นเมื่อสัญญาณกระแสเบสเพิ่มเป็นสองเท่าคือ 0.8 mA_{p-p} หรือ 0.2828 mA_{rms} แล้วจะทำให้ได้รูปสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุตเป็นรูปคล้ายกับคลื่นจัตุรัสนั่นคือสัญญาณของกระแสเบสจะต้องมีค่า 0.8 mA_{p-p} หรือ 0.2828 mA_{rms} นั้นเอง

สำหรับค่าของ R_S ในวงจรก็เช่นกันจะต้องมีค่าที่เหมาะสมกล่าวคือ เมื่อพิจารณาว่า R_T คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์รวมซึ่งมองจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ

โดย R_g คือค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

ดังนั้น $R_T = R_g + R_S + Z_{in}$

$$R_T = \frac{e_{in}}{i_b} = \frac{0.707\ V}{0.2828\,mA} = 2.5\ k\Omega$$

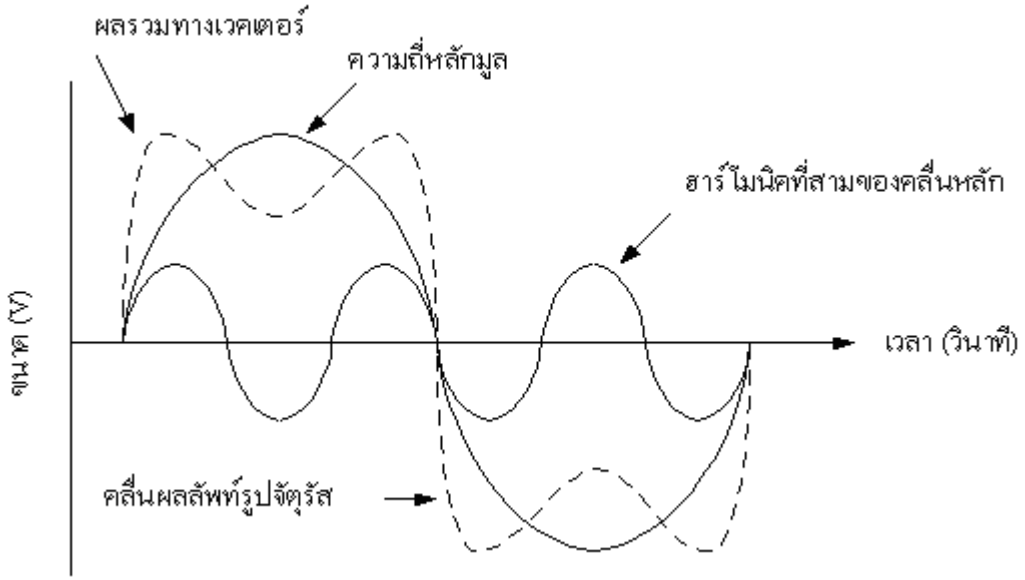
$$R_S = R_T - (R_g + Z_{in})$$

$$= 2.5\ k\Omega - (0.6\ k\Omega + 1k\Omega)$$

$$= 900\ \Omega$$

สิ่งที่ควรเข้าใจให้ดีก็คือ สัญญาณแรงดันที่เอาต์พุตอาจมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากก็ได้ ทั้งนี้เนื่องจากวงจรนี้ไม่มีเสถียรภาพ (Unstability) และค่าของอินพุตอิมพีแดนซ์ก็ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้น

1.3.2.2 การสร้างคลื่นจัตุรัสของแรงดันโดยการรวมคลื่นรูปไซน์



รูปที่ 1.9 แสดงการรวมคลื่นรูปไซน์ทางเวคเตอร์เพื่อให้ได้คลื่นใหม่ในรูปจัตุรัส

ดังที่เคยกล่าวมาแล้วว่าเมื่อต่อแหล่งจ่ายแรงดันคลื่นรูปไซน์ ซึ่งมีค่าความถี่หลักค่าหนึ่งต่อขนานร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันคลื่นรูปไซน์อื่นๆ ซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับความถี่หลักคูณกับเลขคี่จำนวนเต็มใด (3, 5, 7, 9,...) แล้วจะทำให้ได้คลื่นจัตุรัสออกมา, ค่าความถี่ของคลื่นจัตุรัสที่ได้นี้จะเป็นค่าเดียวกันกับความถี่คลื่นหลัก การสร้างคลื่นจัตุรัสด้วยวิธีนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยการเขียนรูปกราฟของคลื่นหลักและความถี่อื่นๆ อีก แล้วรวมกันทางเวคเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งเป็นการรวมคลื่นหลักกับคลื่นอื่นที่มีค่าความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่คลื่นหลัก ผลการรวมของคลื่นรูปไซน์ดังกล่าวนี้ทางเวคเตอร์ จะทำให้ได้คลื่นใหม่ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับคลื่นจัตุรัสดังแสดงด้วยเส้นประ ยิ่งมีการรวมคลื่นรูปไซน์มากเพียงใดลักษณะของคลื่นที่รวมที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับคลื่นจัตุรัสมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าคลื่นจัตุรัส ก็คือ คลื่นซึ่งเกิดจากการรวมคลื่นรูปไซน์จำนวนมากมายไม่จำกัด ซึ่งมีค่าความถี่ต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 0 หรือส่วนที่เป็นกระแสตรงกระทั่งถึงค่าอนันต์ นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสังเกตอีกว่าในทางทฤษฎีแล้ว เครื่องขยายสัญญาณพัลส์รูปจัตุรัส โดยทั่วไปจะต้องมีความสามารถขยายสัญญาณได้ดีทุก ๆ ความถี่ตั้งแต่ต่ำสุดจนถึงค่าอนันต์

จบเนื้อหา บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรูปคลื่น