ชื่อหนังสือ ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์
บาร์โค้ด 9786162135781
ISBN 978-616-213-578-1

ทฤษฎีและการออกแบบ วงจรพัลส์

Pulse Circuits Theory and Design

ตัวอย่าง

เน้นเนื้อหาด้านความเข้าใจ
หลักการทำงานและการออกแบบ
เพื่อสร้างวงจรอย่างง่าย

โดย... นภัทร วัจนเทพินทร์

ISBN 978-616-213-578-1

หนังสือ ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์

ผู้เขียน นภัทร วัจนเทพินทร์

พิมพ์ครั้งที่ 9 พฤษภาคม 2558

ราคา 150 บาท

จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด

28, 30, 32 ซอยรังสิต-ปทุมธานี 16 ซอย 7

ต.ประชาธิปัตย์ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130

โทรศัพท์ 0-2958-1125-7, 0-2567-5119

โทรสาร 0-2567-5105

e-mail: sales@skybook.co.th

www.skybook.co.th

© สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

นภัทร วัจนเทพินทร์.

ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์. -- พิมพ์ครั้งที่ 9 -- ปทุมธานี : สกายบุ๊กส์, 2558.

280 หน้า.

1. วงจรไฟฟ้า. I. ชื่อเรื่อง.

621.381

ISBN 978-616-213-578-1

S79-04-09-010-05-15

หากท่านผู้อ่านพบว่าหนังสือสลับหน้า พิมพ์ไม่ชัดเจน หน้าขาดหายไปครบ
หรือความบกพร่องอื่นใด อันเนื่องมาจากกระบวนการพิมพ์และการเข้าเล่ม
กรุณาส่งหนังสือมาที่บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด เพื่อรับหนังสือเล่มใหม่

คำนำ
(พิมพ์ครั้งที่ 1)

หนังสือทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์ที่ผู้เขียนเรียบเรียงขึ้นนี้ ด้วยเหตุผลว่าปัจจุบันการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ นิยมใช้วงจรรวม (Integrated Circuits) เป็นอุปกรณ์สำคัญในการสร้าง เพราะมีขนาดเล็ก ราคาถูก และมีความเชื่อถือสูง ตำราอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษาวิชาดังกล่าวที่เป็นภาษาไทยมีน้อยมาก ทำให้การค้นคว้าเพื่อการศึกษาในระดับ ปวส. และระดับอุดมศึกษามีอุปสรรค ผู้เขียนจึงรวบรวมเนื้อหาเกี่ยวกับการสร้างและออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ตั้งแต่เบื้องต้นที่ใช้ทรานซิสเตอร์และไดโอด จนพัฒนามาใช้วงจรรวมโอเปอเรชั่นแนลแอมพลิไฟเออร์ (Op-Amp) และ ไอ.ซี. เฉพาะเบอร์ต่าง ๆ เช่น 555 และ 8038 เป็นต้น

ผู้เขียนพยายามเน้นเนื้อหาด้านความเข้าใจหลักการทำงานและการออกแบบเพื่อสร้างวงจรต่าง ๆ อย่างง่าย โดยใช้คณิตศาสตร์ไม่สูงมากนัก เหมาะสำหรับนักศึกษาในระดับ ปวส. หรือ สูงกว่า นำไปใช้ประกอบการเรียน โดยเฉพาะในสาขาช่างอุตสาหกรรม กลุ่มช่างไฟฟ้า ช่างอิเล็กทรอนิกส์ และช่างเทคนิคคอมพิวเตอร์

ผู้เขียนหวังว่าความพยายามครั้งนี้คงก่อให้เกิดประโยชน์ต่อวงการอาชีวศึกษาบ้างไม่มากก็น้อย สิ่งดี ๆ ที่เกิดขึ้นจากประโยชน์ของหนังสือเล่มนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

(นภัทร วัจนเทพินทร์)

มกราคม 2538

ตัวอย่าง

คำนำ

(พิมพ์ครั้งที่ 2 และ 3)

ในการพิมพ์ครั้งที่ 2 และ 3 นี้ ผู้เขียนได้ปรับปรุงแก้ไขคำศัพท์เทคนิคต่าง ๆ ให้ถูกต้องตามมาตรฐานผลงานทางวิชาการ ซึ่งอ้างอิงศัพท์เทคนิควิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

รวมทั้งได้แก้ไขรูปวงจรต่าง ๆ ที่พิมพ์ผิดหรือมีข้อบกพร่องใหม่ ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ที่สุดเท่าที่สามารถจัดทำได้ เพื่อให้ข้อผิดพลาดในหนังสือเล่มนี้มีน้อยที่สุด

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คณะกรรมการผู้ตรวจมาตรฐานผลงานทางวิชาการ ของกระทรวงศึกษาธิการ ที่ได้ให้ข้อแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการพัฒนาผลงานวิชาการและหนังสือประกอบการเรียนวิชาดังกล่าว เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่การอาชีวศึกษาของประเทศไทย

(นภัทร วัจนเทพินทร์)

มกราคม 2540

ตัวอย่าง

สารบัญ

บทที่ 1 ความรู้พื้นฐานเรื่องสัญญาณพัลส์ 9

1.1 ชนิดของรูปคลื่น 9

1.2 คุณลักษณะของรูปคลื่นพัลส์ 15

1.3 รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน 24

แบบฝึกหัดท้ายบท 29

บทที่ 2 วงจรอาร์-ซี 33

2.1 การทำงานของวงจรที่ประกอบด้วย R และ C 33

2.2 กราฟการเก็บและคายประจุ 37

2.3 วงจร RC และสมการที่เกี่ยวข้อง 38

2.4 วงจร RC ที่มีอินพุตเป็นรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม 41

2.5 วงจรอินทิเกรเตอร์ 44

2.6 วงจรดิฟเฟอเรนติเอเตอร์ 47

แบบฝึกหัดท้ายบท 54

บทที่ 3 สวิตชิ่งไดโอด 57

3.1 ไดโอดที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ 57

3.2 ซีเนอร์ไดโอด 59

3.3 วงจรขริบแบบไดโอดอนุกรม 60

3.4 วงจรขริบแบบไดโอดขนาน 64

3.5 วงจรแคลมป์ 68

แบบฝึกหัดท้ายบท 76

บทที่ 4 สวิตช์ทรานซิสเตอร์ 79

4.1 การสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ทางอุดมคติ 79

4.2 สวิตช์ทรานซิสเตอร์ในทางปฏิบัติ 80

4.3 เวลาในการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ 86

4.4 การลดค่าเวลาในการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ 88

ตัวอย่าง

4.5 วงจรกลับสัญญาณแบบต่อตรง 93
4.6 วงจรกลับสัญญาณแบบตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ 97
แบบฝึกหัดท้ายบท 106

บทที่ 5 วงจรจุดชนวนของชมิตต์ 109
5.1 วงจรจุดชนวนของชมิตต์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 109
5.2 การออกแบบเพื่อกำหนดค่า UTP และ ITP 111
5.3 ตัวเก็บประจุสปีดอัพ 114
5.4 วงจรจุดชนวนของชมิตต์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริง 116
5.5 ลักษณะสมบัติทางด้านอินพุตและเอาต์พุต 117
5.6 วงจรจุดชนวนของชมิตต์ที่ใช้ออปแอมป์ 118
แบบฝึกหัดท้ายบท 125

บทที่ 6 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 127
6.1 วงจรโมโนสเตเบิลแบบคอลเลกเตอร์คัปเปิล 127
6.2 การออกแบบวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 130
6.3 การจุดชนวนวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 134
6.4 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ออปแอมป์ 135
6.5 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ที่ใช้ไอ.ซี. ที. ที. แอล. 138
แบบฝึกหัดท้ายบท 140

บทที่ 7 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 141
7.1 อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเลกเตอร์คัปเปิล 141
7.2 อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ออปแอมป์ 145
7.3 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบเปรียบเทียบแรงดัน 147
แบบฝึกหัดท้ายบท 151

บทที่ 8 ไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 153
8.1 วงจรไบสเตเบิลชนิดคอลเลกเตอร์คัปเปิล 153
แบบฝึกหัดท้ายบท 159

บทที่ 9 วงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียง 161
9.1 วงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียงที่ใช้วงจร C และ R 161
9.2 วงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียงชนิดกระแสคงที่ 164
แบบฝึกหัดท้ายบท 169

ตัวอย่าง

บทที่ 10 วงจรรวมชนิดตั้งเวลาเบอร์ 555 ..... **171**

10.1 ไอ.ซี.เบอร์ 555 ..... *171*

10.2 วงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอ.ซี. เบอร์ 555 ..... *171*

10.3 การออกแบบวงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอ.ซี. เบอร์ 555 ..... *174*

10.4 การปรับปรุงวงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอ.ซี. เบอร์ 555 ..... *175*

10.5 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ ไอ.ซี. 555 ..... *177*

10.6 การปรับปรุงวงจรอะสเตเบิลที่ใช้ไอ.ซี. 555 ..... *180*

10.7 การนำไอ.ซี. 555 ไปใช้งาน *182*

แบบฝึกหัดท้ายบท *186*

บทที่ 11 เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่องกำเนิดฟังก์ชัน **187**

11.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ใช้ออปแอมป์ *187*

11.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ *189*

11.3 เครื่องกำเนิดฟังก์ชันที่ใช้ออปแอมป์ *192*

11.4 เครื่องกำเนิดฟังก์ชันที่ใช้วงจรรวม *194*

แบบฝึกหัดท้ายบท *203*

บทที่ 12 วงจรลอจิกเกตเบื้องต้น **205**

12.1 วงจรแอนด์เกตที่ใช้ไดโอด *205*

12.2 วงจรออร์เกตที่ใช้ไดโอด *207*

12.3 นอต แนนด์ และนอร์เกต *210*

แบบฝึกหัดท้ายบท *219*

แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน **223**

ภาคผนวก 1. ข้อมูลบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ **253**

ภาคผนวก 2. ค่ามาตรฐานตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ **274**

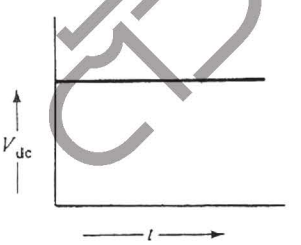
บรรณานุกรม **277**

ตัวอย่าง

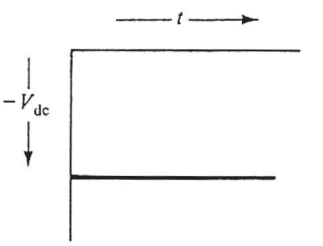
1 ความรู้พื้นฐานเรื่องสัญญาณพัลส์

1.1 ชนิดของรูปคลื่น

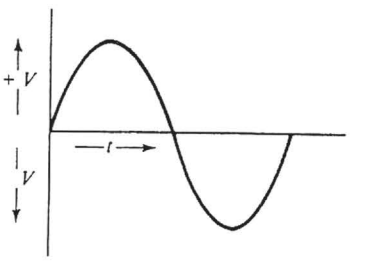
รูปคลื่นที่ปรากฏสม่ำเสมอ (Repetitive waveforms) และรูปคลื่นที่ปรากฏชั่วขณะ (Transients waveforms) รูปคลื่นสัญญาณจะแสดงคุณลักษณะซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (Amplitude) กับเวลา (Time) โดยขนาดอาจปรากฏในรูปของแรงดัน (Voltages) หรือกระแส (Currents) โดยสามารถเขียนลงในกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ เช่น รูปคลื่นของขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านบวก ($+V_{dc}$) และรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านลบ ($-V_{dc}$) แสดงในรูป 1.1 (a), (b) ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่เกิดอย่างต่อเนื่องปรากฏสม่ำเสมอ (Repetitive) อีกลักษณะหนึ่งซึ่งพบเห็นเสมอในการวิเคราะห์รูปคลื่นคือ รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับรูปไซน์ (Sine wave) หรือรูปคลื่นกระแสสลับรูปสี่เหลี่ยม (AC between positive and negative) ซึ่งก็เป็นรูปคลื่นชนิดปรากฏสม่ำเสมอ เช่นกันบางครั้งเรียกว่า Periodic waveform แสดงในรูป 1.1 (c), (d) รูปคลื่นที่ปรากฏชั่วขณะ (Transients) สังเกตได้ชัดเจนจากรูปคลื่นที่เป็นชนิดปรากฏสม่ำเสมอ เช่น V_{dc} ในรูป 1.1 (d) มีสัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นชั่วขณะอาจเกิดขึ้นทางด้านบวกหรือด้านลบ ลักษณะนี้เรียกว่ารูปคลื่นชั่วขณะ (Transient or non-repetitive waveforms)



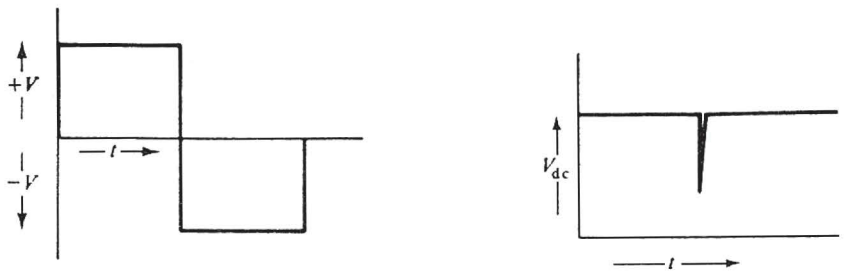
(a) Graph of positive dc voltage versus time



(b) Graph of negative dc voltage versus time



(c) Graph of instantaneous value of ac voltage plotted versus time

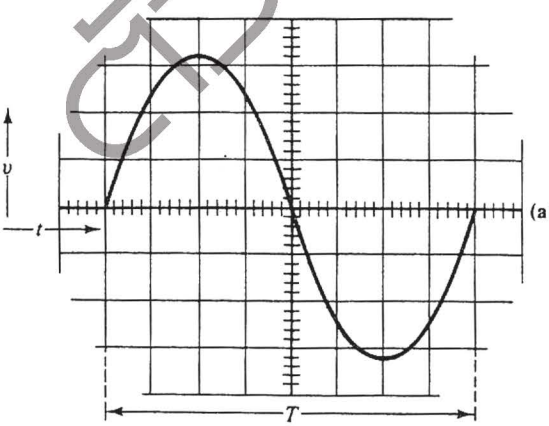


(d) Waveform that alternates between positive and negative dc voltage levels

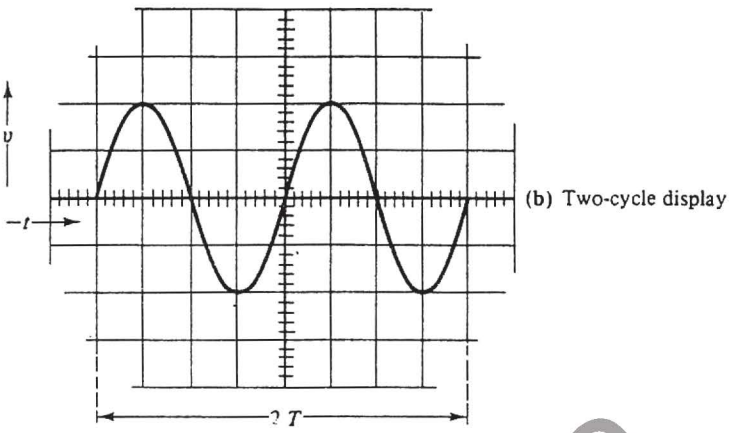
(e) Transient on a dc voltage

รูปที่ 1.1 *แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดัน (หรือกระแส) กับเวลาของรูปคลื่นชนิดต่าง ๆ*

การวัดรูปร่างของรูปคลื่น ใช้เครื่องมือวัดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่เรียกว่าออสซิล-โลสโคป (Cathode - ray oscilloscope) โดยใช้สายวัดจับรูปคลื่นสัญญาณที่ต้องการจะวัด ซึ่งออส-ซิลโลสโคปจะยิงลำแสงอิเล็กตรอนซึ่งกวาดมาจากรูปคลื่นสัญญาณที่ต้องการวัดจริงไปสู่จอเรืองแสง (Fluorescent screen) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 1.2 (a), (b)



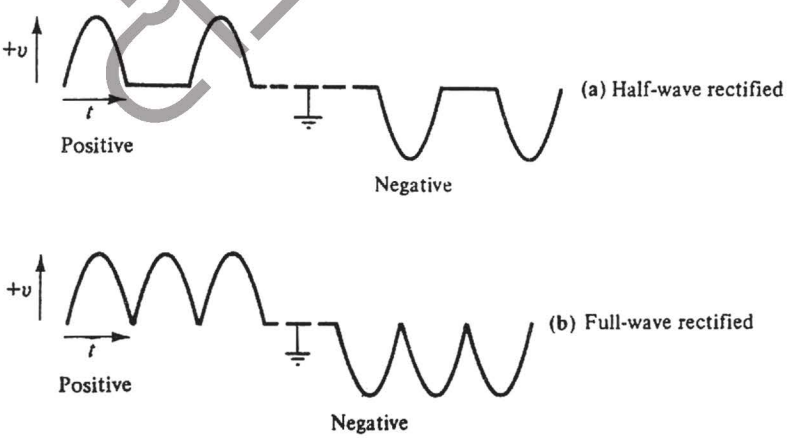
(a) One-cycle display



รูปที่ 1.2 *แสดงรูปคลื่นไซน์ที่วัดจากออสซิลโลสโคป ในแกนตั้ง (Vertical) เป็นแกนขนาดแรงดัน (v) และแกนนอนแสดงเวลา (t)*

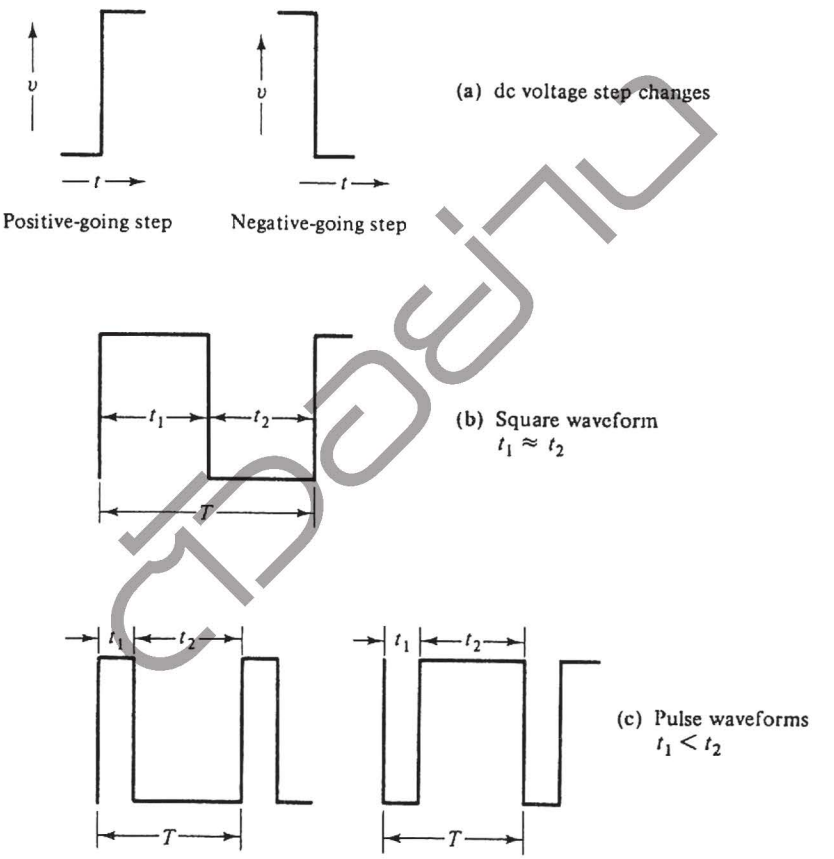
รูปคลื่นชนิดต่าง ๆ (Miscellaneous waveforms)

รูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) เป็นรูปคลื่นทางไฟฟ้าที่พบมากในการทดลองซึ่ง อาจจะพบในลักษณะครึ่งคลื่น (Half wave) หรือเต็มคลื่น (Full wave) ซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์กระแสตรงที่ได้จากการเรียงกระแส (Rectification) หรือรูปคลื่นไซน์กระแสสลับ ดังแสดงในรูป 1.2



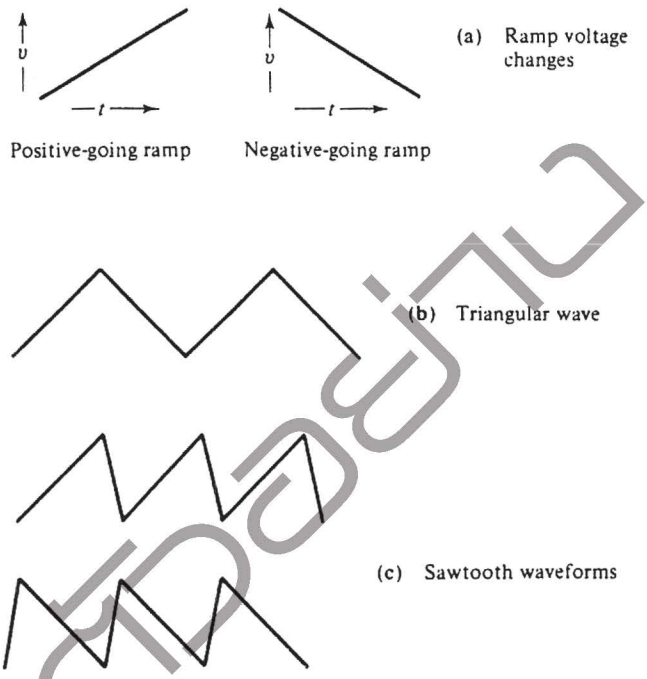
รูปที่ 1.3 *แสดงรูปคลื่นไซน์ที่ได้จากการดัดรูปคลื่นแบบครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น*

รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Rectangular) เกิดจากระดับของแรงดันไฟตรง (V_{dc}) ที่เปลี่ยนแปลงเป็นขั้น (Step changes) หรือรูปคลื่นขั้นบันไดสองลักษณะคือ Positive - going step และ Negative - going step ดังรูป 1.4 (a) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงคาบเวลาด้านบวกของสัญญาณ (t_1) และคาบเวลาด้านลบ (t_2) เท่ากันหรือ $t_1 = t_2$ เราเรียกเฉพาะว่ารูปคลื่นจัตุรัส (Square wave) ดังแสดงในรูป 1.4 (b) แต่ถ้าคาบเวลาของสัญญาณด้านบวก (t_1) และด้านลบ (t_2) ไม่เท่ากันหรือ $t_1 \neq t_2$ จะเรียกชื่อรูปคลื่นนี้ว่า *รูปคลื่นพัลส์* (Pulse waveforms) ดังรูป 1.4 (c)



รูปที่ 1.4 *แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแบบต่าง ๆ เมื่อคาบเวลาของสัญญาณ* $t_1 = t_2$ *และ* $t_1 \neq t_2$

สัญญาณลาดเอียง (Ramp) ประกอบจากลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน ที่มีความลาดเอียงด้านบวก (Positive - going ramp) และรูปคลื่นที่ลาดเอียงทางด้านลบ (Negative going ramp) ในรูป 1.5 (a) ถ้าความลาดเอียงของสัญญาณทั้งสองเท่ากัน เราเรียกว่า *รูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular wave)* รูป 1.5 (b) และถ้าความลาดเอียงของสัญญาณทั้งสองไม่เท่ากันเรียกว่า *รูปคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth waveforms)* ดังในรูป 1.5 (c)



รูปที่ 1.5 *แสดงสัญญาณลาดเอียงแบบต่าง ๆ ที่มีความลาดเอียงของสัญญาณแตกต่างกัน*

รูปคลื่นเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) รูปคลื่นพัลส์บางกรณีเกิดจากการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นไปตามสมการสองสมการ คือสมการที่ 1.1 และ 1.2

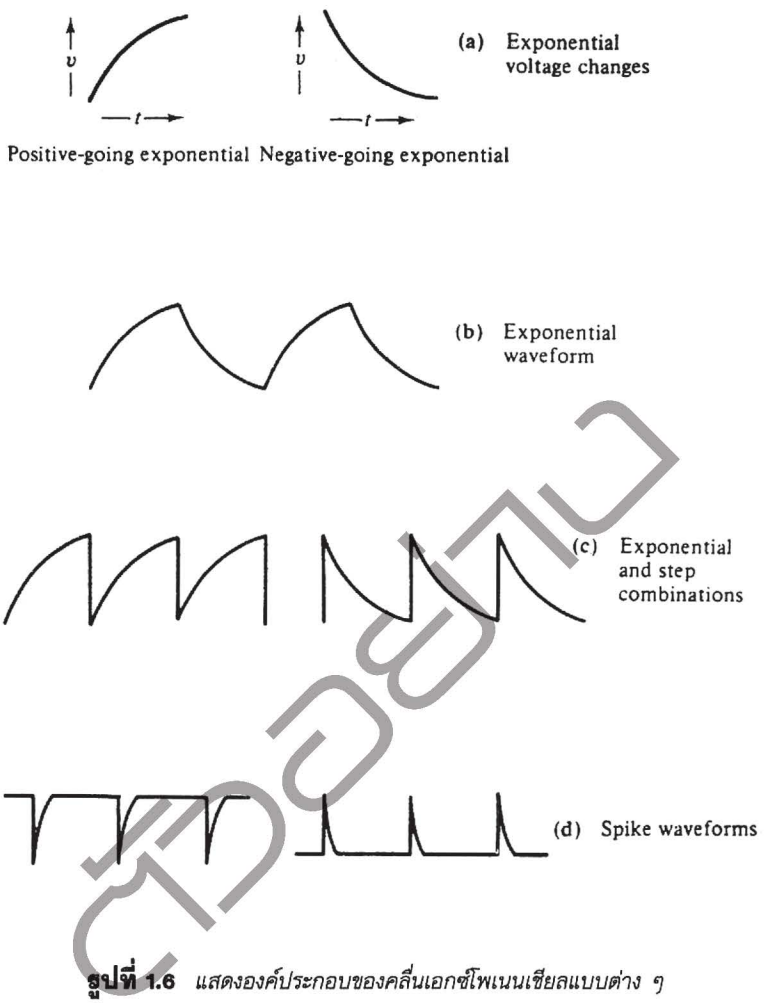
$$V = E.e^{-Kt} \quad \text{.....(1.1)}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ (ค่า R และ C ในวงจร)

e = ค่าคงที่เอกซ์โพเนนเชียล (e = 2.718)

$$V = E\,(1-e^{-Kt}) \quad \text{.....(1.2)}$$

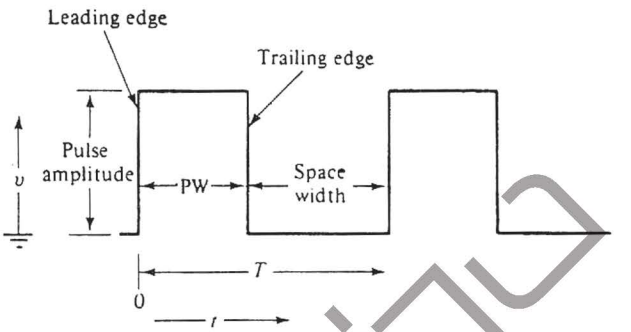
สมการ 1.1 ทำให้เกิดคลื่นเอกซ์โพเนนเชียลแบบ Positive - going และสมการ 1.2 ทำให้เกิดคลื่นเอกซ์โพเนนเชียลแบบ Negative - going ดังแสดงในรูปคลื่นเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential waveform) ดังรูป 1.6 (b) และถ้านำคลื่นเอกซ์โพเนนเชียลผสมกับรูปคลื่นขั้นบันไดจะเป็นดังรูป 1.6 (c),(d)



รูปที่ 1.6 *แสดงองค์ประกอบของคลื่นเอกซ์โพเนนเชียลแบบต่าง ๆ*

1.2 คุณลักษณะของรูปคลื่นพัลส์

รูปคลื่นพัลส์ในอุดมคติ (Ideal pulse waveform) คือรูปคลื่นของพัลส์ที่พิจารณาโดยไม่คิดช่วงเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้นในขณะที่สัญญาณพัลส์มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับแรงดันต่ำไปสู่ระดับแรงดันสูง หรือจากระดับแรงดันสูงไปสู่ระดับแรงดันต่ำ ลักษณะของรูปคลื่นพัลส์ในอุดมคติแสดงในรูป 1.7



รูปที่ 1.7 *แสดงคุณลักษณะของรูปคลื่นพัลส์ในอุดมคติ*

ขนาดของพัลส์ (Pulse amplitude) คือค่าที่วัดจากระดับแรงดันศูนย์โวลต์ไปถึงค่าสูงสุด (Peak value) ของพัลส์

ขอบหน้าของพัลส์ (Leading edge or rising edge or positive – going edge) คือขั้นของสัญญาณที่เปลี่ยนค่าจากระดับแรงดันต่ำไปสู่ขนาดแรงดันสูงสุด พิจารณาจากที่เวลา t = 0

ขอบหลังของพัลส์ (Trailing edge or falling edge or negative – going edge) คือขั้นของสัญญาณที่เปลี่ยนค่าจากระดับแรงดันสูงสุดของพัลส์ไปสู่ระดับต่ำสุดของพัลส์

คาบเวลาของพัลส์ (Time period) ใช้ตัวย่อว่า (T) คือ ระยะเวลาที่วัดจากขอบหน้าของพัลส์ที่เวลา t = 0 จนถึงขอบหน้าของพัลส์รูปคลื่นต่อไป

ถ้าคาบเวลาของพัลส์มีค่า T = 1 วินาที (Sec)

ความถี่ของพัลส์ (Pulse Repetition Frequency or PRF)

= 1 วัฏจักร (Cycle)

หรือ = 1 พัลส์ต่อวินาที (Pulse Per Sec or PPS)

หรือ PRF = 1/T PPS

ความกว้างของพัลส์ (Pulse Width or PW) คือช่วงเวลาที่วัดจากขอบหน้าของพัลส์จนถึงขอบหลังของพัลส์

ช่องว่างระหว่างพัลส์ (Space Width or SW) คือช่วงเวลาที่วัดจากขอบหลังของพัลส์รูปคลื่นแรกจนถึงขอบหน้าพัลส์รูปคลื่นถัดไป

อัตราส่วนของพัลส์ (M/S ratio) คืออัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ PW กับช่องว่างระหว่างพัลส์

$$\text{M/S ratio} = PW/SW$$

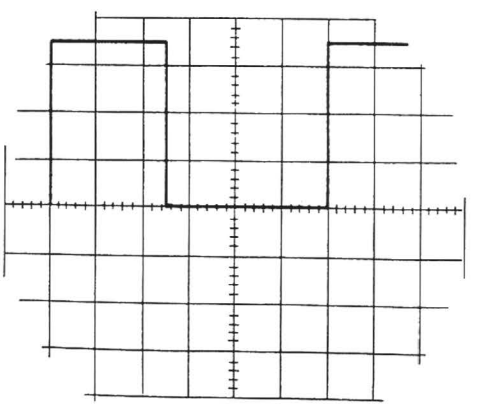
วัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle) คือร้อยละของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ (PW) กับคาบเวลาของพัลส์ (T)

$$\text{Duty cycle} = \frac{PW}{T} \times 100\%$$

ตัวอย่าง 1.1 จากรูปคลื่นในรูป 1.8 จงคำนวณหาขนาดของพัลส์ (Pulse amplitude), PRF, PW, Duty cycle, M/S ratio เมื่อสเกลตามหน้าปัดของออสซิลโลสโคปที่แสดงในรูป 1.8 ดังนี้ Vertical scale = 1 V/division และ Horizontal scale = 0.1 mS/division

วิธีทำ

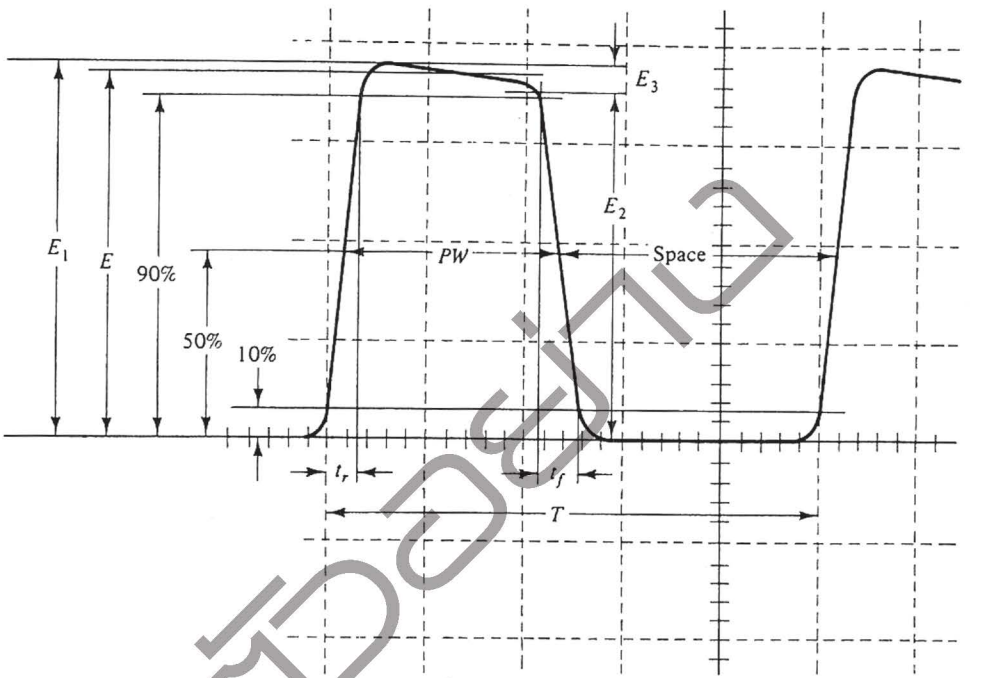
$$\text{Pulse amplitude} = 3.5 \text{ division} \times 1 \text{ V/division}$$
$$= 3.5 \text{ V}$$
$$T = 6 \text{ division} \times 0.1 \text{ mS/division}$$
$$= 0.6 \text{ mS}$$
$$PRF = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.6 \text{ mS}} = 1667 \text{ PPS}$$
$$PW = 2.5 \text{ division} \times 0.1 \text{ mS/division}$$
$$= 0.25 \text{ mS}$$
$$\text{Space width} = 3.5 \text{ division} \times 0.1 \text{ mS/division}$$
$$= 0.35 \text{ mS}$$
$$\therefore \text{Duty cycle} = \frac{PW}{T} \times 100\ \%$$
$$= \frac{0.25 \text{ mS}}{0.35 \text{ mS}} \times 100\ \% = 41.7\%$$
$$\text{M/S ratio} = \frac{PW}{SW} = \frac{0.25 \text{ mS}}{0.35 \text{ mS}} = 0.71$$



รูปที่ 1.8 *รูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมที่ใช้ในตัวอย่างที่ 1.1*

ตัวอย่าง

เวลาไต่ขึ้น, เวลาตก และความลาดเอียง (Rise time, Fall time and Tilt) พัลส์ในรูป 1.8 เป็นพัลส์ในอุดมคติที่มีความสมบูรณ์ เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีขอบ และมุมตรงตามสเกล แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณพัลส์ในรูป 1.8 จะมีลักษณะดังรูป 1.9 ซึ่งจะทำให้มองเห็นความเปลี่ยนแปลงของระดับของสัญญาณ (Amplitude) และช่วงเวลาต่าง ๆ ว่าไม่ราบเรียบสมบูรณ์เหมือนกับสัญญาณพัลส์ในอุดมคติ



รูปที่ 1.9 *แสดงรูปคลื่นของพัลส์ของรูป 1.8 ในทางปฏิบัติ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงเวลาไต่ขึ้น เวลาตกและความลาดเอียง*

เวลาไต่ขึ้น (Rise time or t_r) หมายถึงระยะเวลาที่สัญญาณพัลส์ขอบหน้า (Leading edge) เปลี่ยนแปลงจากขนาดของสัญญาณที่ 10 % ไปจนถึงขนาดสัญญาณ 90 % ของขนาดสูงสุด จากรูป 1.9 t_r = 90 % ของ E_1

เวลาตก (Fall time or t_f) หมายถึงระยะเวลาที่สัญญาณพัลส์ขอบหลัง (Trailing edge) ตกจากระดับของสัญญาณที่ 90 % ลงไปจนถึง 10 % ของขนาดสูงสุดของขอบหลังของพัลส์ จากรูป 1.9 t_f = 90 % ของ E_2

ความกว้างของพัลส์ (PW) ต้องวัดมาจากค่าเฉลี่ยของความกว้างทั้งหมด เนื่องจากถ้าวัด PW ที่จุดสูงสุด และถ้าวัด PW ที่จุดต่ำสุดของพัลส์ จะได้ค่าไม่เท่ากัน จึงต้องใช้ค่าเฉลี่ย คือวัด PW ที่ 50 % ของขนาดสูงสุดของแรงดันเฉลี่ย (E) ในกรณีของช่องว่างของพัลส์ (SW) ก็เช่นเดียวกัน คือวัดที่จุด 50 % ของแรงดันเฉลี่ย (E) ดังนั้นคาบเวลาของสัญญาณ (T) จะเท่ากับ PW+SW

ค่าขนาดแรงดันเฉลี่ยของพัลส์ (Average pulse amplitude) คือค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากค่าขนาดสูงสุดของพัลส์ขอบหน้า (E_1) และค่าขนาดสูงสุดของพัลส์ขอบหลัง (E_2) ดังสมการ

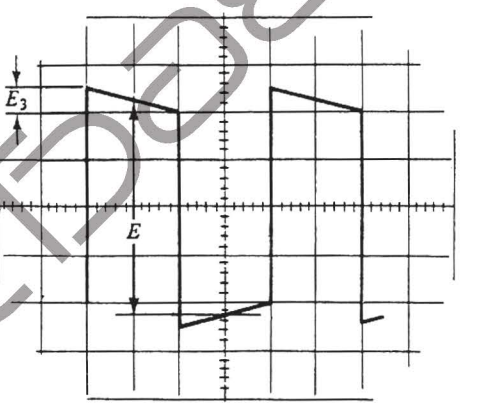
$$E = \frac{E_1+E_2}{2}$$

ความลาดเอียง (Tilt) หมายถึง ความลาดเอียงบริเวณระดับของสัญญาณสูงสุดของขอบหน้าของพัลส์มาจนถึงขอบหลังของพัลส์ อาจเกิดขึ้นได้ทั้งด้านบวก และด้านลบของสัญญาณ ตัวอย่างในรูป 1.9 เกิดเฉพาะด้านบวกเท่านั้น ค่าของความลาดเอียงบางครั้งเรียกชื่อว่า Factional tilt มีค่าเท่ากับระดับความแตกต่างของขนาดสูงสุดของขอบหน้าพัลส์ กับขนาดสูงสุดของขอบหลังพัลส์เทียบกับอัตราส่วนของขนาดของพัลส์เฉลี่ยดังสมการ

$$\text{Tilt} = \frac{E_2-E_1}{E} \times 100\ \%$$

$$= \frac{E_3}{E} \times 100\ \%$$

ในกรณีที่รูปคลื่นพัลส์ที่มีความลาดเอียงทั้งด้านบนและด้านล่างของระดับสัญญาณดังแสดงในรูป 1.10 สามารถหาค่าของความลาดเอียงได้เช่นกัน โดยใช้สมการความลาดเอียง



รูปที่ 1.10 *แสดงรูปคลื่นพัลส์ที่มีความลาดเอียงทั้งด้านบนและด้านล่าง*

ตัวอย่าง 1.2 รูปคลื่นที่แสดงในรูป 1.9 จงคำนวณหาค่าของ

1. Pulse amplitude
2. Tilt
3. t_r, t_f
4. PW, PRF
5. M/S ratio, Duty cycle

เมื่อกำหนดให้สเกลของออสซิลโลสโคปในแนวตั้ง 100 mV/division และสเกลในแนวนอนเท่ากับ 100 μS/division

วิธีทำ 1. Average pulse amplitude,

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

$$= \frac{380\ mV + 350\ mV}{2}$$

$$= 365\ mV$$

2. $$Tilt = \frac{E_1 - E_2}{E} \times 100\ \%$$

$$= \frac{380\ mV - 350\ mV}{365\ mV} \times 100\ \%$$

$$= 8.2\ \%$$

3. t_r = 0.3 division x 100 µS/division

= 30 µS

t_f = 0.4 division x 100 µS/division

= 40 µS

4. PW = 2.2 division x 100 µS/division

= 220 µS

T = 5 division x 100 µS/division

= 500 µS

$$PRF = \frac{1}{T} = \frac{1}{500\ \mu S} = 2000\ PPS$$

5. $$M/S\ ratio = \frac{PW}{SW}$$

แต่ SW = 2.8 division x 100 µS/division

= 280 µS

$$\therefore M/S = \frac{220\ \mu S}{280\ \mu S} = 0.79$$

$$Duty\ cycle = \frac{PW}{T} \times 100\ \%$$

$$= \frac{220\ \mu S}{500\ \mu S} \times 100\ \%$$

$$= 44\ \%$$

การคำนวณค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นพัลส์ (Average voltage, V_{av}) คือการนำเอาพื้นที่ที่เกิดพัลส์ ในช่วงความกว้างของพัลส์ PW ทั้งที่ปรากฏทางด้านบวก และด้านลบมารวมกัน และหารด้วยคาบเวลาของสัญญาณพัลส์ (T) ดังแสดงในรูป 1.11 (a)

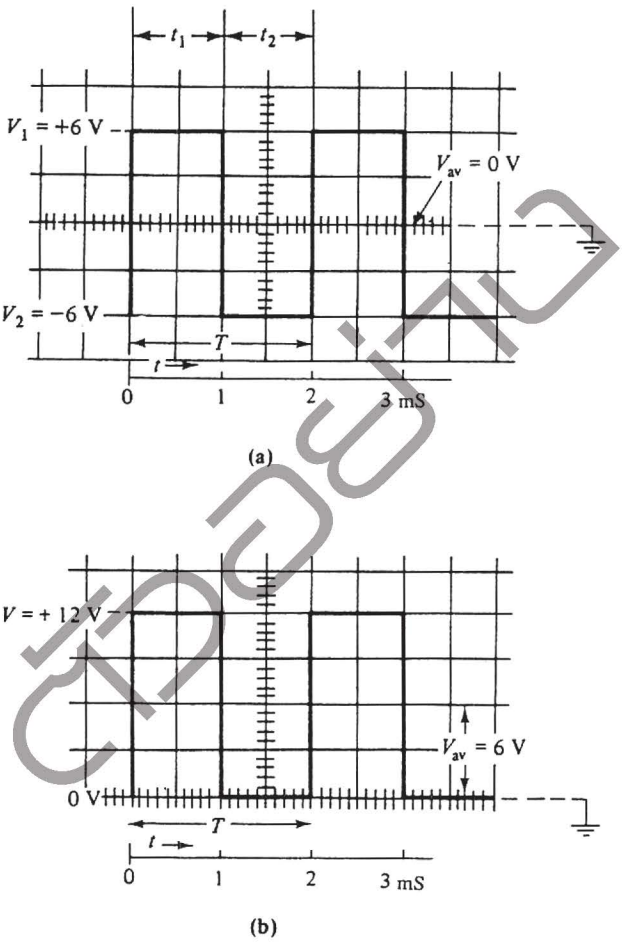
$$V_{av} = \frac{(V_1 \times t_1) + (V_2 \times t_2)}{T}$$

ตัวอย่าง

$$= \frac{(+6V \times 1\ mS) + (-6V \times 1\ mS)}{2\ mS}$$

$$V_{av} = 0\ V$$

จากรูป 1.11 (a) จะเห็นว่าค่าแรงดันเฉลี่ยของรูปคลื่นพัลส์ที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square wave) ที่มีพื้นที่ของพัลส์เท่ากับทั้งด้านบวกและด้านลบจะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 1.11 *แสดงรูปคลื่นพัลส์แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส*

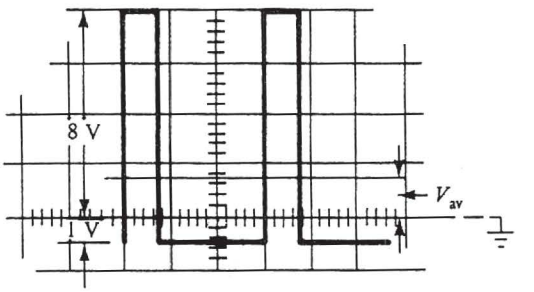
รูปคลื่นจัตุรัสที่แสดงในรูป 1.11 (b) เป็นรูปคลื่นที่มีเฉพาะด้านบวกเท่านั้น การคำนวณค่าแรงดันเฉลี่ยของรูปคลื่นจึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{av} = \frac{(V_1 \times t_1)}{T}$$

$$= \frac{(+12\ V \times 1\ mS) + 0}{2\ mS}$$

$$\therefore\ V_{av} = +6\ V$$

ตัวอย่าง 1.3 จากรูปคลื่นพัลส์ต่อไปนี้ จงคำนวณหาค่าแรงดันเฉลี่ยของรูปคลื่น



วิธีทำ

$$V_{av} = \frac{(V_1 \times t_1) + (V_2 \times t_2)}{T}$$

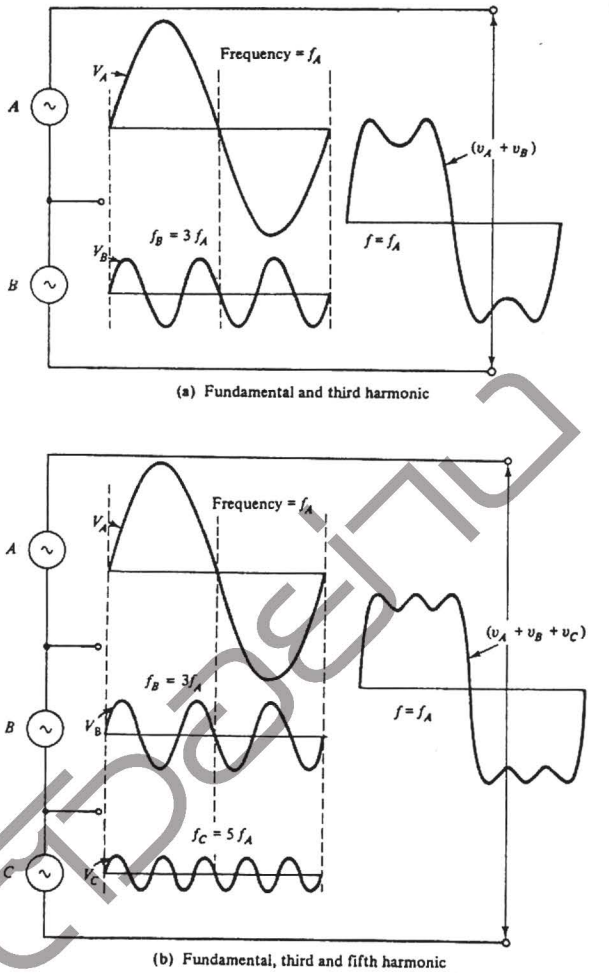
$$= \frac{(8\ V \times 0.8\ mS) + (-1\ V \times 2.2\ mS)}{3\ mS}$$

$$= 1.4\ V$$

การสร้างและกำเนิดสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม หลักการสร้างและกำเนิดสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมมีหลายวิธีการตัวอย่างเช่น การใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกันเป็นฮาร์มอนิกเลขคี่หลาย ๆ เครื่องต่ออนุกรมกัน หรือการใช้วงจรมัลติไวเบรเตอร์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ หรือวิธีการป้อนรูปคลื่นสัญญาณไซน์ให้กับวงจรขยายทรานซิสเตอร์คลาส A ที่ทำงานแบบขยายสัญญาณเกินขอบเขต เป็นต้น

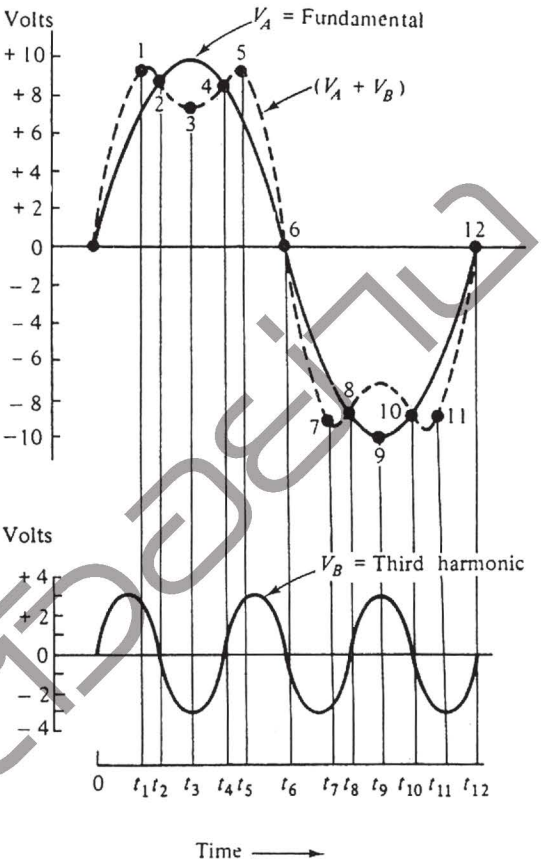
การใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไซน์ในกรณีที่ 1 สามารถยกตัวอย่างได้ดังรูป 1.13 (a) โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไซน์ A ผลิตรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับ f_A ซึ่งกำหนดไว้ให้เป็นคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล (Fundamental sine wave) เครื่องกำเนิดสัญญาณไซน์ B ผลิตรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่มากกว่า f_A เป็นฮาร์มอนิกเลขคี่ คือ 3, 5, 7,... ในตัวอย่างนี้ใช้ความถี่ $f_B = 3\ f_A$ คือใช้ความถี่สัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3 นำเครื่องกำเนิดทั้งสองตัวต่ออนุกรมกันจะได้รูปคลื่นสัญญาณใหม่ คือ $V_A + V_B$ ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่หลักมูลแต่มีรูปคลื่นคล้ายกับพัลส์สี่เหลี่ยม

ถ้าต้องการผลิตรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นพัลส์ในอุดมคติมากที่สุดต้องใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกเลขคี่หลาย ๆ ตัวต่ออนุกรมเพิ่มเข้าไป ดังตัวอย่างในรูป 1.13 (b) ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไซน์ 3 เครื่อง เครื่อง A กำหนด V_A มีความถี่ f_A = ความถี่หลักมูล, เครื่อง B กำเนิด V_B มีความถี่ $f_B = 3$ เท่าของความถี่หลักมูล ($f_B = 3\ f_A$), เครื่องกำเนิด C กำเนิด V_C มีความถี่ $f_C = 5\ f_A$ (f_C เป็น 5 เท่าของความถี่หลักมูล) เมื่อนำมารวมกันแล้วจะได้รูปคลื่น ($V_A + V_B + V_C$) ที่มีความถี่เท่ากับ f_A และจะมีรูปคลื่นปรับเข้าใกล้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมมากขึ้น



รูปที่ 1.13 *แสดงการกำเนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากการรวมกันของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกัน*

การรวมกันของรูปคลื่น คือการบวกและลบกันของขนาดของสัญญาณ (Amplitude) โดยพิจารณาที่เวลาต่าง ๆ กัน ในรูป 1.14 เป็นตัวอย่างการรวมรูปคลื่นที่มีความถี่มูลฐานกับรูปคลื่นที่มีความถี่เป็นฮาร์มอนิกที่สาม โดยพิจารณาที่เวลา $t_0 - t_{12}$ จะเห็นว่าผลการรวมรูปคลื่นจะเป็นไปตามเส้นประของสัญญาณ $(V_A + V_B)$ ซึ่งตรงกันกับรูปคลื่นที่แสดงในรูป 1.13 (a)



รูปที่ 1.14 *แสดงการรวมสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักมูลกับสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เท่ากับฮาร์มอนิกที่ 3 ของความถี่หลักมูล*

สำหรับหลักการกำเนิดสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมวิธีอื่น ๆ จะกล่าวโดยละเอียดในเนื้อหาเรื่องวงจรมัลติไวเบรเตอร์ และเรื่องวงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์

1.3 รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน

รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน (Waveform distrotion) และผลตอบสนองของความถี่มีความสัมพันธ์กัน โดยปกติเมื่อป้อนรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมเข้าไปในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics component) ต่าง ๆ ผลลัพธ์ของสัญญาณพัลส์ที่ผ่านออกมาทางเอาต์-พุตจะผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้ามา ถ้าปรากฏดังรูป 1.15 (a) แสดงว่ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมผิดเพี้ยนไปเนื่องจากวงจรให้ผลตอบสนองต่อความถี่สูง (High-frequency response) ไม่ได้ดีนัก จะเกิดเวลาไต่ขึ้นของสัญญาณมากกว่าปกติ (Long rise time)

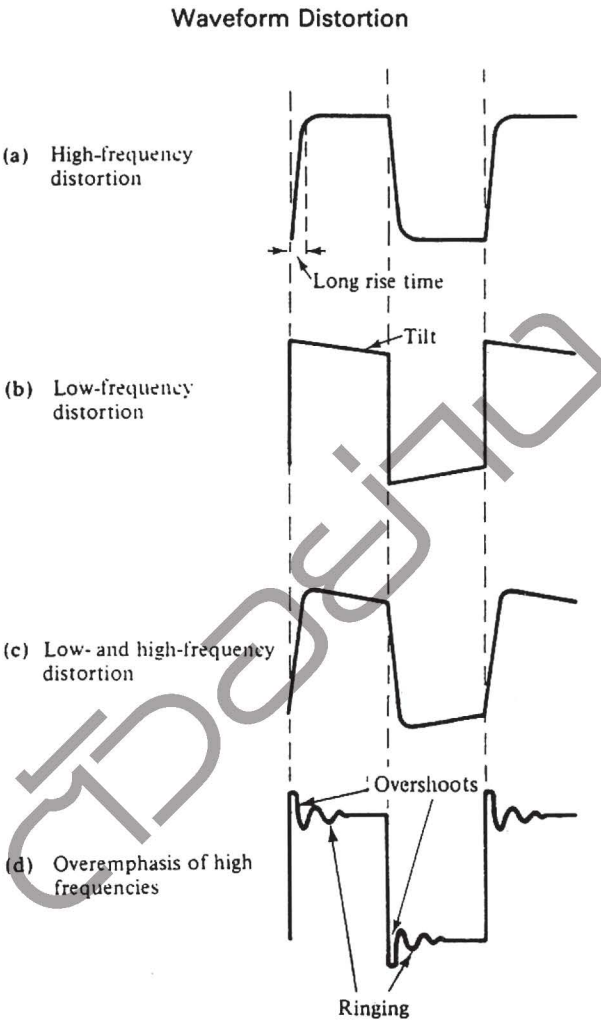
จากรูป 1.15 (b) เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการป้อนพัลส์สี่เหลี่ยมเข้าไปในวงจรที่มีผลการตอบสนองความถี่สูงได้ดี แต่ตอบสนองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low-frequency Response) ได้ไม่ดี จะเกิดการผิดเพี้ยนขึ้น สังเกตจากช่วงความลาดเอียงของความลาดเอียงมีมากขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่า Low-frequency distortion แต่ถ้าสัญญาณที่เกิดขึ้นจากวงจรที่มีผลการตอบสนองความถี่ที่ไม่ดีทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความที่สูง จะเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณเป็นผลรวมจากกรณีรูปที่ 1.15 (a) และ 1.15 (b) ผสมกันเป็นรูป 1.15 (c) เรียกว่า Low-and-high frequency distortion ในกรณีรูป 1.15 (d) เป็นลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากพัลส์สี่เหลี่ยมที่ป้อนเข้าวงจรที่มีผลของตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) และตัวเก็บประจุ (Capacitance) ต่ออยู่ จะเกิดสัญญาณโอเวอร์ชูตและสัญญาณแกว่ง (Over shoot and ringing) เกิดขึ้น ดังรูป 1.15 (d)

ความถี่ตัด (Cutoff frequency) การตอบสนองความถี่ของวงจรขยายนั้นจะตอบสนองได้ดี หมายถึงเมื่อขยายสัญญาณแล้วขนาดของสัญญาณเอาต์พุตไม่ลดลง ได้ที่ย่านความถี่ช่วงใดช่วงหนึ่งเท่านั้น ขึ้นอยู่กับค่า R และ C ในวงจรกรองความถี่แบบต่าง ๆ

ความถี่ตัด หมายถึง ค่าของความถี่ค่าใดค่าหนึ่งที่ทำให้แรงดันเอาต์พุต ของวงจรกรองความถี่มีค่าลดลง เหลือเท่ากับ 0.707 เท่าของสัญญาณแรงดันอินพุต ความถี่ตัดมี 2 ย่านคือ

1. Upper cutoff frequency (f_H) คือค่าความถี่สูงที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเท่ากับ 0.707 ของ e_{in} (กรณีนี้จะเกิดกับวงจร RC-Integrator) มีความสัมพันธ์กับค่าเวลาไต่ขึ้น (t_r) และเวลาตก (t_f) ของวงจรดังสมการ

$$t_r = t_f = \frac{0.35}{f_H} \qquad \text{.....(1.5)}$$



รูปที่ 1.15 *แสดงลักษณะของรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมที่เกิดจากผลการตอบสนองความถี่ต่าง ๆ และผลของโอเวอร์ชูตที่เกิดกับสัญญาณ*

ตัวอย่าง 1.4 รูปคลื่นเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณพัลส์รูปหนึ่งมี t_r = 1 μS จงคำนวณค่าความถี่คัตออฟของวงจร

วิธีทำ จากสมการ 1.5

$$f_H = \frac{0.35}{t_r}$$

$$= \frac{0.35}{1\ \mu S} = 350\ kHz$$

ตัวอย่าง 1.5 รูปคลื่นพัลส์มีความถี่ 1.5 kHz มี Duty cycle = 3 %

(a) จงคำนวณค่าความถี่ตัดสูงสุดที่วงจรทำงานได้

(b) ถ้าป้อนพัลส์ความถี่ 1.5 kHz เข้าวงจรขยายที่มีขีดจำกัดความถี่สูง (High – frequency limit) ที่ 1 MHz จงคำนวณค่า PW ที่มีค่าสูงสุด และ Duty cycle ของสัญญาณ

วิธีทำ (a) ที่ Duty cycle 3% จงคำนวณค่า f_H

$$PW = 0.03 \times T$$

$$= 0.03 \times \frac{1}{f} = 0.03 \times \frac{1}{1.5\ kHz}$$

$$= 20\ \mu S$$

แต่ t_r = 10% ของ PW (ค่าโดยประมาณ)

$$\therefore t_r = 0.1 \times 20\ \mu S = 2\ \mu S$$

จากสมการ 1.5 $f_H = \frac{0.35}{t_r} = \frac{0.35}{2\ \mu S}$

$$= 175\ kHz$$

(b) จากสมการ 1.5 ที่ความถี่ตัด = 1 MHz

$$t_r = \frac{0.35}{f_H}$$

$$= \frac{0.35}{1\ MHz}$$

$$= 0.35\ \mu S$$

แต่ f_r = 10% ของ PW

$$\therefore PW = 10 \times t_r$$

$$= 10 \times 0.35\ \mu S = 3.5\ \mu S$$

$$\text{Duty cycle} = \frac{PW}{T} \times 100\ \% = PW \times f \times 100\ \%$$

$= 3.5\ \mu S \times 1.5\ kHz \times 100\ \%$

$= 0.5\ \%$

2. ความลาดเอียง และ Lower cutoff frequency เมื่อจ่ายคลื่นพัลส์ที่สมบูรณ์ผ่านวงจรที่มีค่า Lower cutoff frequency เท่ากับศูนย์ $f_L = 0$ ด้านบนของรูปคลื่นจะเรียบ แต่เมื่อ f_L มีค่ามากกว่าศูนย์ จะเกิดความลาดเอียงขึ้นที่เอาต์พุตของคลื่นพัลส์ (รูป 1.15 (b)) ที่ค่าความลาดเอียงน้อยกว่า 10 % ค่าของความลาดเอียงจะแปรผันกับความกว้างของพัลส์ (PW) และค่าความถี่คัตออฟ (f_L) ดังสมการ (1.6)

เมื่อ Tilt = ความลาดเอียง

$\therefore$ Tilt $= 2\pi f_L \times PW$ .....(1.6)

เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม

$$T = 2 \times PW = \frac{1}{f}$$

ดังนั้น $$\text{Tilt} = \frac{\pi f_L}{f}$$ .....(1.7)

ในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่า Lower cutoff frequency (f_L) ได้จากสมการ (1.6) และ (1.7)

เมื่อ f = ความถี่ของพัลส์อินพุต

f_L = Lower cutoff frequency

Tilt = ความลาดเอียง

PW = ความกว้างของพัลส์อินพุต

ตัวอย่าง 1.6 วงจรขยายวงจรหนึ่งมี Lower Cutoff Frequency = 10 Hz เมื่อป้อนพัลส์สี่เหลี่ยมเข้าทางอินพุต ปรากฏว่าสัญญาณเอาต์พุตมีค่า Tilt = 2 % จงคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าไป

วิธีทำ จากสมการ 1.7

$$f = \frac{\pi f_L}{\text{Tilt}}$$

$$= \frac{\pi \times 10\ Hz}{0.02}$$

$$= 1.57\ kHz$$

ตัวอย่าง

ตัวอย่าง 1.8 จงคำนวณค่า Upper และ Lower cutoff frequency ของวงจรที่ทำการขยายสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 1 kHz โดยค่า t_r และ t_f ของสัญญาณเอาต์พุตไม่เกิน 200 nS และค่าความลาดเอียงไม่เกิน 3 %

วิธีทำ จากสมการ 1.5

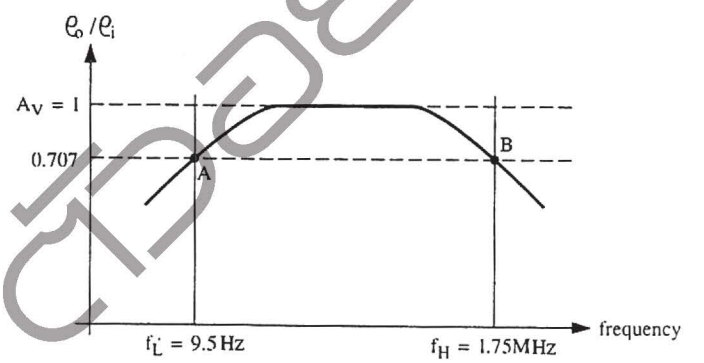
$$f_H = \frac{0.35}{t_r} = \frac{0.35}{200\ nS} = 1.75\ MHz$$

จากสมการ 1.7

$$f_L = \frac{f \cdot tilt}{\pi}$$

$$= \frac{1\ kHz \times 0.03}{\pi} = 9.5\ Hz$$

จากตัวอย่าง 1.8 หมายความว่า ย่านการตอบสนองความถี่ของวงจรขยายนี้มีค่าตั้งแต่ 9.5 Hz ถ้า 1.75 MHz คือเครื่องขยายหรือวงจรขยายจะทำงานได้ดีที่สุดในย่านดังกล่าว ดังรูป



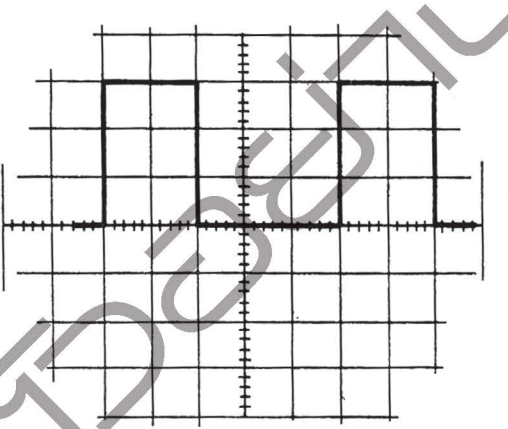
แบบฝึกหัดบทที่ 1

(1) จงให้คำจำกัดความหรือคำนิยามของ Repetitive waveform, Transient, Periodic waveform.

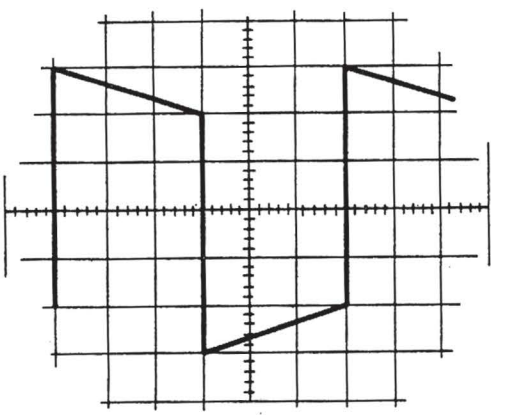
(2) จงสเก็ตช์ภาพของรูปคลื่นพัลส์แบบ Square, Triangle, Sawtooth, Exponential

(3) จงให้คำนิยามของคำศัพท์ต่อไปนี้ ขอบหน้าของพัลส์, ขอบหลังของพัลส์, T, PRE, PW, PD, M/S ratio, Duty cycle

(4) จากรูปต่อไปนี้ วัดได้จากออสซิลโลสโคปที่ตั้งย่านวัดแรงดันเท่ากับ 0.1 V/div และย่านเวลาเท่ากับ 1 mS/div จงคำนวณค่าของ Pulse amplitude, PRF, PW, Duty cycle, M/S ratio

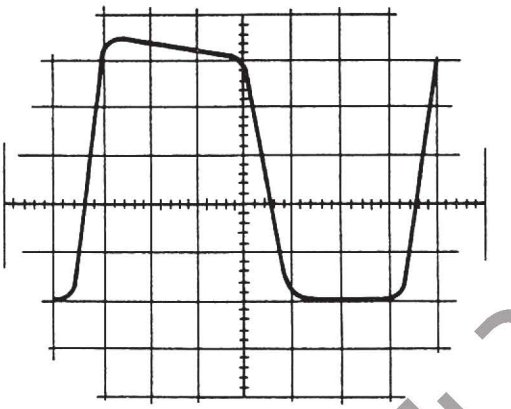


(5) จากรูปคลื่นต่อไปนี้ จงคำนวณค่าความลาดเอียงของรูปคลื่น

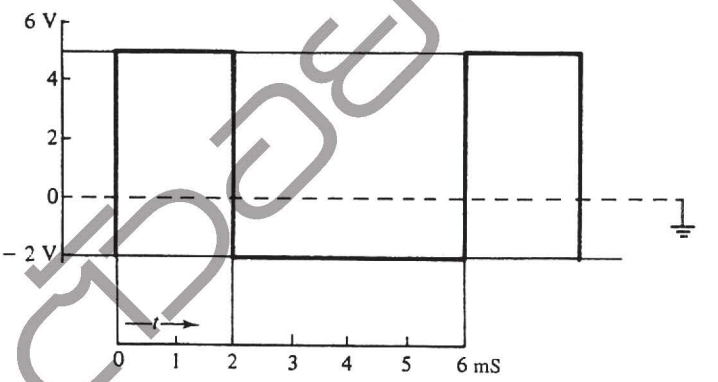


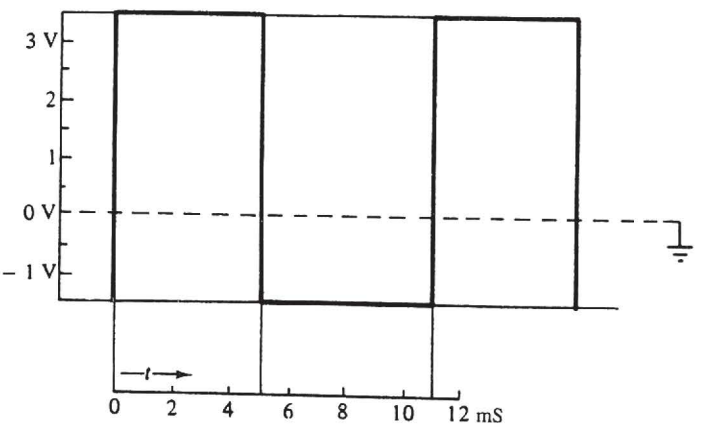
ตัวอย่าง

(6) จากรูปคลื่นต่อไปนี้ วัดได้จากออสซิลโลสโคปที่ตั้งย่านวัดดังนี้ V เท่ากับ 1V/div, T เท่ากับ 10 μS/div จงคำนวณหา Pulse amplitude, Tilt, t_r, t_f, PW, PRF, M/S ratio และ Duty cycle

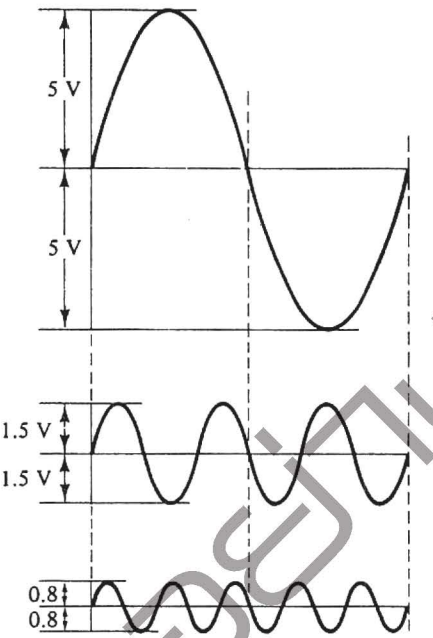


(7) จากรูปคลื่นที่กำหนดให้ทั้ง 2 รูปต่อไปนี้ จงคำนวณหาค่าแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณแต่ละรูปคลื่น





(8) จงสเก็ตช์ภาพรูปคลื่นขึ้นมาใหม่ ซึ่งเกิดจากการรวมกันระหว่างรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกันทั้ง 3 รูปคลื่น ซึ่งแสดงในภาพข้างล่างนี้ (สเก็ตช์ภาพลงในกระดาษกราฟ)



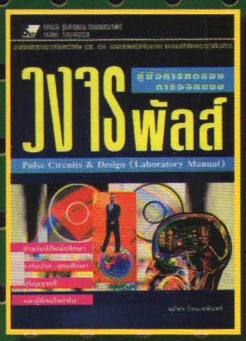
(9) จงคำนวณค่า Upper และ Lower cutoff frequency ของวงจรขยายวงจรหนึ่ง ที่รับสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมและปรากฏว่าสัญญาณเอาต์พุตมี t_r = 30 μS และ Tilt = 8.2 %, PW = 220 μS

(10) จงคำนวณค่า t_r และความลาดเอียงของรูปคลื่นเอาต์พุตพัลส์สี่เหลี่ยมของวงจรขยายวงจรหนึ่งที่มีย่านตอบสนองความถี่ที่ 10 Hz ถ้า 500 kHz โดยที่พัลส์สี่เหลี่ยมที่ป้อนเข้าทางอินพุตมีความถี่ 5 kHz

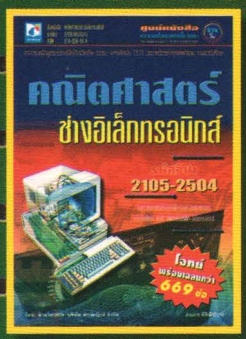
(11) สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม ความถี่ 1 kHz ป้อนเข้าวงจรขยายแบบหนึ่ง ซึ่งทำให้เอาต์พุตมี t_r = 350 nS และความลาดเอียง = 5% จงคำนวณค่า f_L และ f_H ของวงจรขยายดังกล่าว

ตัวอย่าง

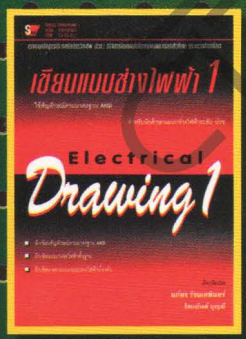
แนะนำหนังสือ



คู่มือการทดลองการออกแบบวงจรพัลส์
ราคา 125 บาท



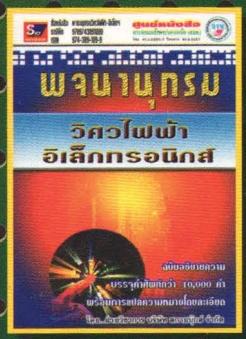
คณิตศาสตร์ช่างอิเล็กทรอนิกส์
ราคา 80 บาท



เขียนแบบช่างไฟฟ้า 1
ราคา 120 บาท

วงจรไอซีและการประยุกต์ใช้งาน
ราคา 100 บาท

ทฤษฎีเครื่องส่งวิทยุและสายอากาศ
ราคา 100 บาท



พจนานุกรมวิศวไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์
ราคา 250 บาท

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย

บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด
SKYBOOK COMPANY LIMITED
28, 30, 32 ซอยรังสิต-ปทุมธานี 16 ซอย 7
ต.ประชาธิปัตย์ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130
โทรศัพท์ 0-2958-1125-7, 0-2567-5119 โทรสาร 0-2567-5105
www.skybook.co.th e-mail: sales@skybook.co.th

ทฤษฎีและการออกแบบ
วงจรพัลส์

ISBN : 978-616-213-578-1

ราคา 150 บาท